

DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS
EXPERIMENTALES

PLANIFICACIÓN, PUESTA EN PRÁCTICA Y EVALUACIÓN
DE LA ENSEÑANZA PROBLEMATIZADA SOBRE LA LUZ
Y LA VISIÓN EN LA EDUCACIÓN SECUNDARIA
OBLIGATORIA

LUIS OSUNA GARCÍA

UNIVERSITAT DE VALENCIA
Servei de Publicacions
2007

Aquesta Tesi Doctoral va ser presentada a València el dia 17 de Maig de 2007 davant un tribunal format per:

- D. Carles Furió Mas
- D. Albert Gras i Martí
- D. Jenaro Guisasola Aranzábal
- D. Rafael López-Gay Lucio-Vilegas
- D. Valentín Gavidia Catalán

Va ser dirigida per:

D. Joaquín Martínez Torregrosa

D. Jaime Carrascosa Alis

©Copyright: Servei de Publicacions
Luis Osuna García

Depòsit legal:

I.S.B.N.:978-84-370-6881-7

Edita: Universitat de València
Servei de Publicacions
C/ Artes Gráficas, 13 bajo
46010 València
Spain
Telèfon: 963864115



UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales

***PLANIFICACIÓN, PUESTA EN PRÁCTICA Y
EVALUACIÓN DE LA ENSEÑANZA PROBLEMATIZADA
SOBRE LA LUZ Y LA VISIÓN EN LA EDUCACIÓN
SECUNDARIA OBLIGATORIA***

Memoria

Presentada para optar al Grado de Doctor en Ciencias Químicas por:

Luis Osuna García

Dirigida por:

Dr. Joaquín Martínez Torregrosa y

Dr. Jaime Carrascosa Alís

València 2006

D. Jaime Carrascosa Alís, Doctor en Ciencias Químicas por la Universitat de València y Catedrático de Física y Química de Enseñanza Secundaria, y D. Joaquín Martínez Torregrosa, Doctor en Ciencias Físicas por la Universitat de València y Catedrático de Escuela Universitaria de Didáctica de las Ciencias Experimentales, en la Facultad de Educación de la Universidad de Alicante,

CERTIFICAN que la presente memoria con el título "**PLANIFICACIÓN, PUESTA EN PRÁCTICA Y EVALUACIÓN DE LA ENSEÑANZA PROBLEMATIZADA SOBRE LA LUZ Y LA VISIÓN EN LA EDUCACIÓN SECUNDARIA OBLIGATORIA**" ha sido realizada por Luis Osuna García bajo nuestra dirección y constituye la tesis para optar al grado de doctor en Ciencias Químicas.

Para que así conste, y en cumplimiento de la legislación vigente, presentamos esta memoria de Tesis Doctoral firmando el presente certificado en Valencia a 30 de enero de 2007.

Fdo.: Jaime Casrrascosa Alís

Fdo. Joaquín Martínez Torregrosa

La realización de un trabajo como éste ha sido posible gracias a la ayuda, colaboración y participación desinteresada de muchas personas, profesores y alumnos. A todas ellas quiero expresar mi más sincero agradecimiento y, muy especialmente:

Al Dr. Joaquín Martínez Torregrosa, director de este trabajo, por sus continuas muestras de apoyo y ayuda, por sus sabias enseñanzas y por su amistad y al Dr. Jaime Carrascosa Alís, codirector del trabajo, por su ayuda inestimable.

Al Dr, Daniel Gil Pérez y al Dr. Carlos Furió Más, del departamento de Didáctica de Ciencias Experimentales y Sociales de la Universidad de Valencia, que con sus trabajos pioneros en este campo han sido maestros de tantos investigadores en Didáctica.

A mis compañeros del grupo de Física y Química, de los que llevo aprendiendo desde hace casi veinte años y me regalan su amistad, Manuel Alonso, Josep Lluís Domènech, M^a Ángeles Doménech, Francisco Carbonell y Rafaela Verdú, por su colaboración al realizar los materiales didácticos, sus sugerencias al discutirlos y la experimentación de los mismos en sus clases.

A mis compañeros del Instituto "Luis García Berlanga", por su desinteresada y amigable colaboración al pasar cuestionarios y probar materiales en sus clases, Eva Berenguer, África Martínez, Jesús Molina, Ana Sogorb y Manuel Trives.

Por último, quiero agradecer a mi familia, a mis padres y a mis hijos y, en especial, a Carmen su bondad, paciencia infinita y apoyo incondicional para realizar este trabajo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E ÍNDICE

De la misma forma que nadie puede pensar en llegar hasta la Luna o sanar una enfermedad sin ayuda de investigación, no podemos esperar reformas efectivas en educación sin los conocimientos extraídos de la investigación educativa (National Research Council, 2001). De acuerdo con esta aseveración, pensamos que la investigación educativa puede arrojar luz a nuestro sistema educativo de creciente complejidad y exigencia, mucho más en cuanto que nuestras propuestas de mejora están dirigidas a estudiantes preadolescentes, de edades calificadas de difíciles por amplios sectores de la comunidad educativa.

Las innovaciones que aquí presentamos se han desarrollado dentro de la línea de investigación del grupo de trabajo del Departamento de Didáctica General y Didácticas Específicas de la Universidad de Alicante. Durante los últimos 14 años se ha ido desarrollando, paulatinamente, en el contexto de la enseñanza por investigación orientada, un protocolo para la planificación de la enseñanza problematizada, un protocolo que ya ha sido utilizado reiteradamente (Verdú, 2004) y que se encuentra suficientemente elaborado como para ser el punto de partida para la planificación sistemática (dentro de lo factible y deseable) de cualquier tema específico de enseñanza de las ciencias en la educación secundaria (etapa de 12 a 18 años).

Este proyecto concreto supone la puesta en práctica de este protocolo de planificación para el tema de óptica geométrica incluido tanto en el currículo de la Educación Secundaria Obligatoria (etapa de 12 a 16 años) como en el de Física de 2º curso de Bachillerato (obligatorio, por tanto, para la prueba de Selectividad). Nosotros hemos elegido el nivel de la ESO por tratarse de una etapa que merece especial atención por parte de la investigación didáctica: buena parte de las quejas de los profesores sobre actitudes, comportamientos, capacidades, etc. se centran en los alumnos de estas edades, aludiendo razones bien conocidas (obligatoriedad, adolescencia, actitudes negativas,...). Pensamos que realizar propuestas innovadoras en este tema y para esta etapa está justificado en base a dos factores: es un tema que en esta etapa educativa se puede plantear con sentido en sí mismo, sin la complejidad de conectarlo con otros temas del curso y, además, por los tópicos a los que hace referencia,

representa una ocasión privilegiada para cambiar la idea de que no es posible enseñar de forma efectiva conocimientos científicos a estudiantes tan jóvenes. Elaborar secuencias de enseñanza que “funcionen” (con la preparación adecuada de los profesores) en estas edades es, por tanto, un reto que merece la pena afrontar.

Esta investigación, de diseño y evaluación de la puesta en práctica de secuencias de enseñanza-aprendizaje, puede ser considerada bajo dos dimensiones.

- a) Desde la perspectiva de Investigación y Desarrollo (I+D), el énfasis en la planificación de la enseñanza de la óptica geométrica está centrado en los procesos de producción de estructuras didácticas, ligando fuertemente nuestras propuestas con los principios teóricos que emanan del protocolo de planificación.
- b) Desde la perspectiva de “Ingeniería Didáctica”, el énfasis en la planificación de la enseñanza de la óptica geométrica está centrado en el diseño de situaciones didácticas y en los procesos de validación de la secuencia de enseñanza por comparación del conocimiento de los estudiantes antes y después de la enseñanza (Méheut y Psillos, 2004).

Las preguntas genéricas iniciales que han orientado esta investigación son:

- ¿Es posible enseñar los conocimientos sobre “la luz y la visión” de una forma problematizada a alumnos de Enseñanza Secundaria Obligatoria?
- ¿Se favorecerá de este modo un aprendizaje con comprensión del tema y una mejora en las actitudes de los alumnos? ¿Se producirán mejoras notables respecto a la situación actual?
- ¿En qué medida se puede favorecer que otros profesores se apropien y utilicen la secuencia de enseñanza problematizada fruto de esta investigación?

Se trata de preguntas de interés a las que hemos tratado de responder a lo largo del desarrollo del proyecto, cuya memoria final se organiza según el siguiente ÍNDICE:

• PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E ÍNDICE	7
• PRIMERA PARTE: LA PLANIFICACIÓN DE UN TEMA SOBRE LUZ Y VISIÓN EN LA ESO CON UNA ESTRUCTURA PROBLEMATIZADA. ¿Es posible enseñar los conocimientos sobre “la luz y la visión” de una forma problematizada a alumnos de Enseñanza Secundaria Obligatoria?	13
1. El aprendizaje de los conocimientos científicos dentro de la orientación constructivista	15
1.1 Crítica de la enseñanza habitual	15
1.2 Una concepción psicológica constructivista sobre cómo se produce el aprendizaje con comprensión	18
1.3 ¿Cómo organizar la enseñanza dentro de la orientación constructivista?	20
1.3.1 Modelos de enseñanza/aprendizaje como cambio conceptual.	21
1.4 La hipótesis del modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación orientada	26
1.4.1 El papel del profesor y el clima del aula en las estrategias de cambio conceptual y metodológico	28
2. Presentación general del proceso de planificación de un tema desde el modelo de enseñanza por investigación orientada	33
2.1 Estructura básica de un tema	35
2.2 Preguntas que se plantean para concretar dicha estructura	39
3. Toma de decisiones para elaborar la estructura problematizada de un tema de óptica geométrica en la ESO	43
3.1 Génesis y evolución de las ideas sobre la luz y la visión	44
3.1.1 El modelo de visión por emisión del “fuego visual”	44
3.1.2 El modelo de visión por emanación de imágenes	46
3.1.3 El modelo mixto de visión	47
3.1.4 Crítica aristotélica a los modelos de visión anteriores	48
3.1.5 El modelo de visión por recepción de rayos de luz	49
3.1.6 El modelo de visión por recepción de haces de luz	54

3.1.7	Análisis comparativo de las teorías de Alhazen y de Kepler sobre el concepto de imagen óptica.....	61
3.1.8	Aportaciones de la óptica geométrica posterior a Kepler al modelo de visión	68
3.1.9	Cuadro-resumen de las principales teorías de la visión	73
3.2	¿Qué deberíamos tratar de conseguir con los alumnos sobre “la luz y la visión” en la ESO? ¿Qué problemas podrían ser adecuados para organizar la enseñanza?	75
3.3	¿Qué supone la comprensión de la teoría de Kepler sobre la luz y la visión?, ¿Qué obstáculos es necesario superar para conseguir dicha comprensión? (Metas parciales y obstáculos asociados)	78
3.4	Propuesta de una estructura problematizada para la unidad didáctica sobre “la luz y la visión” en la ESO	84
4.	¿En qué medida la estructura problematizada elaborada para la enseñanza de la luz y la visión es didácticamente relevante?	91
4.1	Formulación y justificación de la primera hipótesis	91
4.2	Operativización de la primera hipótesis	95
4.3	Diseños experimentales para la contrastación de la primera hipótesis	99
4.3.1	Diseño experimental para obtener evidencias de la existencia y persistencia de los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler en los estudiantes	99
4.3.2	Diseño experimental para obtener evidencias de que la enseñanza habitual no contempla los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler y tiene un carácter marcadamente empirista y aproblemático	142
4.3.3	Visión general del diseño realizado para contrastar la primera hipótesis	165
5.	Presentación y análisis de los resultados obtenidos en la contrastación de la primera hipótesis	167
5.1	Resultados que muestran que los alumnos presentan obstáculos a la comprensión del modelo de visión de Kepler y que esos obstáculos persisten a la enseñanza habitual	168

5.2	Resultados que muestran que la enseñanza habitual no contempla los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler y tiene un carácter marcadamente empirista y apoblemático	189
6.	Propuesta justificada de una secuencia detallada de actividades para abordar el problema de “¿cómo vemos? ¿cómo podemos ver mejor?” en la ESO basada en el estudio realizado	205
•	SEGUNDA PARTE: <i>DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE LA SECUENCIA DE ENSEÑANZA PROBLEMATIZADA SOBRE LA LUZ Y LA VISIÓN EN LA ESO</i>	285
7.	¿Se favorecerá de este modo un aprendizaje con comprensión del tema y una mejora en las actitudes de los alumnos? ¿Se producirán mejoras notables respecto a la situación actual?	287
7.1.	Formulación y justificación de la segunda hipótesis	288
7.2.	Operativización de la segunda hipótesis	289
7.3.	Diseños experimentales para contrastar la segunda hipótesis	291
7.3.1.	Diseño experimental para analizar en qué medida se generan oportunidades favorecedoras de un aprendizaje con comprensión en el desarrollo de la secuencia de enseñanza	291
7.3.2.	Diseño experimental para obtener evidencias de la mejora en la comprensión conceptual	298
7.3.3.	Diseño experimental para obtener evidencias de la mejora en los indicadores de apropiación y en las actitudes de los alumnos	308
7.3.4.	Diseños experimentales para obtener evidencias sobre las expectativas generadas por la secuencia problematizada en los profesores	312
7.3.5.	Visión general del diseño realizado para contrastar la segunda hipótesis	320

8. Presentación y análisis de los resultados obtenidos en la contrastación de la segunda hipótesis	321
8.1. Resultados que muestran que la secuencia de enseñanza genera oportunidades en el aula favorecedoras de un aprendizaje con comprensión	321
8.2. Resultados que muestran que los alumnos tratados mejoran la comprensión conceptual	335
8.2.1. Resultados que muestran la superación de los obstáculos para la comprensión del modelo de Kepler	335
8.2.2. Resultados que muestran una mejora en el nivel de comprensión global después del tratamiento	347
8.3. Resultados que muestran que los alumnos tratados obtienen mejores indicadores de apropiación y actitudes	351
8.4. Resultados que muestran que los profesores formados adquieren expectativas muy positivas sobre su potencialidad para mejorar la enseñanza y el aprendizaje	356
9. Conclusiones y perspectivas	367
10. Anexos	373
Anexo1. Conjunto de cuestiones utilizadas para contrastar la existencia y persistencia de obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler	373
Anexo2. Secuencia didáctica presentada a los profesores para su análisis (cuestionario C4-p).....	379
Anexo 3. Libros de texto analizados (cuestionario C6-L)	391
Anexo 4. Cuestiones de selectividad analizadas (cuestionario C7-S)	393
Referencias bibliográficas	407
Índice de autores	407
Bibliografía	411

PRIMERA PARTE

LA PLANIFICACIÓN DE UN TEMA SOBRE LUZ Y VISIÓN EN LA ESO CON UNA ESTRUCTURA PROBLEMATIZADA

¿Es posible enseñar los conocimientos sobre “la luz y la visión” de una forma problematizada a alumnos de Enseñanza Secundaria Obligatoria?

CAPÍTULO 1

EL APRENDIZAJE DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICOS DENTRO DE LA ORIENTACIÓN CONSTRUCTIVISTA

1.1 Crítica de la enseñanza habitual

La enseñanza por transmisión verbal de conocimientos en su estado final, ya acabados, -aún la más extendida en nuestro país-, supone una concepción de la inteligencia que la considera susceptible de enriquecerse y ampliarse con la aportación de conocimientos que el sujeto va incorporando a medida que se le transmiten. Puede estar, además, acompañada de ideas empiristas que exigirán que la aportación de nuevos conocimientos vaya auxiliada con demostraciones experimentales que los corroboren. Se apoya en el conductismo y el empirismo asociacionista, en el mito del origen sensorial de los conocimientos científicos (ya criticado por Piaget, 1970), que acepta que el conocimiento se forma a partir de sensaciones exteriores con significado unívoco en sí mismas, reduciendo la actividad del sujeto a la fijación del conocimiento que viene dado desde fuera. Esta concepción de la inteligencia, vigente, según Novak (1988), durante los tres primeros cuartos del siglo XX, encaja con una concepción empiro/inductivista de la ciencia (abandonada en los años 50), cuya premisa fundamental es que el conocimiento científico se basa en la observación, lo que supone una base segura y verdadera sobre la que construir el conocimiento. Según esta concepción, las leyes y teorías que constituyen el conocimiento científico se derivan por generalización inductiva de un número suficientemente grande de observaciones, obtenidas cuidadosamente y con la mente libre de prejuicios.

Según esta forma de enseñanza habitual, una explicación clara y bien presentada por el profesor debería producir, -junto con los clásicos ejercicios ejemplificadores y experimentos ilustrativos- una adquisición de los conceptos que se mostraría por las respuestas y conductas adecuadas ante situaciones típicas. Las deficiencias para comprender los conceptos serán, por tanto, fruto, únicamente, de "la falta de estudio o capacidad de los estudiantes".

Sin embargo, hace ya tiempo que diversos trabajos (Viennot, 1976 ; Ausubel, 1978; Gil et al., 1991) han puesto de manifiesto que esta creencia exculpatoria para la enseñanza y determinista para los alumnos, no es fácil de sostener, ya que cuando los estudiantes se enfrentan a cuestiones no basadas en la repetición memorística, la inmensa mayoría comete errores que denotan la ausencia de comprensión del significado de los conceptos científicos más básicos, a pesar de una enseñanza reiterada, incluso en aquellos estudiantes que obtienen calificaciones elevadas. Particularmente relevante es el hecho de que los errores encontrados no son consecuencia de simples olvidos o equivocaciones momentáneas, sino que se responden, sobre todo en Física, a la existencia de ideas muy seguras y persistentes que afectan de forma similar a alumnos de distintos países y niveles (incluyendo a un porcentaje significativo de profesores).

Los intentos de explicación de la abundancia y persistencia de errores conceptuales en numerosos dominios de las ciencias han apuntado básicamente a dos causas, relacionadas, además, entre sí. Por una parte, se ha barajado la hipótesis -con unos u otros matices- de que esos "errores" constituyen más bien ideas espontáneas o preconcepciones que los alumnos ya tienen previamente al aprendizaje escolar. En segundo lugar, se cuestiona que la enseñanza habitual, por transmisión de conocimientos ya elaborados, haga posible un aprendizaje significativo de los conceptos científicos, es decir, haga posible que los alumnos pasen a tener las ideas que se les han transmitido.

Se han identificado errores conceptuales o concepciones alternativas, como se han denominado más recientemente, en todos los campos de la enseñanza de las ciencias y hay publicadas amplias selecciones bibliográficas [Osborne y Wittrock (1983); Carrascosa (1983 y 1985); Driver et al., (1989); Hierrezuelo y Montero (1989); Carrascosa y Gil, (1992); Wandersee et al., (1994); Pfundt y Duit, (2004)]. El campo de la óptica, aunque un poco más tardíamente que el de la Mecánica, tampoco ha sido ajeno a esta línea de investigación (La Rosa, et al., 1984; Goldberg y McDermott, 1986; Kaminski y Viennot, 1989; Osborne, Black et al., 1993; Selley, 1996a y 1996b; Galili, 1996; Fleer, 1996; Osuna, 2001, y Martínez Torregrosa y Osuna, 2001)

La amplia investigación realizada sobre las ideas alternativas ha permitido llegar a una serie de conclusiones sobre las que existe un elevado consenso (Wandersee et al., 1994). Entre ellas podemos destacar las siguientes:

- 1. Los estudiantes llegan a las clases de ciencias con un conjunto variado de concepciones alternativas sobre objetos y hechos de la naturaleza**
- 2. Las concepciones alternativas que traen los estudiantes a la instrucción formal atraviesan fronteras de edad, capacidad, género, y límites culturales**
- 3. Muchas de ellas son persistentes y resistentes a la desaparición mediante estrategias de enseñanza convencionales**
- 4. Las concepciones alternativas son semejantes, con frecuencia, a las explicaciones de los fenómenos naturales sostenidas por generaciones previas de científicos y filósofos**
- 5. Algunas concepciones alternativas tienen sus orígenes en un conjunto variado de experiencias personales, incluyendo la observación y percepción directa, la cultura y el lenguaje del entorno próximo, y también las explicaciones de los profesores y los materiales de instrucción**
- 6. Los profesores, a menudo, tienen las mismas concepciones alternativas que sus estudiantes**
- 7. Los conocimientos previos de los alumnos interactúan con los conocimientos presentados en la instrucción formal, dando lugar a un conjunto variado de resultados**

El grave problema que destacan estas conclusiones no es que los estudiantes tengan concepciones alternativas que afectan al aprendizaje de los conocimientos científicos antes de que se enseñen, sino el que las tengan incluso después de varios años de instrucción y en los alumnos de altas calificaciones. No parece, pues, infundado pensar que la enseñanza habitual no tiene en cuenta la existencia de estas ideas o minusvalora su influencia en el aprendizaje. Se hace necesario, en esta situación, buscar nuevas estrategias de enseñanza que hagan posible la superación de las concepciones espontáneas por los conocimientos científicos, e, íntimamente ligado a esto, una búsqueda de explicaciones sobre cómo se produce el aprendizaje humano del conocimiento científico.

Las líneas de investigación, con este objetivo, han dado lugar a propuestas que - al margen de algunas diferencias no menores- coinciden básicamente en concebir el aprendizaje de las ciencias como un proceso de construcción de conocimientos,

en el que los conocimientos previos de los alumnos tienen un papel esencial y activo.

1.2. Una concepción constructivista sobre cómo se produce el aprendizaje con comprensión

De un modo resumido, la concepción constructivista del aprendizaje sostiene que (Ausubel, 1978) "en una situación determinada, los seres humanos construyen sus propios significados a partir de sus conocimientos previos".

Como señala Driver (1986), toda persona, durante su vida, va creando espontáneamente un sistema de ideas, de creencias, sobre cómo ocurren las cosas que nos permite generar expectativas que nos hacen capaces de predecir hechos futuros. Estos sistemas de creencias son, afortunadamente, muy estables: sin dichas expectativas viviríamos en un estado de continua desorientación y sorpresa. Así, el hecho de que podamos conducir por nuestras carreteras sin que ocurran más accidentes es posible porque el conjunto de expectativas que hemos desarrollado nos permite predecir la velocidad y el movimiento de otros vehículos (pensemos, por ejemplo, cuando en fracciones de segundo decidimos pasar en un cruce complejo).

Según la orientación constructivista, el significado es construido interiormente por el sujeto cuando actúa sobre el objeto. Lo que el sujeto aporta a esta construcción -y ello depende fundamentalmente de sus esquemas conceptuales previos- es, al menos, tan importante como el dato exterior, que puede actuar como señal iniciadora del proceso. La "fabricación" de significado ante una situación lleva tiempo, normalmente imperceptible cuando se trata de situaciones cotidianas en las que las expectativas del individuo encajan fácilmente en el contexto. Sin embargo, ante situaciones más complejas, en las que nuestros alumnos han construido expectativas y creencias sobre una serie de fenómenos naturales, sociales, estructuras lingüísticas,..., y que estas ideas son usadas al construir significados, los datos que les llegan del exterior, incluidas las percepciones directas, son elaborados, transformados e interpretados de acuerdo con su sistema, de tal manera que puedan integrarse en éste y le resulten comprensibles. La información que se le transmite en clase corre exactamente la misma suerte.

La perspectiva constructivista sugiere que más que "extraer" conocimiento de la realidad, la realidad sólo adquiere sentido en la medida en que la construimos (Driver, 1986). La elaboración de un significado, ya sea a partir de un texto, de un diálogo o de una experiencia física, implica un proceso activo de formulación interna de hipótesis o realización de ensayos consistentes con el aprendizaje anterior. Este significado es algo adicional y distinto al estímulo y al conocimiento ya existente: construir significado requiere esfuerzo por parte del que aprende para generar relaciones entre los estímulos y la información acumulada (requiere "generar y probar") (Osborne y Wittrock, 1985). Si hay acuerdo, decimos que "comprendemos", en caso contrario intentamos con nuevas construcciones o abandonamos la situación como "carente de sentido". Es decir, buscamos comprender nuevas situaciones usando inicialmente ideas obtenidas de nuestra experiencia anterior. Las ideas existentes son vinculadas tentativamente a la nueva situación a causa de alguna similitud, por la observación de alguna característica mediante alguno de los sentidos, posiblemente por una palabra que nos recuerde algo similar. La idea vinculada tentativamente es entonces probada, mediante la obtención de más información de un modo más focalizado, para poner a prueba una predicción basada en ella (Harlen, 1992). Todo este proceso, como señalan Schaverien y Cosgrove (1999 y 2000), se desarrolla dentro de un contexto de valor: la prueba interna del significado, su selección, se realiza teniendo en cuenta su valor para la persona. En unas ocasiones, se trata de un valor evolutivo, incluido en los genes; en otras de un valor personal próximo o cultural.

Los razonamientos que para el profesor pueden ser enormes evidencias, pueden dejar al estudiante perfectamente insensible y no constituir para él ninguna contradicción mantener a la vez su concepción espontánea distinta de la científica y -necesariamente de un modo aparente, superficial y olvidadizo- las del libro o profesor ("supervivencia escolar"). La "evidencia experimental", por supuesto, también es reinterpretada por las personas en términos de sus propias ideas.

Las principales características de la visión constructivista que integra las investigaciones recientes sobre didáctica de las ciencias (Hewson, 1981; Posner et al., 1982; Gil 1983; Osborne y Wittrock, 1983; Resnick, 1983; Driver, 1986 y 1988; Hodson, 1988; Bencze y Hodson, 1999; Millar, 1989; Pozo, 1999; Zoller, 1999; Stinner, 1995; Gil et al., 1999;...) con muchas otras contribuciones precedentes (Bachelard, Kelly, Piaget, Vigotsky, Ausubel, ..), según Driver, son:

- **Lo que hay en el cerebro del que va a aprender tiene importancia**
- **Encontrar sentido supone establecer relaciones: los conocimientos que pueden conservarse permanentemente en la memoria no son hechos aislados, sino aquéllos muy estructurados que se relacionan de múltiples formas**
- **Quien aprende construye activamente significados**
- **Los estudiantes son responsables de su propio aprendizaje**

Una representación de esta construcción psicológica de significados, ya clásica, es la presentada por Osborne y Wittrock (1985), en su trabajo "The Generative Learning Model", que ha sido recientemente actualizada con hipótesis basadas en la Biología por Schaverien y Cosgrove (1999). Queda, no obstante, proponer cómo se organiza la enseñanza dentro de esta orientación constructivista.

1.3 ¿Cómo organizar la enseñanza de las ciencias dentro de la orientación constructivista?

Las hipótesis que subyacen a los modelos de enseñanza que gozan de una mayor aceptación por la comunidad de investigadores, tienen su génesis en una aspiración intuitiva que, desde principio del siglo pasado, pretende acercar la actividad de enseñanza/aprendizaje en el aula de ciencias a la actividad científica como la mejor forma de lograr los objetivos de la formación científica de los estudiantes. En este sentido, cuando hablamos de constructivismo en la Didáctica de las Ciencias (Gil y Carrascosa, 1994; Gil et al., 1999; Gil, et al., 2002; Valdés et al., 2004; Jiménez-Alexandre et al., 2000; Leacht et al., 2002; Lijnse et al., 2004), nos referimos a una forma de enseñar y aprender, organizada como un proceso social en el que los alumnos, con la guía y apoyo de un profesor-experto, van construyendo, reelaborando, los conocimientos científicos (frente a la habitual transmisión verbal de dichos conocimientos en su estado final) en un ambiente en el que existen oportunidades reiteradas y sistemáticas para pensar, hacer, debatir y argumentar.

No obstante, no todos los modelos de enseñanza de orientación constructivista tienen las mismas características. A continuación trataremos algunos de ellos, con la intención de justificar por qué conviene organizar la enseñanza y el

aprendizaje de las ciencias fisicoquímicas como un proceso de investigación dirigida en torno a problemas.

1.3.1. Modelos de enseñanza/aprendizaje como cambio conceptual

La propuesta de considerar el aprendizaje como un cambio conceptual (Posner et al., 1982), fundamentada en el paralelismo existente entre el desarrollo conceptual de un individuo y la evolución histórica de los conocimientos científicos, ha ejercido una gran influencia en el replanteamiento de la enseñanza de las ciencias. Según estos autores, el aprendizaje significativo de las ciencias constituye una actividad racional semejante a la investigación científica y sus resultados (el cambio conceptual) pueden contemplarse como el equivalente - siguiendo la terminología de Kuhn (1971)- a un cambio de paradigma. A partir de las ideas de Toulmin (1977) sobre filosofía de la ciencia, estos autores identifican cuatro condiciones para que tenga lugar el cambio conceptual:

- **Es preciso que se produzca insatisfacción con los conceptos existentes**
- **Ha de existir una concepción mínimamente inteligible, que ...**
- **Debe llegar a ser plausible, aunque inicialmente contradiga las ideas previas del alumno, y**
- **Ha de ser potencialmente fructífera, dando explicación a las anomalías encontradas y abriendo nuevas áreas de investigación**

La concreción más popular de estrategias de cambio conceptual, dentro de la orientación constructivista, es probablemente la secuencia de instrucción de Driver y Oldham, (1986) utilizada en el proyecto CLIS (Children Learning in Science, 1987) (vease cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Fases de la secuencia de instrucción del proyecto CLIS (1987)

1. **Orientación**, donde los alumnos tienen oportunidad de desarrollar la intencionalidad y su motivación sobre el tema que se va a tratar.
2. **Explicitación**, en la cual los alumnos clarifican sus ideas sobre el tema. Esto puede alcanzarse mediante actividades variadas, como discusiones en grupo, diseño de carteles o escribiendo.
3. **Reestructuración** de ideas, es la fase fundamental de la secuencia. Consiste en un número de pasos entre los que se incluyen los siguientes:
4. **Clarificación e intercambio** de ideas, durante la cual el lenguaje y significados de los alumnos puede ser precisado por contraste con otros puntos de vista, posiblemente conflictivos, sostenidos por otros estudiantes o aportados por el profesor.
5. **Construcción de nuevas ideas**, a la luz de las discusiones y demostraciones anteriores. Los estudiantes ven aquí que hay varias maneras de interpretar los fenómenos o la evidencia.
6. **Evaluación de las nuevas ideas**, bien experimentalmente o pensando sus implicaciones. Los estudiantes deben tratar de hallar los mejores modos de poner a prueba las ideas alternativas. En esta fase, los estudiantes pueden sentirse insatisfechos con sus propias concepciones.
7. **Aplicación** de ideas, donde se les da la oportunidad de usar las ideas que han desarrollado ante una variedad de situaciones, tanto familiares como novedosas.
8. **Revisión**, es la etapa final en la que se invita a los estudiantes a reflexionar sobre cómo han cambiado sus ideas, mediante comparaciones entre sus pensamientos al comienzo de la secuencia y su pensamiento al final.

De un modo quizás excesivamente esquemático la secuencia es: motivación/ explicitación/ conflicto/ introducción de nuevas ideas/ aplicación. Esta estructura básica está presente, con variaciones no muy sustanciales, en muchas de las secuencias de instrucción diseñadas según la orientación constructivista del aprendizaje, y ha supuesto, sin duda, una innovación importante al concretar propuestas alternativas a la enseñanza por transmisión.

Sin embargo, aunque algunos resultados experimentales (Hewson y Thorley, 1989) sugieren que las estrategias de enseñanza basadas en el cambio conceptual producen la adquisición de los conocimientos científicos más eficazmente que la estrategia habitual de transmisión/recepción, numerosos autores han constatado que ciertas concepciones alternativas son resistentes a la instrucción, incluso cuando ésta se orienta explícitamente a producir el cambio conceptual (Fredette y Lochhead, 1981; Engel y Driver, 1986; Shuell, 1987; White y Gunstone, 1989; Duschl y Gitomer, 1991 ...). Se ha señalado que, en ocasiones, el cambio conceptual conseguido es más aparente que real, como lo muestra el hecho de que al poco tiempo vuelvan a reaparecer las concepciones

que se creían superadas o son sustituidas por otras igualmente incorrectas (Shymanky et al., 1993; Arnold y Millar, 1996).

Las posibles limitaciones de las estrategias de "cambio conceptual por conflicto" no se ciñen a que, en algunos conceptos, el aprendizaje producido sea más aparente que real, sino que se han apuntado otras razones:

1. **Su uso reiterado puede generar rechazo o inhibiciones lógicas** (Gil et al., 1991) **o la caída en el relativismo**. Se ha podido advertir la "desconfianza" que produce progresivamente en los alumnos el comprobar cómo se solicitan sus creencias al principio de los temas para organizar, después, una campaña contra ellas donde siempre "acaban perdiendo en ese juego" a pesar de la lógica resistencia que oponen. En estas estrategias, las situaciones de conflicto cognitivo suelen convertirse en una confrontación entre las ideas propias (incorrectas) y los conocimientos científicos (externos) (Gil, 1993), que fomentan una aceptación de los mismos basada más en la confianza que merece quien los presenta (el profesor) que en criterios o razones que puedan fundamentar un aprendizaje sólido.
2. **No se ha prestado atención a las posibles conexiones entre las ideas de los alumnos en un campo determinado o a cómo están organizadas** (Pozo et al., 1991). Desconocer las relaciones entre las concepciones alternativas puede hacer creer que una idea espontánea ha sido superada tras una estrategia de cambio conceptual "por conflicto", cuando en realidad sólo ha sido superficialmente "debilitada" y puede aparecer, como al principio, en otros contextos. Muchas ideas importantes forman parte de redes de conocimientos y el cambio conceptual "puntual" es muy poco probable que suceda.
3. **No representa una alternativa global a la enseñanza mediante transmisión de conocimientos ya hechos**. Es decir, la cuestión, actualmente, no es la existencia de deficiencias en la enseñanza por transmisión directa -cuya identificación y constatación es uno de los hallazgos de la investigación educativa ya consolidados- sino si se tienen modelos de enseñanza que puedan competir con ella globalmente: aunque los profesores sean conscientes de ciertas deficiencias, es poco probable que abandonen un modelo que representa un "sistema" por algo que no es tal. Así, es necesario plantearse aspectos fundamentales desde el punto de vista práctico: ¿Son

utilizables estas estrategias más allá del inicio de los conceptos fundamentales?, ¿Cómo se integran (especialmente en la enseñanza de la Física y la Química) la resolución de problemas de lápiz y papel, los trabajos prácticos, el carácter cuantitativo de los conocimientos físico/químicos, la evaluación?, ¿Cómo secuenciar los temas en un curso o en una etapa de un modo no arbitrario?, ¿Cómo enseñar en dominios en los que no existen ideas espontáneas o, si existen, puedan ser fácilmente superadas?, etc.

Admitiendo que la atención a las ideas espontáneas -y por tanto la necesidad de su conocimiento por parte del profesor- es un logro irrefutable de la investigación didáctica, las limitaciones anteriores indican la necesidad de seguir profundizando, teniendo en cuenta otros aspectos, para fundamentar estrategias de instrucción.

El problema de la enseñanza de las ciencias no es cómo transmitir las concepciones científicas, sino cómo hacer que las personas vean más fructíferas, atractivas y funcionales las ideas científicas que las espontáneas. Cómo conseguir, en definitiva, que las ideas científicas pasen a formar parte de la manera de pensar de las personas (es decir, que sean funcionales). Avanzar en este propósito requiere reflexionar sobre posibles causas de la existencia, persistencia y utilidad de las ideas espontáneas y sobre aquello que las separa de las científicas. Es necesario preguntarse: ¿por qué dichas ideas son tan resistentes al cambio?, ¿por qué las personas las ven más atractivas y útiles que las ideas científicas?, ¿qué criterios utilizamos los humanos para producir y aceptar como "válidas" las ideas que elaboramos en contextos habituales, no formales?

En este sentido, es necesario tener en cuenta que, tanto para las personas en general como para los científicos en particular, el modo en que se desarrolla la comprensión -el modo en que se producen y aceptan conocimientos- depende tanto de las ideas ya existentes como de los procesos y criterios mediante los cuales dichas ideas son probadas y aceptadas en nuevas situaciones, y que los que se utilizan en el contexto cotidiano son muy distintos de los que se ponen en juego en el ámbito científico (Martínez Torregrosa, et al., 1991; Leach y Scott, 2000; Furió et al., 2000, Lemke, 2001; Guisasola et al., 2006). El conocimiento cotidiano está condicionado por unas "reglas", una "epistemología espontánea", que es efectiva para el desarrollo social de las personas, y que de un modo

inconsciente -lo que la hace arraigada y difícil de modificar- es ampliamente compartida y aceptada. Algunas características de la "epistemología espontánea" son:

- Se trata de un razonamiento "dirigido por la percepción", es decir, se basa en los rasgos más evidentes, más llamativos o claramente observables, de las situaciones. Las múltiples y reiteradas experiencias sensoriales que tienen las personas en su vida diaria (empujar un objeto, lanzar una piedra, dar cuerda a un juguete, ver que los combustibles se gastan ...) hacen que lleguen a integrarse en un sistema de expectativas útiles para la acción y para la predicción de hechos futuros en el mismo contexto.
- La tendencia de las personas al verificacionismo, es decir, a prestar una atención preferente a aquello que apoya las ideas propias iniciales y a ignorar otros aspectos que podrían contradecirlas. En consecuencia, se piensa en términos de certeza, no se pone en cuestión lo obvio, no se piensa en términos de tentativas ni se consideran habitualmente alternativas a lo aparente.
- En la aceptación de la "validez" de las ideas pesan mucho más los factores socio/afectivos (Solomon, 1987). Pensemos que a lo largo de la vida, dedicamos gran parte del tiempo a dialogar, a interactuar con otros. En estas interacciones lo que se pretende es que nuestras ideas sean rápidamente entendidas y aceptadas. Así, es más importante, sin duda, que una idea sea compartida, que otras características, como que sea lógica, universal o coherente. Una comunicación social efectiva se ve favorecida por un lenguaje (Llorens, 1988; Llorens et al., 1989; Solomon, 1987) cuyos términos sean ambiguos y poco precisos: podemos decir que una persona ha salido "muy rápida", "con mucha fuerza", "con mucha energía", "con mucho empuje"... y ser entendidos perfectamente.
- Criterios basados en "la naturalidad", "el antropocentrismo y vitalismo", "la proximidad afectiva al fenómeno", "**la validez local e inmediata**", son habitualmente utilizados, y compartidos, en la producción y aceptación del conocimiento cotidiano, sin importar que desde el punto de vista científico existan inconsistencias graves (como afirman Casadellà y Sanmartí, 1987):

los alumnos pueden afirmar sin problemas que "los gases no pesan, menos el butano", que en un ecosistema hay animales "buenos y malos", o considerar que el movimiento de caída de un cuerpo es más "sencillo y natural" que el de un ciclista moviéndose a velocidad constante por una carretera horizontal en contra de un intenso viento.

Como se ve, la superación de las ideas espontáneas, conseguir que los alumnos vean más atractivas y fructíferas las ideas científicas que las cotidianas, requiere el desarrollo simultáneo de unos criterios distintos de los espontáneos, un verdadero cambio epistemológico. Pero ¿cambio epistemológico hacia dónde?, ¿cambiar los criterios espontáneos por qué otros?

1.4 La hipótesis del modelo de enseñanza/aprendizaje de las ciencias como investigación orientada

Hemos introducido la idea básica de que la existencia de una epistemología espontánea, de formas de razonamiento y de producción de conocimientos en el contexto cotidiano, está ligada a la persistencia de las concepciones espontáneas, y que la superación de estas concepciones, es decir, la apropiación de las ideas científicas, requiere un cambio epistemológico de manera simultánea.

Parece lógico, en base a lo anterior, pensar que el aprendizaje significativo de los conocimientos científicos sólo será posible si los estudiantes "hacen suyas" las formas en que se producen y aceptan los conocimientos científicos, es decir, si se produce un cambio de la metodología o epistemología del "sentido común" a la epistemología científica.

Esta es la hipótesis básica de la propuesta de Gil (Gil, 1983; Gil y Carrascosa, 1985; Gil et al., 1991)

Las semejanzas entre las ideas espontáneas más arraigadas y concepciones históricas que fueron desplazadas por los conocimientos hoy aceptados por la comunidad científica, -una de las conclusiones que recoge el trabajo de Wandersee et al. (1994)- no puede ser accidental, sino resultado de una forma también similar de aceptar los conocimientos. Cabe, pues, pensar que los cambios conceptuales de los alumnos exijan igualmente un profundo cambio metodológico o, si se prefiere, epistemológico. Históricamente, ese cambio a la

vez conceptual y metodológico no fue en absoluto fácil, y es lógico pensar que ocurrirá lo mismo con los estudiantes: solamente si son puestos, de modo reiterado, en situación de poner en práctica formas de razonamiento, de producción de conocimientos, típicas de la nueva metodología (es decir, en situación de enfrentarse y plantear problemas, construir hipótesis, de diseñar experimentos, realizarlos y analizar cuidadosamente los resultados, con una atención particular a la coherencia global, etc.) será posible que superen la metodología del sentido común y, por tanto, que perciban las concepciones científicas como más útiles y fructíferas que las cotidianas.

Desde este punto de vista, la familiarización con la metodología científica, un objetivo siempre pretendido en todos los currícula y por los profesores de Ciencias, o la comprensión de la naturaleza de la Ciencia, no aparecen de manera autónoma, separada del objetivo de aprender conocimientos científicos o de generar actitudes positivas hacia las Ciencias y su aprendizaje. Como afirma Hodson (1992), la reciente investigación didáctica está mostrando que:

"... los estudiantes pueden aprender ciencia y pueden aprender más sobre la ciencia llevando a cabo investigaciones científicas bien diseñadas, bajo la mirada vigilante (recogiendo, debatiendo y apoyando a la reflexión sobre el progreso realizado) de un profesional experto".

En esta orientación, la construcción de conocimientos no se plantea como un cuestionamiento de las ideas de los alumnos, sino como resultado de las investigaciones realizadas para resolver problemas (Gil et al., 1991; Gil, 2003). No se parte de las ideas de los alumnos, aunque se conocen (estadísticamente). Dichas ideas –las de los alumnos y las del profesor- aparecerán en el momento adecuado, funcionalmente, al intentar avanzar en la solución del problema planteado. El "conflicto cognitivo", cuando se produce, tiene sentido dentro de un contexto en el que se pretende avanzar, con criterios explícitos e inspirados en el trabajo científico, en la solución de un problema. Una enseñanza por investigación, por resolución de problemas, debe integrar el desarrollo de contenidos específicos y de procesos metodológicos de manera que se puedan construir concepciones científicas cada vez más racionales y coherentes.

Por otro lado, los profesores de ciencias con experiencia en investigación, sabemos la implicación personal que exige la inmersión en la actividad investigadora, lo que la convierte en una característica más del modo en que se producen conocimientos científicos. No basta, pues, con afirmar que la evolución conceptual y epistemológica debe desarrollarse conjuntamente en la enseñanza, **es imprescindible tener en cuenta la necesidad de prestar atención prioritaria a generar y sostener en los alumnos la implicación actitudinal necesaria para participar en esa tarea tan exigente.** Desde ahora, cuando nos refiramos al "modelo de enseñanza por investigación orientada" será sinónimo de un modelo de instrucción que concibe el aprendizaje de conocimientos científicos como un proceso de evolución y cambio conceptual y epistemológico, y la enseñanza como el plan concreto desarrollado en el aula, con los alumnos, para favorecer dicho cambio y la implicación axiológica necesaria para que sea posible. Una implicación que se ve muy influenciada por el ambiente de aprendizaje en el aula, que tratamos a continuación.

1.4.1. El papel del profesor y el clima del aula en las estrategias de cambio conceptual y metodológico

Organizar el aprendizaje de los alumnos como una construcción de conocimientos a partir del tratamiento y desarrollo de situaciones problemáticas, supone colocarles en una situación similar a la que experimentan los científicos en los inicios de su formación como investigadores. Es decir, en una situación de investigación dirigida en dominios perfectamente conocidos por el "director de investigaciones" (profesor). Una situación en la que se abordan problemas conocidos por quienes dirigen el trabajo, en la que se dispone del apoyo y la orientación de expertos en ese campo y de la posibilidad de cotejar y discutir los avances y obstáculos con el resto del equipo de investigación. Es este clima de "equipos de investigadores noveles" dirigidos y apoyados por un "director de investigación/experto" el adecuado para una enseñanza por resolución de problemas que sea coherente con la concepción constructivista del aprendizaje expuesta anteriormente y con los objetivos simultáneos de aprender ciencias, apropiarse de criterios científicos y reflexionar sobre la naturaleza de la ciencia.

El profesor, por tanto, no debe pensar en términos de "qué contenidos ya acabados ha de transmitir a los alumnos", sino en términos de "qué situaciones problemáticas, qué actividades se ha de proponer a los alumnos para que, con la dirección adecuada, puedan (re)construir/aprender los conocimientos científicos".

La concreción de este modo de pensar debe producir situaciones problemáticas abiertas que faciliten la estructuración deseada del curso, la elaboración de temas o "unidades didácticas" con la intención de avanzar en el problema inicial, que en último término se traducen en, lo que hemos llamado, programas-guía de actividades (Gil y Martínez Torregrosa, 1987) que han de ser abordadas y resueltas por los alumnos organizados en pequeños grupos de trabajo. El trabajo en pequeños grupos (3 o 4 personas) favorece el nivel de participación y la creatividad, la discusión e intercambio de ideas, la argumentación de posturas y opiniones, etc., aspectos necesarios para abordar situaciones no familiares y abiertas (Ausubel, 1978; Solomon, 1987; Linn, 1987; Driver, 1992; Rodríguez y Escudero, 2000; Sanmartí, 2002; Kempa y Ayob (1995).

Por supuesto que la intervención del profesor es fundamental: como director de investigaciones escolares, es quien posee la visión global del campo en que se trabaja, y quien, por tanto, problematiza el curso y los temas, sabe los obstáculos más importantes a salvar, y se preocupa de que los alumnos estén orientados: que sepan cuál era el problema que se había planteado, qué es lo que se ha avanzado y lo que queda por hacer. Debe identificar las situaciones de "bloqueo" e intervenir para formular las preguntas adecuadas para poder avanzar. En otras ocasiones, claro está, su intervención consistirá en completar o explicar algunas actividades en las que el trabajo de los grupos haya sido incompleto o infructuoso, pero su intervención responderá a una necesidad creada previamente en los alumnos, por tratarse precisamente de cuestiones que ellos se han planteado. En este sentido conviene que la fracción de tiempo escolar en que los alumnos estén implicados en las tareas sea máximo.

Como buen director de investigación, el profesor debe ser consciente de la importancia de generar actitudes positivas en los alumnos para que sean posibles una enseñanza y aprendizaje efectivos, y de la influencia que sus propias expectativas y comportamiento ejercen en este aspecto. Este punto es esencialmente importante porque en la enseñanza habitual se ha constatado, sin embargo, el descenso de la actitud favorable de los alumnos hacia las ciencias, especialmente de las fisicoquímicas, (Acevedo, 1993) y su aprendizaje a lo largo del periodo de escolarización (James y Smith, 1985; Yager y Penick, 1986; Gibson y Chase, 2002), y que esta actitud negativa es más acusada hacia las ciencias físicas que hacia las biológicas. En efecto, existe un creciente consenso

entre los investigadores en afirmar que los estudiantes construyen, junto a su visión del "mundo exterior", una visión de sí mismos que se refleja en su autoestima, autoconfianza y sentido de su propia competencia en cada campo (Linn, 1987). Esta autovisión -que determina su motivación y esfuerzo personal y gobierna, por tanto, sus oportunidades educativas- se deriva, en gran medida, de sus experiencias anteriores en ese campo específico. Como indica Hodson (1985), hay considerable evidencia de que dichas actitudes empiezan a formarse tempranamente y que el estilo de enseñanza y la propia imagen de la ciencia que tiene el profesor son factores determinantes de la misma. No se trata, pues, de una tendencia "natural" o espontánea, sino, por el contrario, del desarrollo de un punto de vista de sí mismos al que debe contribuir positivamente la situación de aprendizaje. Las siguientes causas han sido apuntadas como generadoras de deterioro en las actitudes:

- El tipo de enseñanza de las ciencias impartida, basada en una concepción conductista del aprendizaje, que reduce las actividades escolares a la transmisión verbal de conocimientos ya elaborados y a su recepción.
- La imagen deformada que se da en las clases, tanto de los científicos como de la propia Ciencia (asépticos, empirismo, operativismo, linealidad, desproblematización, deshumanización, sin conexión con problemas reales...) (Carrascosa et al., 1993; Fernández et al., 2002; Yore et al., 2002).
- El tipo de evaluación que se limita a la calificación de los estudiantes, genera competencia y transmite una idea elitista (Alonso et al., 1996; Nolen, 2003).
- La ausencia de atención a la regulación por parte de los alumnos de sus propios procesos de aprendizaje (Linn, 1987; Baird, 1986).
- Un ritmo de enseñanza que hace que buena parte de los estudiantes se queden atrás (Nolen, 2003).

En cambio, se consiguen modificaciones positivas en las actitudes cuando:

- Existen altas expectativas en los profesores respecto a los logros de sus alumnos, de sí mismos y de la propia institución escolar (Rivas, 1986).
- Los profesores conocen en profundidad su materia y son entusiastas (Osborne et al., 2003).
- Los alumnos perciben que el profesor aprueba y anima el pensamiento independiente y desea una comprensión profunda de los conceptos científicos (Nolen, 2003, p. 363).

- Se siguen de cerca los progresos de los alumnos, proporcionando retroalimentación continua sobre los mismos (Black y Harrison, 2000).
- Hay un clima escolar ordenado, caracterizado por la existencia de un proyecto de Centro que incluye unos objetivos básicos, bien definidos y alcanzables, sobre los que concentrar los esfuerzos de la comunidad escolar.
- Se practica una estructuración docente que permite mayor tiempo a los alumnos para la realización de actividades de síntesis, recapitulaciones, consolidación y dominio de lo trabajado (Koch, 2001; Hand y Prain, 2002; Prain et al., 2003; Osborne et al., 2003).
- Los profesores se encuentran implicados en tareas de innovación e investigación educativas (Rivas, 1986).

En particular, el sistema de evaluación empleado tiene una clara influencia en las actitudes de profesores y alumnos, por lo que se le ha prestado una especial atención dentro del modelo de enseñanza por investigación (Alonso et al., 1992a, 1992b; Martínez Torregrosa et al., 1999). Efectivamente, hoy se reconoce ampliamente que no importan cuáles sean los objetivos planteados a los alumnos: si la evaluación sigue favoreciendo el aprendizaje repetitivo, sus esfuerzos se orientarán en ese sentido. Se trata de un tema fundamental, al que hasta hace poco no se le había prestado la atención adecuada. Hoy día, la coherencia necesaria entre las innovaciones que se ponen en práctica y el sistema de evaluación está haciendo que se le preste a este aspecto una atención renovada, desde posiciones muy distintas a los clásicos estudios de docimología. Como señalan Black y Harrison (2000) la incorporación de una evaluación formativa a las aulas de ciencias es el aspecto que produce mayores mejoras en el aprendizaje, especialmente de los alumnos con más dificultades iniciales.

En definitiva se trata de conseguir un ambiente de aula en el que el aprendizaje y la enseñanza se desarrolle en un contexto problematizado, hipotético-deductivo, en el que los alumnos –trabajando en pequeños grupos sobre la secuencia de actividades propuesta por el profesor- tengan oportunidades para pensar, hacer, debatir, argumentar y recapitular. Un ambiente en el que la evaluación esté concebida como un instrumento para ayudar a aprender y enseñar mejor, y que se extienda a todo los aspectos que se consideran importantes en la enseñanza actual de las ciencias.

CAPÍTULO 2

PRESENTACIÓN GENERAL DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE UN TEMA DESDE EL MODELO DE ENSEÑANZA POR INVESTIGACIÓN ORIENTADA.

Si, como hemos intentado fundamentar, el aprendizaje sólido de los conocimientos científicos implica el desarrollo simultáneo de procesos de producción y aceptación típicos del trabajo científico, y de la implicación axiológica necesaria para que esa tarea tan exigente pueda llevarse a cabo, la planificación de un curso y de los temas en él desarrollados no puede responder simplemente a la lógica que expresa la secuencia "¿qué objetivos deben lograr los estudiantes?, ¿qué contenidos impartir?, ¿cómo ha de ser el examen para constatar el aprendizaje logrado?". Como hemos señalado, lo que caracteriza el proceso de producción y aceptación de conocimientos científicos es que se desarrolla en un contexto problematizado, donde se abordan situaciones problemáticas de interés y se avanza de una manera tentativa hacia posibles soluciones (Martínez Torregrosa, et al., 1993; Martínez Torregrosa et al. 1994; Gil, Furió et al, 1999; Verdú et al, 2002; Martínez Torregrosa et al., 2003; Cobb, 2003). Por tanto, la planificación de los temas y cursos dentro de nuestro modelo obliga a formularse las preguntas siguientes: "¿cómo problematizar el curso y cada uno de los temas incluidos para favorecer el aprendizaje con sentido?, ¿cómo integrar el aprendizaje conceptual, los trabajos prácticos y la resolución de problemas de "papel y lápiz" en una estructura problematizada más amplia? y ¿cómo evaluar para impulsar y orientar dicho aprendizaje?"

Hasta ahora, las investigaciones realizadas dentro del modelo de enseñanza y aprendizaje como investigación dirigida han mostrado las carencias y limitaciones con que la enseñanza habitual afronta los trabajos prácticos (Gil y Payá, 1988; Gil et al., 1991; Payá, 1991), la resolución de problemas (Gil et al., 1988; Garrett et al., 1990; Gil y Pessoa, 1994), la introducción de conceptos y modelos (Carrascosa, 1987; Gil et al., 1989; Verdú, 1990) y la evaluación (Alonso et al., 1992a, 1992b; Martínez Torregrosa et al., 1999) y han elaborado propuestas de

transformación para favorecer el cambio conceptual, metodológico y la implicación actitudinal. Ahora nos planteamos cómo modificar en el mismo sentido todo un tema o, incluso, un curso o un gran fragmento del mismo, integrando el aprendizaje de conceptos y modelos y su desarrollo (en terminología convencional los cuatro elementos: la "teoría", las "prácticas", los "problemas" y la evaluación). Esto exige, como punto de partida, cuestionar la distinción clásica entre estos cuatro "elementos" de un tema que han seguido siendo contemplados, en general, como elementos autónomos, y tanto las investigaciones como las propuestas de innovación derivadas continúan abordando aisladamente *cada uno* de estos aspectos (Gabel, 1994).

La orientación del aprendizaje como una investigación dirigida priva de sentido a esta separación que, conviene notar, *no guarda paralelismo alguno con la actividad científica real*. En la medida en que pretendamos proporcionar a los estudiantes una visión correcta del trabajo científico, el tratamiento por separado de aspectos ("la teoría", "las prácticas" y "los problemas") que en la actividad científica aparecen absolutamente imbricados, se convierte en un factor distorsionante, es decir, en un obstáculo. Hemos de reconocer, sin embargo, que esta consideración elemental no ha bastado para rechazar claramente esta compartimentación de la actividad escolar. Ello constituye, pensamos, un ejemplo más del peso de tradiciones asumidas acríticamente. Afortunadamente, los avances realizados por la investigación e innovación didácticas, en cada uno de los tres campos, han ido mostrando convergencias que reclaman su integración en un único proceso.

Esta integración está apoyada en la epistemología de la ciencia (Chalmers, 1984), donde se muestra que la producción científica no puede ceñirse a un método traducible a una serie de pasos cuyo seguimiento produzca un conocimiento verdadero: la epistemología de la ciencia no tiene sólo un componente metodológico, sino también un componente interpretativo (Monk y Osborne, 1997) que hace que, aunque a nivel fundamental exista un acuerdo sobre el componente metodológico (planteamiento de problemas, formulación de hipótesis que puedan ser sometidas a prueba, elaboración de diseños experimentales fiables, métodos de replicación y análisis de resultados ...), no baste con "la sintaxis" (las reglas para conocer), sino que sea necesaria "la semántica" (el significado del conocer).

2.1 Estructura básica de un tema

Presentamos en el cuadro 2.1 las características que deben de tener los temas según una enseñanza problematizada por investigación orientada.

Cuadro 2.1. Características de la estructura de los temas en una enseñanza (problematizada) por investigación dirigida

- 1. Plantear**, en el inicio del tema, **situaciones problemáticas** que –inspirándose en las que desde el punto de vista histórico y/o epistemológico, están en el origen de los conocimientos implicados- sirvan de punto de partida para el trabajo de los estudiantes. Por supuesto, debe prestarse atención explícita a que los alumnos se apropien del o de los problemas, a que tomen conciencia de su interés, como condición necesaria para su implicación en la tarea.
- 2. Organizar el índice del tema/problema de forma que responda a una posible estrategia para avanzar en su solución**, es decir, a un “plan de investigación”. En este sentido, la estructura o secuencia de apartados del tema debe estar ligada intencional y lógicamente con la problematización inicial. La estructura de los temas no está guiada, por tanto, como es habitual, por los conceptos fundamentales, sino por un intento de plantear y avanzar en problemas fundamentales. De este modo, los conceptos son introducidos funcionalmente como parte del proceso de tratamiento de los problemas planteados y de unificación de campos inicialmente inconexos. Si el conocimiento científico es fruto de un intento de responder preguntas, ¿por qué pretender que los alumnos aprendan respuestas sin conocer las preguntas a las que responden? (Otero 1985).
- 3.** En este contexto de resolución de problemas, **los conceptos y modelos se introducen, por alumnos y profesor, como tentativas, como hipótesis fundadas**, que deben ser puestas a prueba, tanto a través de su capacidad predictiva en situaciones de laboratorio como en el aborde de situaciones problemáticas abiertas concretas (problemas de lápiz y papel), así como en la elaboración de utensilios o prototipos, la identificación-predicción de nuevos hechos y problemas, o mediante la coherencia (con la globalidad de los conocimientos ya establecidos por investigaciones precedentes) y universalidad (capacidad para unir campos separados). La realización de ejercicios, los trabajos prácticos, y la resolución de problemas son situaciones de puesta a prueba de los conceptos, hipótesis y modelos inventados

(Martínez Torregrosa, et al., 1993; Gil, Furió et al, 1999).

4. La evaluación es concebida como un instrumento de ayuda para el avance en la resolución de los problemas planteados y de "recapitulación en la empresa científica". Este papel se ve facilitado por la identificación de ideas o conocimientos que suponen/supusieron pasos en la solución a los problemas planteados y de los obstáculos que pueden dificultar/dificultan dichos pasos o "metas parciales". Dicha identificación permite establecer un posible itinerario de aprendizaje y otro de posibles obstáculos asociados, y planificar las actividades de evaluación/aprendizaje que permitan superar los obstáculos e impulsar el aprendizaje.

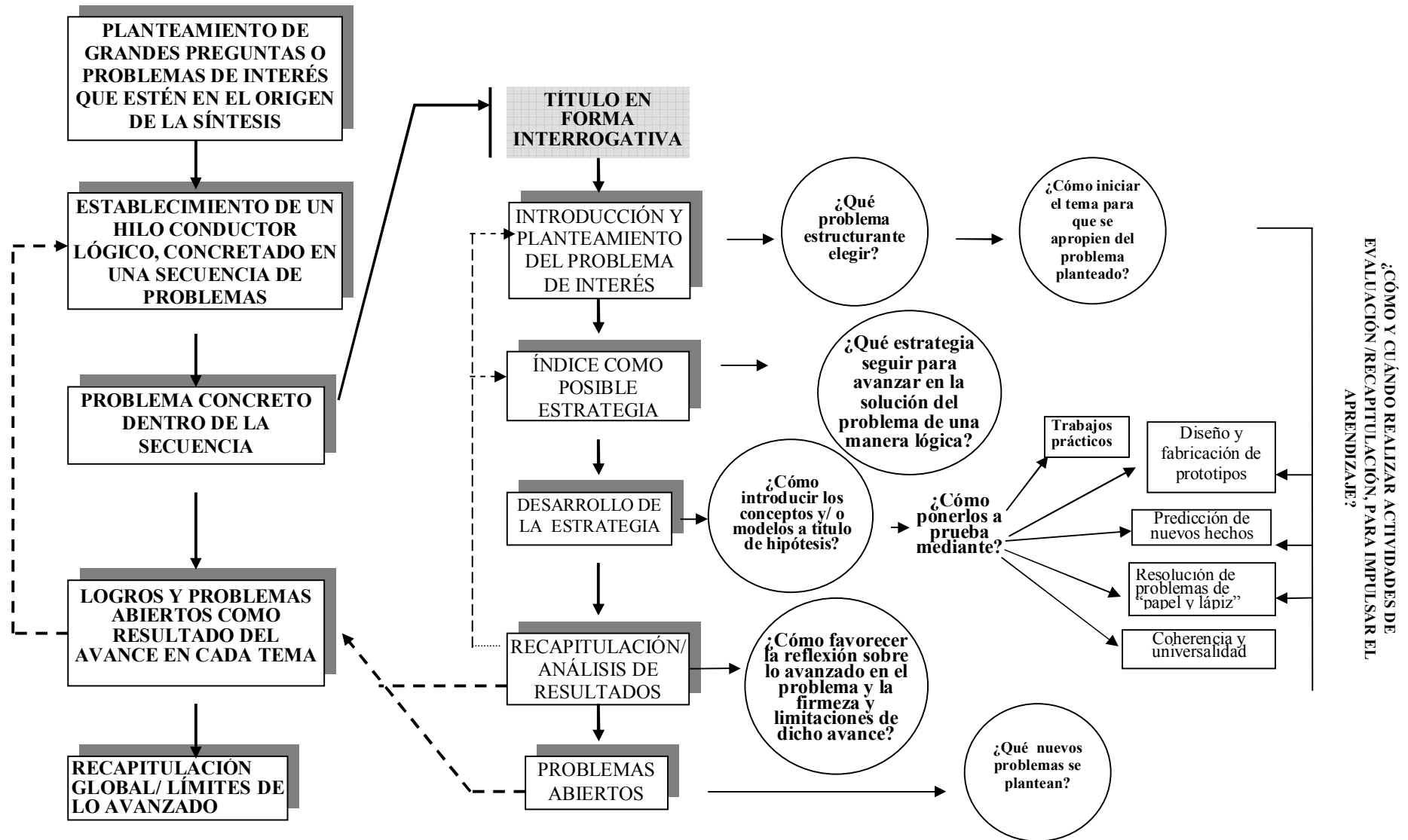
La estructura problematizada favorece, de modo natural, la realización de recapitulaciones periódicas (recapitulaciones problematizadas) sobre lo que se ha avanzado en la solución al problema planteado, los obstáculos superados y lo que queda por hacer, prestando así especial atención a la regulación y orientación de los alumnos en el desarrollo de la investigación, y facilitando la elaboración de una recapitulación final del trabajo realizado ("recapitulación problematizada", con características similares a un informe científico) y otras actividades de síntesis (mapas conceptuales, cuadros comparativos ...).

5. Esta estructura "gruesa" debe ser concretada en una secuencia de actividades, en un plan de investigación dirigida o programa-guía (Furió y Gil, 1978), para su propuesta en el aula a los alumnos (organizados en pequeños grupos) que, con tiempo para pensar, argumentar y hacer, junto con el profesor, avanzan en el problema planteado, en un ambiente que favorezca simultáneamente la implicación afectiva y la racionalidad científica.

Todo ello constituye una forma de trabajo en el aula que favorece la explicitación de las propias ideas y su confrontación con las de otros, en un ambiente hipotético-deductivo rico en episodios de argumentación y justificación, tan importantes para el aprendizaje de conocimientos científicos (Newton et al., 1999; Driver et al., 2000). Se pretende así, en definitiva, crear un ambiente que favorezca simultáneamente la implicación afectiva y la racionalidad científica de todos los afectados (profesor y alumnos) en la resolución de los problemas. Por supuesto, ello exige una cuidadosa planificación de la tarea por el profesor, mediante programas concretos de investigación dirigida (programas de actividades debidamente engarzadas) y exige también dejar tiempo en el aula para que los alumnos piensen, argumenten y refuten. En el **gráfico 2.1** (Martínez Torregrosa et al. 2002) se representa el proceso de toma de decisiones

para elaborar la estructura problematizada de un tema, dentro de un curso, o una gran síntesis.

Gráfico 2.1. estructura básica de un tema dentro de una gran síntesis y preguntas que se plantean (Martínez Torregrosa et al., 2002)



2.2 Preguntas que se plantean para concretar dicha estructura

Para responder a estas preguntas, el equipo de profesores/investigadores necesita disponer de un conocimiento en profundidad de la materia a tratar, entendiendo por ello un conocimiento problematizado, consciente de cuáles fueron los problemas que están en el origen de los conocimientos en un campo determinado, cómo se ha llegado hasta ahí, cuáles fueron las dificultades que hubo que superar y las ideas que permitieron avanzar, el contexto social y las repercusiones tecnológicas que tuvieron y tienen los estudios en dicho campo, etc.

Adquirir dicha formación requiere un estudio histórico y epistemológico del campo a tratar, pero -y esto es **fundamental**- realizado con "*intencionalidad didáctica*" y conocimiento práctico sobre los alumnos y el aula, para que sea útil y factible para enseñar y aprender. Por ello, hemos encontrado útil establecer una serie de preguntas que guían desde el primer momento este estudio histórico-epistemológico para tomar decisiones que permitan concretar la estructura problematizada.

Presentamos en primer lugar estas preguntas (**cuadro 2.2**) para dedicar el resto de esta primera parte a presentar algunas de las respuestas que hemos elaborado en el desarrollo de esta investigación y a someter a prueba su relevancia potencial para la mejora de la enseñanza del tema que nos ocupa.

Cuadro 2.2. Preguntas que guían el estudio histórico y epistemológico para adquirir un conocimiento problematizado de la materia a tratar, con una finalidad didáctica, que permita tomar decisiones sobre los aspectos señalados en el gráfico 2.1

SOBRE EL PROBLEMA ESTRUCTURANTE Y LO QUE SE DEBE PRETENDER CONSEGUIR

1. **¿Qué problemas están en el origen de las teorías que deseamos pasen a formar parte del bagaje de nuestros alumnos? ¿Qué nos gustaría que nuestros alumnos hubieran aprendido – globalmente- sobre este problema?**

Esto debe permitir identificar el **objetivo clave** –aquello que nos gustaría que los alumnos supieran como fruto de la enseñanza en el campo seleccionado- y posibles problemas “estructurantes”. El objetivo/ clave a conseguir debe tener suficiente poder explicativo para que tenga relevancia su estudio.

2. **¿Cuál o cuáles serían más adecuados para iniciar el proceso de investigación?**

No tiene por qué ser necesariamente el mismo que fue históricamente (incluso, a veces, puede no ser deseable). La selección está orientada por la intención de que sea adecuado para organizar el plan de investigación y la actividad del aula en torno a él, en el curso de que se trate. La respuesta a esta cuestión debe ser considerada una hipótesis que sólo será aceptada tras el seguimiento de la puesta en práctica en el aula.

SOBRE LAS METAS PARCIALES Y LOS OBSTÁCULOS PREVISIBLES PARA ALCANZARLAS

3. **¿Qué ideas o conocimientos suponen/ supusieron avances, pasos necesarios, para solucionar el problema, para alcanzar el objetivo/ clave? ¿Cuáles son/ fueron los obstáculos más importantes para conseguir dichas ideas?**

Este estudio debe permitir identificar objetivos más concretos, o **metas parciales**, y posibles **obstáculos asociados** –a los que necesariamente habrá que prestar atención para avanzar en el problema-. Se trata de seleccionar aquellos conocimientos que necesariamente deben ser adquiridos si se desea conseguir el objetivo/ clave, la solución al problema estructurante. Se trata, también, de tomar conciencia de las dificultades con que se encontraron equipos de científicos y de las ideas, pruebas, argumentos y contra-argumentos, condicionamientos técnicos y sociales, que hicieron posible, u obstaculizaron, el avance, etc.

4. **¿Qué ideas, qué razonamientos, pueden tener los alumnos sobre los aspectos anteriores que supongan obstáculos para el aprendizaje y que, por tanto, deban ser tomados en consideración? ¿Qué otros aspectos necesitan saber y saber hacer para que el avance sea posible?**

Aunque el estudio histórico y epistemológico permite proponer “metas parciales”, no todos los obstáculos de aprendizaje son históricos. La confirmación de en qué medida los aspectos sobre los que se ha puesto énfasis son relevantes desde el punto de vista didáctico, y cuáles son las dificultades que van a tener los alumnos para conseguirlos, es una cuestión de naturaleza empírica que debe ser objeto de investigación. Es necesario, pues, conocer las ideas y razonamientos de los alumnos sobre dichas “metas parciales” para planificar adecuadamente la secuencia de actividades (para asegurarse de suministrar oportunidades para que dichas ideas y razonamientos sean tratados).

Cuadro2.2 (Continuación). Preguntas que guían el estudio histórico y epistemológico para adquirir un conocimiento problematizado de la materia a tratar, con una finalidad didáctica, que permita tomar decisiones sobre los aspectos señalados en el gráfico 2.1

Con este fin, es necesaria la realización de investigaciones empíricas, antes de poner en práctica el tema, para averiguar las ideas y razonamientos de los alumnos **sobre las metas parciales**, identificando posibles obstáculos. Esta investigación está orientada por los hallazgos de la investigación didáctica sobre ideas y razonamientos espontáneos de los alumnos y por la previsible semejanza entre las barreras históricas más importantes y las ideas espontáneas más arraigadas [probada reiteradamente en numerosos campos, Wandersee et al., (1994)]. En ocasiones, el conocimiento “práctico” del equipo de profesores y su conocimiento sobre la literatura didáctica hace parecer innecesaria la realización de este estudio empírico. No obstante, tiene la ventaja de unir la investigación sobre concepciones y razonamientos espontáneos de los alumnos al desarrollo de secuencias de instrucción, lo que evita estudios desligados del aula y proporciona, además, un conocimiento muy útil para elaborar la “**estructura fina**” del tema: actividades concretas (de desarrollo y/o evaluación).

SOBRE QUÉ ESTRATEGIA O ÍNDICE SEGUIR Y CÓMO FAVORECER LA REVISIÓN DE LO AVANZADO AL DESARROLLARLA

5. ¿Qué estrategia (que se convertirá en el índice del tema) conviene proponer para avanzar en la solución a los problemas iniciales? ¿Cómo favorecer que los alumnos estén orientados?

Es muy importante que el equipo de profesores/ investigadores se autoimponga planificar una estrategia para avanzar en el problema estructurante (que se convertirá en el ÍNDICE del tema o en el HILO CONDUCTOR del curso) que responda a una lógica de investigación, a lo que sería racional hacer para avanzar en un problema que es objeto de investigación. Claro está que se trata de un campo conocido para ellos y que conocen los obstáculos y las llaves para superarlos (¡por eso pueden ayudar a que los alumnos aprendan!), no obstante deben procurar la creación de un ambiente genuinamente hipotético-deductivo, una estrategia ligada intencional y lógicamente al problema planteado. Se deben prever **recapitulaciones** escritas (¿cuál era el problema planteado? ¿cómo planificamos tratar de solucionarlo? ¿qué hemos avanzado? y ¿qué hemos tenido que superar para llegar hasta aquí? ¿qué vamos a hacer ahora?) asociándolas -al menos- a la finalización o comienzo de los grandes apartados de la estrategia.

SOBRE LA SECUENCIA DE ACTIVIDADES CONCRETAS Y EL SISTEMA DE EVALUACIÓN

6. ¿Qué plan concreto de investigación -programa-guía- proponer a los alumnos para desarrollar la estrategia propuesta? ¿Cómo planificar la evaluación para que se convierta en un instrumento que oriente e impulse la buena marcha de la investigación?

Dicho plan (la secuencia de actividades concretas que se van a proponer a los alumnos en el aula) y el sistema de evaluación concebido para impulsar el aprendizaje, constituyen la “estructura fina” del tema, y deberán ser considerados como una hipótesis hasta probar que con ellos se suministran las oportunidades adecuadas para aprender conocimientos científicos, poner en práctica la epistemología científica (dentro de lo posible en el contexto escolar) y aprender sobre la naturaleza de la ciencia [aspectos básicos de la “alfabetización científica” (Hodson, 1992)].

Tras el análisis realizado, es conveniente resaltar la estrecha relación que habrá entre el problema estructurante y el objetivo clave por un lado y entre la estrategia o índice, las metas parciales y las recapitulaciones por otro. Consideramos, también, conveniente pensar en estos elementos como la "estructura gruesa o de paso largo" de la planificación. La secuencia concreta de actividades en cada apartado y el sistema de evaluación (excepto las recapitulaciones) podría considerarse la "estructura fina o de paso corto" de la planificación. Lógicamente debe abordarse antes la estructura gruesa que la fina, ya que un cambio en una decisión sobre la estructura gruesa afecta mucho más que un cambio en la estructura fina. No obstante esto no significa que en el proceso real de elaboración deba esperarse a tener una parte perfectamente acabada para poder empezar la otra.

En los capítulos siguientes de esta primera parte presentamos nuestras respuestas a las preguntas anteriores, poniendo énfasis en el estudio empírico de los obstáculos que tienen nuestros alumnos para aprender con comprensión la óptica geométrica elemental. Para ello empezaremos por clarificar hasta dónde queremos llegar, es decir, por seleccionar qué concepción o modelo sobre cómo se forman las imágenes deseamos que adquieran nuestros alumnos de secundaria y qué pasos o metas parciales son necesarios alcanzar para adquirir dicha concepción. Posteriormente identificaremos posibles obstáculos para la consecución de las metas parciales y presentaremos el estudio empírico que hemos realizado para confirmarlos. Por último, presentamos una propuesta de estructura problematizada para el tema y la secuencia concreta de actividades que hemos elaborado.

CAPÍTULO 3

TOMA DE DECISIONES PARA ELABORAR LA ESTRUCTURA PROBLEMATIZADA DE UN TEMA DE ÓPTICA GEOMÉTRICA EN LA ESO

Una vez planteado de una manera sistemática el proceso de planificación de la estructura problematizada de temas y cursos (lo que no significa que consista en una secuencia de fases en la que no se pasa a una nueva sin tener perfectamente acabada la anterior; ni que no haya lugar para la creatividad), presentamos nuestras respuestas a las preguntas:

1. ¿Cuál es el problema que está en el origen de los conocimientos que queremos que aprendan nuestros alumnos y que puede ser adecuado para organizar un proceso de investigación dirigida a partir de él?
2. ¿Cuáles son/fueron las ideas que contribuyen/contribuyeron a solucionar el problema y cuáles los obstáculos que hay/hubo que superar? ¿Qué dificultades u obstáculos pueden tener nuestros alumnos para apropiarse de las ideas necesarias para avanzar en el problema?
3. ¿Qué estrategia proponer para avanzar en la solución del problema planteado?

Dichas respuestas se acompañan de un estudio empírico diseñado con un triple fin: valorar en qué medida los obstáculos previstos tienen relevancia didáctica (su existencia y persistencia), utilizar la información obtenida sobre dichos obstáculos para proponer actividades adecuadas en la secuencia de enseñanza para que surjan, y, por último, servir de referencia para probar la eficacia de propuestas alternativas.

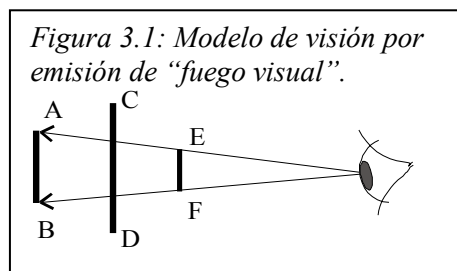
Como hemos dicho, comenzamos por realizar un estudio histórico de las ideas más relevantes del campo de la óptica geométrica, un estudio con *intencionalidad didáctica* (Saltiel y Viennot, 1985) sin necesidad de seguir un itinerario fiel al desarrollo histórico, para intentar buscar respuestas a las preguntas antes planteadas

3.1 Génesis y evolución de las ideas sobre la "luz y la visión"

3.1.1 El modelo de visión por emisión del "fuego visual"

El estudio de los primeros filósofos estaba focalizado en la explicación de la visión y no en el estudio de la luz en sí misma. Hace 2.500 años los filósofos pitagóricos creían en la emanación desde el ojo de un "fuego" invisible que se proyectaba como rayos visuales sobre los objetos provocando la visión (Gil del Río, 1984; Mihás y Andreadis, 2005). **Euclides** y **Arquímedes** desarrollaron a partir de estas ideas un sistema de representación

geométrico basado en el trazado de rayos visuales (Solís y Sellés, 2005). De sus escritos se desprende que estos rayos tienen entidad real y son trazados en línea recta desde el ojo del observador. Con estas ideas elaboraron diagramas para explicar el



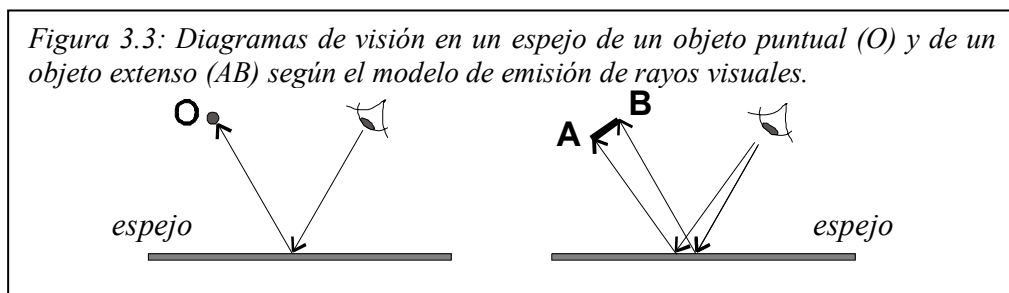
diferente tamaño de los objetos y la perspectiva como el de la figura 3.1, donde en función de la apertura de los rayos visuales se explica que el objeto EF sea visto de igual tamaño que AB, o que el objeto CD sea visto de mayor tamaño que los otros:

Este "fuego visual" representado por los rayos emanados del ojo es de distinta naturaleza que la luz pero es el que permite la visión. A la luz emitida por las fuentes primarias también se les aplicaba estas propiedades geométricas de forma que se podía explicar la producción de sombras al interponer cuerpos opacos entre una fuente puntual y una pantalla (fig 3.2).



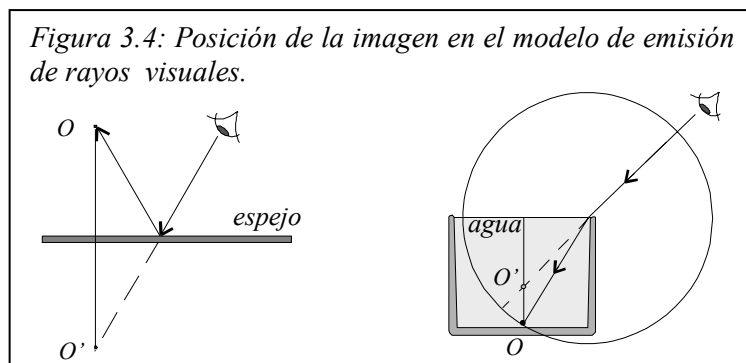
La visión indirecta (catóptrica) por reflexión se puede explicar a partir de esquemas similares con emisión de rayos procedentes del ojo. Estos esquemas, en donde se igualan los ángulos de incidencia y reflexión, parecen estar basados en algunas observaciones: se cita por ejemplo, que con un pequeño espejo en el suelo, dos observadores pueden verse respectivamente desde ciertas posiciones mirando hacia él. En esa situación se debe cumplir que los respectivos ángulos de incidencia y reflexión son iguales (Fig. 3.3). Parece que Herón de Alejandría

explicaba la igualdad de estos ángulos por la propiedad de los rayos de seguir el camino más corto (Ferraz, 1974,), un principio de economía, antecedente del principio de Fermat, apoyado por el razonamiento de que cuando se ve un objeto por visión directa, es la línea recta, la más corta, la trazada para representar los rayos visuales. Sin embargo, con este esquema no se puede predecir la posición donde se ve la imagen, ya que para ello es necesario trazar algunas líneas auxiliares. Por otro lado, este modelo denota una concepción egocéntrica de la visión en el que los rayos tienen unas direcciones preferenciales, las que unen el ojo con el objeto visto.



Los filósofos detractores de esta corriente de pensamiento le achacaban que no se pudiera explicar por qué no se ve en la oscuridad. No obstante, para probar la veracidad de los rayos visuales, Heliodoro de Larisa afirmaba que algunos animales pueden ver en la oscuridad y que, en ella, los ojos de los animales resplandecen como el fuego (Ferraz 1974). Estos argumentos ponen de manifiesto la ausencia de observaciones en oscuridad total lo que parece ser una barrera para poder enfrentarse a las teorías de emisión ocular por vía empírica.

Partidarios de esta teoría como **Ptolomeo** (Iizuka 1983; Dedes, 2005)), utilizando la emisión de rayos visuales, algunas líneas auxiliares (como las prolongaciones de los rayos) y líneas empíricas de carácter observacional, como la línea OO' , desarrollaron este sistema de representación para explicar la posición de las imágenes que se ven al mirar a los espejos e, incluso, al mirar los objetos sumergidos en el agua (Fig 3.4).

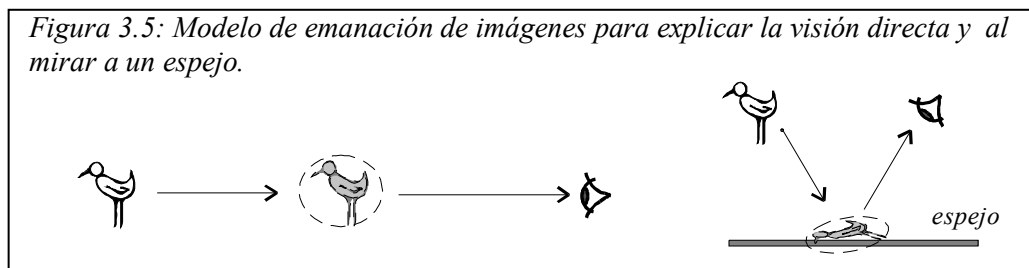


La línea OO' , la que sirve para localizar la posición de la imagen en la visión indirecta, no está justificada a partir de la emisión de rayos visuales por lo que es una hipótesis *ad hoc* que resuelve el problema. Algunos autores utilizan explicaciones del tipo "es la posición natural de la imagen".

Según esta concepción, tanto los rayos visuales como los rayos solares toman el color "propio de las cosas", así, si los rayos solares atraviesan una nube roja al amanecer o al atardecer, aparecerán rojizos en la tierra; del mismo modo se ven las cosas con el color del filtro a través del cual se mira. Según esto, en esta concepción, el color es una cualidad que depende únicamente del objeto (Sanz 1993), y tanto los rayos visuales como los solares se impregnan de él, como si se tratara de objetos materiales también

3.1.2 El modelo de visión por emanación de imágenes

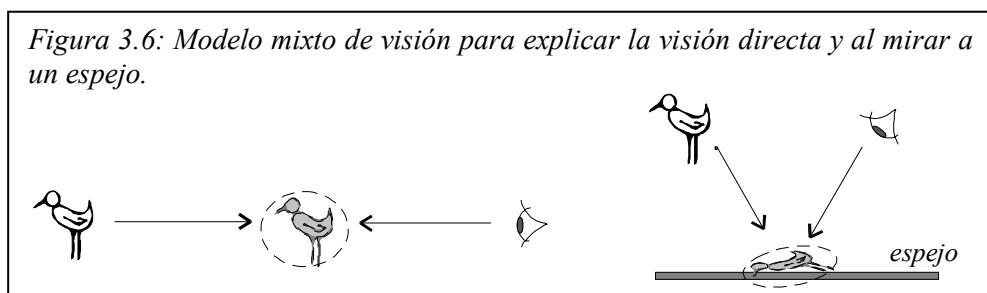
Demócrito y los atomistas pensaban que de los objetos emanan sutiles capas de átomos que forman un simulacro del objeto, la "eidola", que es una imagen tenue desprendida de su superficie que "vuela" hasta los órganos de la vista para provocar la visión (Mason, 1985; Dedes, 2005)). Para los defensores de esta corriente de pensamiento, la luz, los simulacros y el color son cosas distintas. El orden en el que se disponían los "átomos" en esas imágenes se utiliza para explicar las diferencias de color y la luz es la que hace posible el tránsito de los simulacros a través de aire. Es decir, el color, aunque con una interpretación diferente a la del fuego visual, es una característica de los objetos sin relación con la luz. En esta concepción de desprendimiento de imágenes, la perspectiva es un fenómeno que no queda suficientemente claro ya que no desarrolla un esquema de representación geométrico, ni tampoco explica cómo caben esos simulacros en el ojo del observador. Sin embargo, la reflexión se explicaba según una "ley natural" por la cual el rebote de las cosas se produce con ángulos iguales (Fig. 3.5).



Los detractores de esta teoría le achacaban que no podía explicar cómo caben los simulacros de los objetos grandes en la pupila, o lo que ocurre cuando se cruzan los simulacros en el aire.

3.1.3 El modelo mixto de visión

Platón propuso un mecanismo mixto para la visión en el que se superaban algunas de las dificultades de las teorías anteriores. En presencia de luz se produce una emanación luminosa (o "fuego") de los cuerpos observados (los simulacros) y su encuentro en el espacio con el fuego visual emanado por el ojo a través de la pupila produce la visión por la equivalencia de los dos fuegos. Por eso en la oscuridad se deja de ver aunque salga el fuego interior de los ojos. Platón hace consideraciones geométricas del proceso visual al afirmar que éste se produce mejor en dirección rectilínea, ya que así la unión de ambos fuegos se hace en "condiciones adecuadas" (Gil del Río 1984). Algunos filósofos que mantienen una concepción mixta explican la visión indirecta suponiendo que la imagen o simulacro queda impreso en el espejo y son los rayos visuales los que la alcanzan para hacer posible la visión. (Fig 3.6) Este esquema, sin embargo, no puede explicar el hecho de que no sea posible la visión por reflexión desde algunas posiciones del observador, ni que la imagen parezca situarse detrás del espejo.



Platón tiene también una teoría sobre los colores aunque el texto que aparece en el "Timeo" es oscuro e impreciso. Para este filósofo el color es una llama que dimana de los cuerpos y lleva partículas de tamaño distinto a la vista para producir las distintas sensaciones cromáticas. También expone una teoría de combinatoria cromática a partir de cuatro colores básicos: rojo, brillante, blanco y negro. La mezcla de distintas cantidades de estos permite obtener otros. Así, por ejemplo, a partir de la mezcla de rojo y brillante se obtiene el amarillo; a partir de blanco más negro se obtiene el gris, etc. Estas mezclas pueden estar apoyadas en datos empíricos y no se justifican lógicamente en su teoría del

tamaño de las partículas. A este respecto, algunas citas señalan una concepción de carácter teológico: "sólo un dios sabe cómo se pueden mezclar en un todo, para disociarlos a continuación, elementos diversos, y sólo él es capaz de hacerlo" (Ferraz 1974, pag. 15). En resumen, aunque en un primer momento parece relacionar los colores con la luz al considerarlos partículas que emanan de los cuerpos, análogamente al "fuego" necesario para la visión, el análisis de las mezclas cromáticas sugiere una concepción en la que el color es una cualidad de los cuerpos sin relación con la luz.

3.1.4 Crítica aristotélica a los modelos de visión anteriores

La aportación de **Aristóteles** al campo de la óptica se centró, al contrario que en otros campos de la filosofía natural, en la crítica a las teorías de otros filósofos y su grado de elaboración fue escaso. Así, mientras el sistema de representación geométrico de los anteriores filósofos permitía realizar alguna predicción cuantitativa (tamaños de los objetos, perspectiva, posición de la imagen en un espejo,...), las nociones aristotélicas son de un nivel de generalidad tal que no permiten dar cuenta de una multitud de detalles, o como dice Ferraz (1974, pag. 18) "pretenden explicar a un nivel tan profundo que no explican realmente nada y quedan, paradójicamente, en una superficialidad pasmosa".

En los escritos recogidos en *Parva Naturalia* (Aristóteles, edición de 1993), Aristóteles defiende que la sensación se produce por contacto de dos "entes": el ojo, órgano que provoca la visión, y el objeto. Aunque sus escritos son confusos y difíciles de interpretar, parece deducirse que el "diáfano", el espacio entre el ojo y el objeto, se mueve y es ese movimiento el que conecta al objeto y al ojo para producir la visión. Cuando admite que se pueda ver en la oscuridad, introduce de forma confusa la necesidad del movimiento para que se produzca la visión: "*... los cuerpos brillan en la oscuridad sin producir luz, pero este fenómeno se produce cuando el ojo está en movimiento. La rapidez del movimiento hace que el que ve y lo que es visto parezcan diferentes. Es por lo que también este fenómeno no se produce si no hay rapidez y, al mismo tiempo, oscuridad, pues lo que es liso brilla naturalmente en la oscuridad*".

En base a esta posición, critica la concepción del fuego visual argumentando que, si ésta fuera la causa de la visión, sería visible el ojo a sí mismo. Respecto a la teoría de Demócrito afirma que no resulta razonable ya que la vista no reside en

la imagen sino en el que ve y se pregunta *¿por qué sólo el ojo ve y ninguna de las otras partes del cuerpo donde también llega la imagen?* También ataca la teoría de Platón cuando afirma que si la visión se produce por la combinación del fuego salido del ojo con la imagen salida de los objetos, a una cierta distancia, sería preferible que se combinara con el ojo desde el principio, *"pero esto no deja de ser una ingenuidad"*. Además, si la luz del Sol acompaña a su imagen y tiene movimiento *¿por qué no se nota el tiempo que tarda, al amanecer, en recorrer de oriente a occidente?*

Para Aristóteles la luz es "el acto" del diáfano (el transparente, el aire), en la oscuridad el diáfano está "en potencia". La visión se produce porque el color pone en movimiento lo diáfano que hace de medio conector (es el intermediario) entre el objeto visto y el ojo del observador (Dedes, 2005). Apoyándose en esto se ha mencionado que esta idea es precursora de la teoría ondulatoria de la luz, pero como Ferraz opina (1974, pag. 16), Aristóteles no distingue entre cambio y movimiento, por lo que su teoría de la visión está alejada de cualquier hipótesis física moderna. Con respecto a su explicación del color, los diferentes colores son, para él, los distintos grados de combinación entre luz y oscuridad.

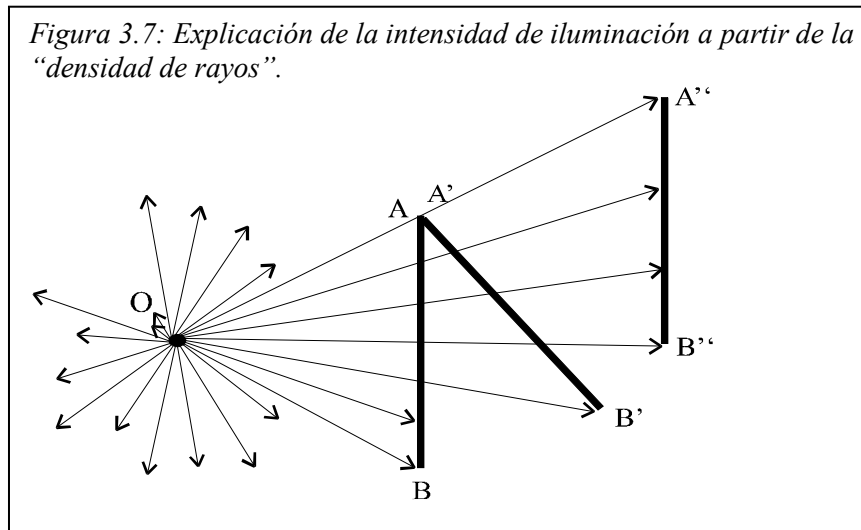
En general, para los filósofos griegos, la luz es una cualidad del espacio que hace posible la visión y no una emanación de los cuerpos que son vistos, por lo que no es considerada una entidad física que pueda ser objeto de estudio en sí misma. Esta concepción de la luz y las ideas sobre la visión de los filósofos citados anteriormente, con su gran influencia intelectual, predominaron en los centros de conocimiento de la Europa medieval.

3.1.5 El modelo de visión por recepción de rayos de luz

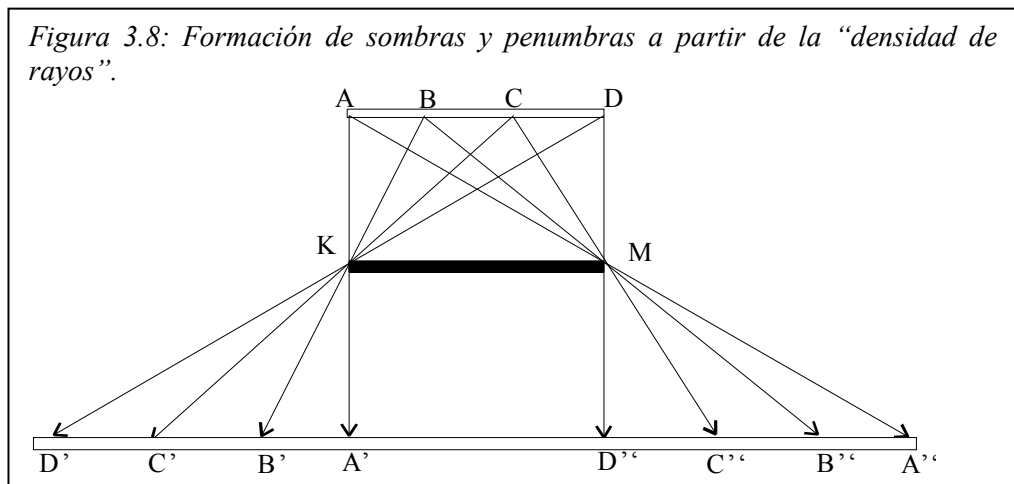
El científico árabe **Alhazen**, alrededor del año 1.000, descartó la idea de los rayos visuales y de los simulacros propuestos por los filósofos griegos. Para él la luz es una entidad independiente en el espacio separada de la fuente, del objeto y del ojo y es el agente capaz de impresionar los órganos visuales (Solís y Sellés, 2005). Para mostrar la veracidad de esa afirmación señaló que se siente dolor en los ojos cuando se mira al sol tanto directamente como a través de un espejo donde se refleja. También si se mira durante un rato superficies coloreadas y luego se mira hacia un lugar oscuro o blanco, se ve el color de aquellas. Para Alhazen la luz no es la causa de la diafaneidad sino el agente físico de la visión

(Ferraz, 1984, pag. 66). Reconoció que el grado de oscuridad y color de un objeto cambia en concordancia con la iluminación, y criticó la emanación de los rayos visuales ya que, "si éstos fueran responsables de la visión, entonces la visión no debería estar influida por condiciones externas". Así pues, para este filósofo, los objetos iluminados son considerados fuentes secundarias de luz y apoya esta idea con la experiencia: "al iluminar fuertemente una piedra coloreada se puede observar cómo su sombra sobre una pantalla blanca está igualmente coloreada". Por otro lado, inició una vía de simplificación al idealizar los objetos iluminados como conjuntos de puntos luminosos que emiten luz en todas las direcciones. Con esta hipótesis de radiación desde cada punto luminoso justifica las variaciones de intensidad luminosa según las direcciones espaciales de las superficies iluminadas.

En el siglo XVI, Francisco Maurolico, siguiendo las ideas de Alhazen, desarrolla el concepto de "densidad de rayos" en sus construcciones geométricas para explicar las diferencias de iluminación en las superficies (Fig. 3.7). Según este concepto la superficie AB está más intensamente iluminada que la A'B' y ésta más que la A''B''.



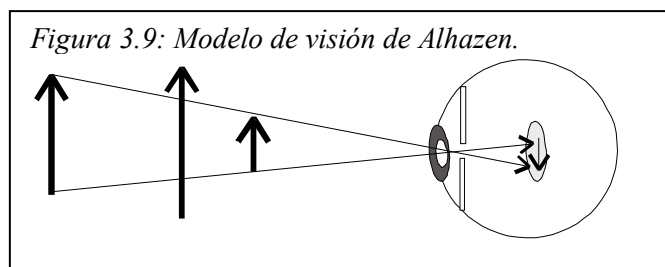
Con estas mismas ideas construyó diagramas (Fig 3.8) para explicar las sombras y los distintos grados de penumbra que se producen al intercalar un cuerpo opaco (KM) entre una fuente luminosa extensa (AD) y una pantalla (D'A'').



Si AD es una fuente luminosa extensa y KM un cuerpo opaco la zona de la pantalla A'D'' estará en sombra porque desde ningún punto luminoso de la fuente AD se pueden trazar rayos hasta esa zona. A'B' será una zona de penumbra porque sólo será iluminada por puntos de la fuente luminosa situados entre A y B, pero no por el resto. B'C' será una zona de penumbra menos oscura que la anterior porque está iluminada por puntos de la fuente luminosa situados entre A y C, etc. (Ferraz, 1974, pag. 120).

Para explicar el proceso de la visión, Alhazen, relacionó cada punto del objeto con un punto del ojo a partir de la emisión de rayos procedentes de cada punto del objeto. El ojo funcionaría como una cámara oscura en el que se forma una imagen en una pantalla (que para Alhazen era la primera cara del cristalino). Un único rayo procedente de cada punto del objeto entra en el ojo por el agujero de la pupila y forma un punto imagen en una pantalla. La colección de puntos imagen forma la imagen

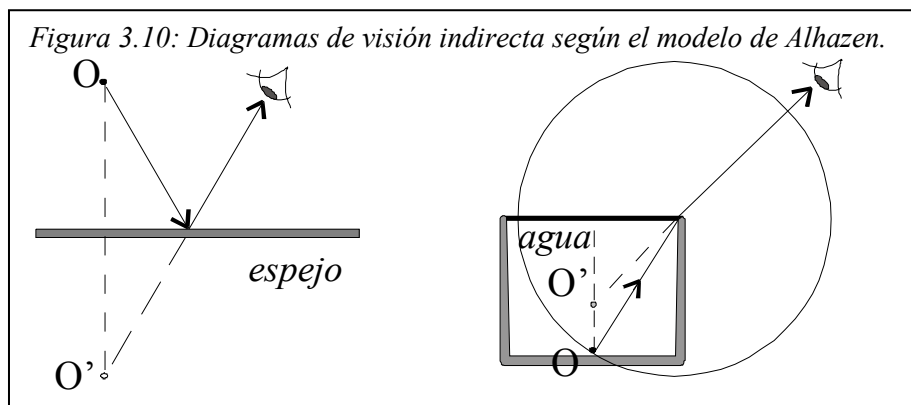
extensa que estará invertida (Fig 3.9). Como se ve, con este modelo de visión, cada rayo de luz, en su propagación, debe ser una especie de portador de pequeños trozos de la imagen que deposita en la pantalla donde incide. Esta concepción permite explicar, a partir del tamaño de la imagen, la visión de objetos de distinto tamaño o la perspectiva sin recurrir a la emisión del “fuego visual”.



No está muy claro si fue él o sus sucesores quienes construyeron un modelo de ojo similar a una cámara oscura como el que, posteriormente, también utilizó Leonardo da Vinci. Aunque el modelo era muy imperfecto, el proceso de analogía entre un instrumento óptico y el ojo humano tuvo un papel cognoscitivo histórico muy importante, ya que con ello la óptica comienza a dejar de ser una ciencia de la visión para convertirse en una ciencia de la luz (Tarásov, 1985,).

A partir de estas ideas se enfrentó a cómo podemos ver las imágenes al mirar a un espejo o por qué vemos los objetos sumergidos en el agua en distinta posición (Fig. 3.10). Propuso que el ángulo de refracción era proporcional al ángulo de incidencia, lo que supone una buena aproximación de la ley de la refracción para ángulos menores de 30° (Iizuka 1983).

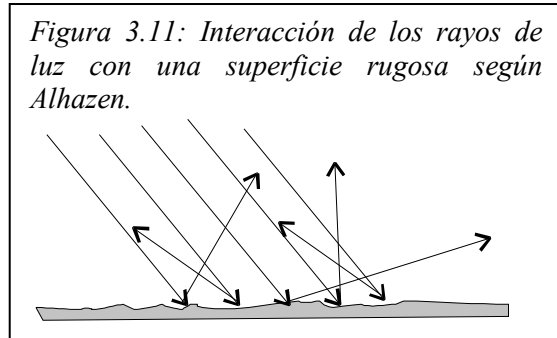
Si se supone que cada punto objeto puede emitir en todas las direcciones, estos diagramas permiten explicar que se pueda ver la imagen desde distintas posiciones del observador y, dependiendo del tamaño del espejo, que no se pueda ver desde otras. Además, respecto de la reflexión, se supera la idea de que la imagen está impresa en el espejo y los rayos visuales la alcanzan ya que, si así fuera, sería posible verla desde cualquier posición del observador.



A pesar de los avances que se manifiestan en estos diagramas, para localizar la posición donde se ve la imagen se trazan líneas auxiliares, como las punteadas en el esquema anterior, pero sigue siendo necesario el trazo de la línea OO' de carácter observacional ya que con el único rayo que entra en el ojo procedente del punto O no es posible localizar la posición de la imagen O' .

En la óptica de Alhazen se atribuye la reflexión sólo a las superficies pulidas, las superficies "ásperas" no reflejan la luz como los espejos, aunque eso no significa

que la luz quede retenida allí, ya que de ser así no veríamos los objetos. A esta luz por la cual vemos la denomina "luz secundaria". La superficie áspera (Fig. 3.11), con poros, no mantiene el orden topológico después de la reflexión, es decir, un haz de rayos paralelos después de incidir en una superficie áspera se dispersa y no refleja un haz de rayos paralelos como lo haría un espejo (Ferraz, 1974, pag. 79).



A pesar de todo, para Alhazen, la emanación de la luz es instantánea, la luz no es de naturaleza material y el color es una mera propiedad de los objetos que la luz hace visible.

En resumen, la concepción de la visión y de la imagen óptica de Alhazen, con avances evidentes sobre las teorías de los antiguos filósofos griegos, está fundamentada en la introducción de un conjunto de ideas novedosas respecto de los modelos anteriores, entre las que destacamos:

- Los objetos que vemos pasaron a ser considerados fuentes secundarias de luz.
- Las fuentes luminosas extensas fueron idealizadas como conjuntos de fuentes puntuales que emiten rayos en todas las direcciones. Estos rayos son trazos rectos de cuya geometría se pueden derivar consecuencias ópticas.
- El ojo humano fue modelizado como un instrumento óptico similar a una cámara oscura, con lo que la ciencia de la visión pasó a ser, también, 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, por tanto, podría ser objeto de estudio en sí misma.

Durante la Edad Media en la Europa cristiana se mantuvo el concepto de "ojo activo", cuya experiencia visual dependía del alma interna, lo cual implicaba que el ojo no era un instrumento óptico ni la luz una entidad independiente. Desde estas posiciones los filósofos naturales veían obstaculizada la investigación de, por ejemplo, los efectos de las lentes -que empezaban a conocerse- por sus

teorías sobre la luz y la visión. También se interponían obstáculos religiosos al avance de la óptica y a la fabricación de instrumentos ópticos. Frases contenidas en las Escrituras como: "*Dios es la luz...*", "*El primer día de la creación Dios dijo: hágase la luz; y la luz se hizo*", y "*el cuarto día creó el Sol, la Luna y las estrellas*", etc., suponían que tratar los problemas de la luz como un fenómeno puramente físico era como investigar la química de la Eucaristía (Boorstin 1994). En este sentido, Robert Grosseteste (S. XIII) emprendió un estudio experimental sobre la refracción en las lentes, que por entonces empezaban a utilizarse, porque creía que "*la luz era análoga a la iluminación divina*" (Bernal 1967)

3.1.6 El modelo de visión por recepción de haces de luz

Pese a su éxito inicial, la teoría de Alhazen no pudo explicar algunas observaciones con la cámara oscura, cada vez más utilizada en la Edad Media (Crombie, 1987). **Kepler**, con motivo de un eclipse de Sol que tuvo oportunidad de ver en el año 1600, se enfrentó con la observación de que ¡El diámetro del disco lunar medido en una cámara oscura aprovechando un eclipse de Sol era menor que cuando se medía en fase de Luna llena! El astrónomo Tycho Brahe, que se había apercebido del problema, ante las dificultades de encontrar una explicación óptica, llegó a formular una hipótesis de dilatación periódica de la Luna (Chevalley, 1980), sin cuestionar la teoría de Alhazen.

No se trataba sólo de nuevas observaciones, Kepler conocía el antiguo problema planteado por Aristóteles al que, hasta entonces, no se había dado solución satisfactoria: "*¿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?*" (Kepler, 1604, Cap II) (Fig. 3.12), es decir, ¿por qué la forma del agujero de la cámara oscura no influye en la forma de la *imagen* del objeto que se ve en la pantalla? Y razonaba: si una "imagen" desprendida del Sol llegara a la hendidura, por ejemplo de forma triangular, de una cámara oscura se podría observar en su pantalla una mancha luminosa con forma triangular.

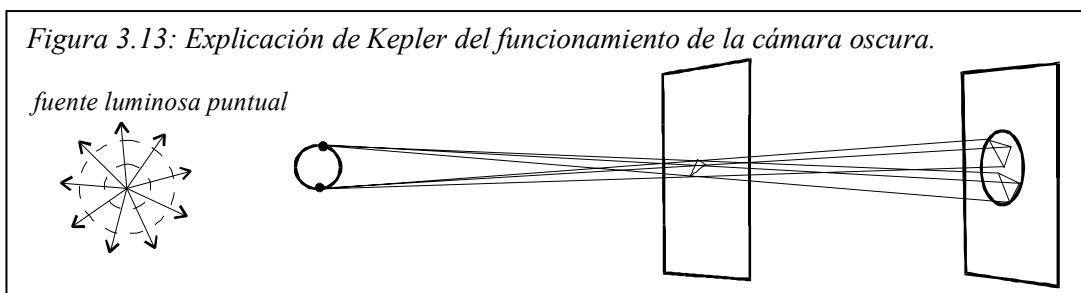
Figura 3.12: Fotografía de las lúnulas observadas en el suelo, a la sombra de un árbol, durante el eclipse de Sol del día 3 de octubre de 2005.



Y si, tal como proponía Alhazen, un único rayo procedente desde cada punto del disco solar o del disco lunar entrara en la cámara oscura para formar la imagen, no se podría justificar la variación del diámetro lunar que se observa en la pantalla de este dispositivo (siempre que la suposición de Brahe de dilatación real de la Luna fuera falsa).

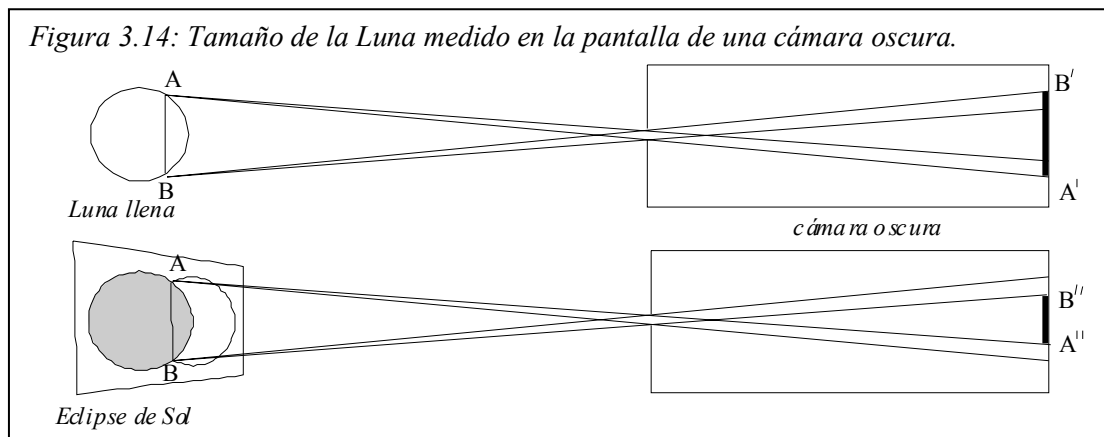
Para atacar ambos problemas Kepler propuso un nuevo modelo de formación de imágenes. El primer aspecto esencial de su propuesta es que la luz emitida por cada punto del objeto es una esfera en expansión, de tal forma que los rayos son solamente elementos direccionales ideales, sin entidad real. En la proposición VII de su obra "Ad Vitellionem Paralipomena", Kepler (1604) afirma expresamente: "El rayo de luz no es nada de la misma luz que marcha". Si parte de ese haz esférico emitido por la fuente puntual entra en el orificio de la cámara oscura, se selecciona un haz divergente de luz y se obtendrá en la pantalla una mancha luminosa con la misma forma de la hendidura. Pero, para una fuente luminosa extensa y lejana de la que se trazan multitud de haces divergentes desde cada uno de sus puntos, la superposición de las pequeñas manchas triangulares compondrán una figura de la misma forma que la fuente luminosa (Fig. 3.13).

Figura 3.13: Explicación de Kepler del funcionamiento de la cámara oscura.



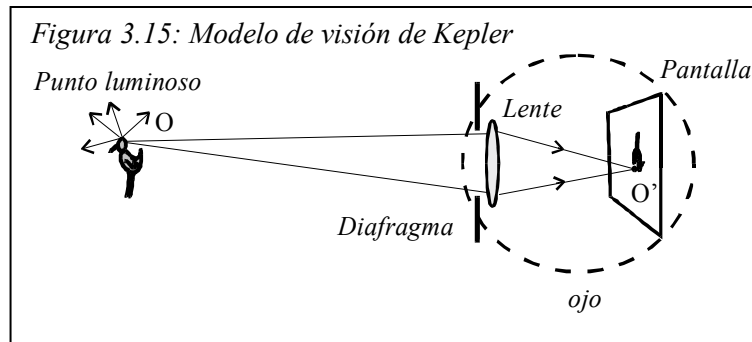
Como se puede comprender, con esta representación de la luz, no es necesario recurrir a la emanación de "imágenes" desde las fuentes luminosas, ni al rayo transportador de parte de la imagen.

El problema de la dilatación periódica del disco lunar observada en la cámara oscura, pudo ser resuelto, también, a partir de esta hipótesis geométrica sobre la propagación de la luz (Fig. 3.14). Señalando una cuerda, AB, sobre el disco lunar en fase de Luna llena y trazando haces de luz desde sus extremos, obtendremos sobre la pantalla de la cámara oscura una cuerda de tamaño A'B' en el círculo luminoso. Si ahora trazamos el esquema durante un eclipse de Sol, la cuerda lunar AB no es, en este caso, una fuente luminosa, los puntos A y B son fuentes puntuales del Sol que limitan con esa cuerda lunar. Las manchas luminosas obtenidas sobre la pantalla de la cámara oscura tienen cierto tamaño y, por tanto, la medida de la cuerda del círculo negro, A''B'', corresponderá a la secante lunar AB que, como se observa en este caso, aparece más pequeña que en el caso de Luna llena.



El segundo aspecto esencial de su teoría se refiere a la formación de imágenes. El conocimiento que se tenía en la época de Kepler de la fisiología del ojo y de las lentes, le permitió proponer un modelo de ojo humano consistente en una cámara oscura esférica y acuosa con una lente de convergencia variable (el cristalino) en su interior. La visión se produciría por la formación de una imagen en una pantalla del interior (la retina), lo que ocurriría suponiendo que cada haz de luz cónico y divergente que entre en la pupila, converge en un punto de la retina (Fig. 3.15). La imagen extensa de un objeto se formaría a partir de la

colección de los puntos imagen. Es a ésta reproducción del objeto que se forma en la retina a la que denomina imagen ...“definida como obra de la visión”... “y las características de esta imagen (color, posición, distancia, tamaño) no se pueden explicar más que por referencia al ojo” (Cap. III de “Ad Vitellionem Paralipomena”, Kepler, 1604).

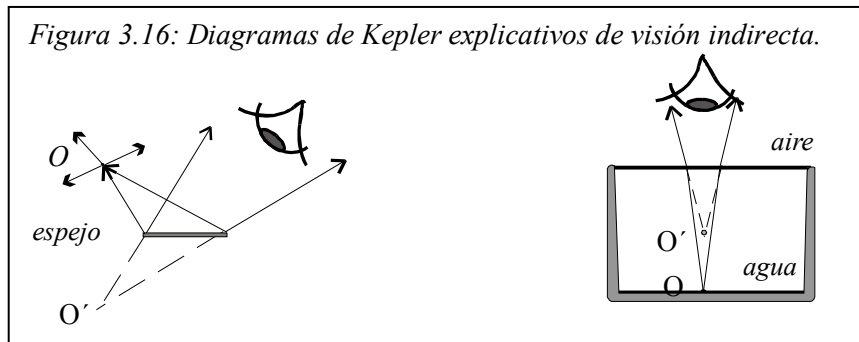


Según este modelo, el objeto puede ser considerado como un conjunto de fuentes puntuales de diferentes tipos de luz y la imagen la colección de esas mismas fuentes de luz, sólo que con menores intensidades, por eso reconocemos el objeto al mirar su imagen en una pantalla.

Aunque Kepler asignaba el término imagen a la que 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. Así, Descartes (1637) o Newton (Axioma VII, libro 1ª de *Óptica*, 1704), advierten que dado que el modelo de ojo es ópticamente similar a un sistema óptico convergente formado por una lente delgada y una pantalla, a la representación que vemos en ella también se le denomina imagen, por imitación a la que se forma en la retina del ojo. Sin embargo, la imagen que vemos en la pantalla de un sistema convergente sólo existe en el ojo del observador. En ausencia de él, en esa pantalla sólo podemos decir que existe una distribución de tipos de luz con diferentes intensidades, similar a la emitida por la fuente luminosa. Esa imagen o reproducción del patrón de luz emitido por el objeto que vemos en la pantalla no es, por tanto, como a veces parece creerse, una especie de objeto plano pegado en ella, como una fotografía, que existiría allí aunque no la miráramos.

Este concepto de imagen óptica permite explicar también los fenómenos de visión indirecta, cuando se mira a un espejo o a un objeto sumergido en el agua, etc. Los diagramas de la Figura 3.16 muestran que, de la misma forma que para la

visión directa, un haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto entra en el ojo para converger en la imagen de la retina.



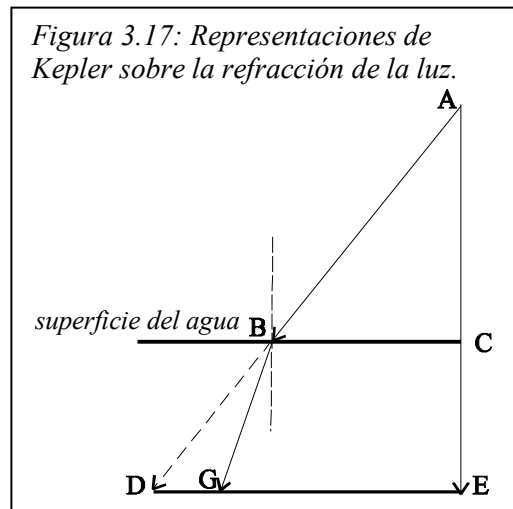
El ojo localiza la posición de lo que ve (que se ha venido denominando “imagen virtual”) en el vértice del cono divergente u origen geométrico del haz de luz que llega al ojo. Llamamos la atención de que en estos esquemas de visión de Kepler el punto O' es deducido directamente de sus principios sin necesidad de recurrir, como se hacía en el modelo de Alhazen, a la línea de carácter observacional OO' .

Para justificar que la imagen que se ve en el espejo se encuentra sobre la vertical trazada desde el objeto a la superficie del espejo, Euclides y otros filósofos de la antigüedad habían argumentado que esa era la posición “natural” de la imagen y que ella viaja por el camino más corto hasta el espejo. Es más, habían predicho que tapando la zona del espejo que cae sobre la perpendicular al objeto no se vería la imagen. Kepler, en el capítulo III de *Paralipomènes a Vitellion* señala la falsedad de esta predicción no sólo porque se contradice con la observación, sino también porque utiliza argumentos como la “naturalidad” que no se deriva de los principios. La reflexión de los haces de luz en el espejo que se muestra en el esquema permite explicar la visión de la imagen en el espejo desde una posición lateral al objeto sin recurrir a ese tipo de criterios de aceptación de las ideas.

Aunque el diagrama de la reflexión se realiza a partir de leyes bien conocidas y contrastadas experimentalmente, el diagrama de la refracción sólo se puede realizar a partir de datos empíricos que no responden a ninguna ley conocida. Alhazen había encontrado que para ángulos de incidencia pequeños existía una proporcionalidad entre los ángulos de incidencia y de refracción, pero medidas más precisas realizadas por Vitelo y por el propio Kepler señalaban que esta proporcionalidad no existía para ángulos mayores. No obstante, para el caso de un observador que mira en una dirección perpendicular a la superficie del agua,

un estrecho haz de la luz emitida por un punto del interior entraría en el ojo después de sufrir la refracción. Aunque cada dirección de propagación tiene una desviación diferente, en este caso, dado lo estrecho del haz, a partir de los postulados de Kepler podemos representar un diagrama como el de la figura 3.16, en el que se puede explicar que la imagen se vea sobre la vertical trazada desde O hasta la superficie de separación de los medios, sin recurrir, tampoco, ni a criterios de naturalidad ni a principios divinos.

Kepler corrigió los datos sobre los ángulos de refracción de la luz al pasar del aire al agua aportados por Vitelo (por quien se conoció la óptica de Alhazen) y asignó a la densidad del medio la causa de la refracción, aunque también reconocía la influencia de la inclinación en la incidencia. Diagramas como el de la figura 3.17 muestran como, en todo momento, está considerando en sus razonamientos el frente de luz emergente

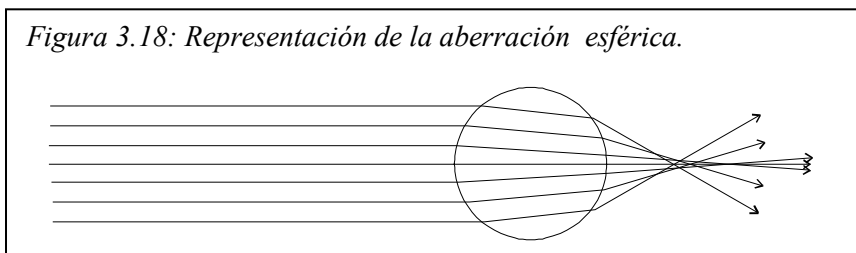


desde cada punto de la fuente luminosa y que, en este caso, se refracta. En este esquema, según la explicación de Kepler, A es una fuente luminosa puntual y BC una parte del frente de luz que incide en la superficie del agua. Si no existiera una superficie más densa esa luz se esparciría hasta DE, es decir, habría en DE tanta luz como había en BC. Pero si BC es una superficie más densa se impide esta dispersión y toda la luz se esparce, ahora, en GE. Así pues, el rayo AB es refractado hacia G (Ferraz, 1974, pag. 137).

Bloqueado su pensamiento por el convencimiento de que el cálculo matemático ha de apoyarse en la aprehensión de las causas físicas, el mejor matemático del momento que fue capaz de encontrar la relación entre el período y el diámetro de las órbitas de los planetas, no fue capaz de obtener una ley empírica que relacionara los ángulos de incidencia y refracción. Sin embargo, sabemos que sólo a partir de razonamientos geométricos, sin poder fijar convincentemente las razones físicas, Snell y Descartes enunciaron la ley de la refracción y que Huygens encontró una explicación física cuando la ley estaba ya establecida.

En lo que respecta al color, frases como "La luz blanquea los colores de las cosas porque destruye la materia, y la esencia de los colores consiste en la materia" , ..., "la luz que ilumina los colores es reflejada desde todas partes y los mismos colores irradian esféricamente" dejan entrever que para Kepler el color sigue siendo una cualidad propia de los objetos que es irradiada junto con la luz que no es considerada con carácter heterogéneo. Aunque analiza algunas experiencias cromáticas producto de la interacción de la luz con la materia, el blanco y el negro son, para él, los colores extremos de la escala cromática.

Por último, en el capítulo V de *Paralipomènes a Vitellion*, Kepler explica la formación de las "figuras" que se ven utilizando sistemas de lentes convergentes y pantallas. Al utilizar como medios convergentes esferas de vidrio llenas de agua reconoce el fenómeno de la aberración esférica (Fig 3.18) y distingue la imagen (que sólo se forma en el interior del ojo) de la figura que se ve en la pantalla.



Para que la figura se vea nítida, y se pueda formar una imagen similar al objeto, idealiza estos dispositivos y señala los límites en que esto es posible, es decir, marca los límites de la óptica paraxial: lentes delgadas sobre las que inciden estrechos haces de luz quasi paralelos al eje óptico.

Con una segunda obra sobre óptica (*Dioptrice*, 1611) Kepler completó el modelo físico de visión y sistematizó el estudio de las imágenes formadas por las lentes delgadas, la visión a través de ellas, la corrección de las ametropías de la visión y la construcción de algunos instrumentos ópticos como el telescopio.

Kepler emplea la palabra "reproducción" para referirse a la figura que se ve en una pantalla y la palabra "imagen" cuando se refiere a una reproducción formada en la retina del ojo del observador que es la que está asociada a la sensación de la visión. Sin embargo, en el marco de las limitaciones de la óptica paraxial, la forma de obtener geoméricamente la reproducción que se ve con una lente convergente en una pantalla es similar a la forma como se obtiene la imagen en

la retina del ojo. Esto es, parte del haz de luz emitido por cada punto del objeto, después de atravesar la lente, converge en cada punto de esa reproducción, de forma similar a como se obtiene la imagen en la retina. Por ello, Descartes (1637) en su *Dióptrica*, Newton (1704) en su *Óptica* y otros científicos posteriores emplean indistintamente el término imagen para referirse a la reproducción que se forma en la retina del ojo o a la que se puede ver en una pantalla dentro de la limitación de la óptica paraxial, a pesar de reconocer que las "imágenes" de las pantallas forman imágenes en el interior del ojo del observador y por eso se ven. En óptica se les denomina *imágenes reales* y nosotros utilizaremos este último criterio en lo que sigue.

En el caso de la visión indirecta, las denominadas *imágenes virtuales*, no se hace necesaria esta precisión ya que cada punto de la imagen retiniana se ha formado a partir de un haz divergente de luz que parece proceder de un punto donde el observador localiza lo que ve y no hay posibilidad de formar allí una reproducción en una pantalla.

3.1.7 Análisis comparativo de las teorías de Alhazen y de Kepler sobre el concepto de imagen óptica

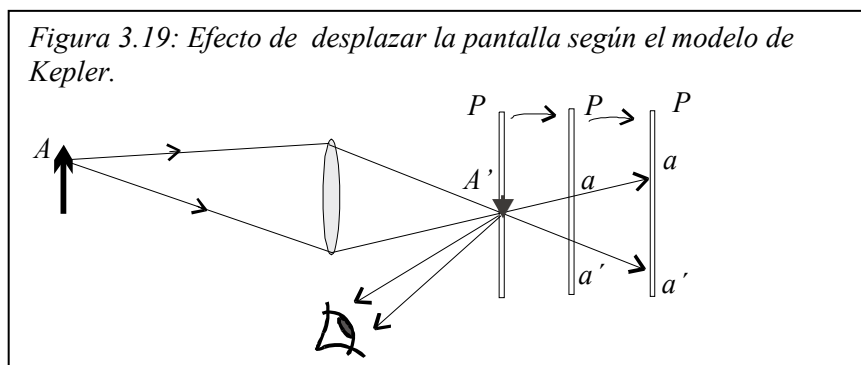
El modelo de visión de Kepler presenta claras diferencias del de Alhazen, aunque las representaciones gráficas de los textos que utilizamos habitualmente, no sólo no hacen referencia al modelo que están utilizando, sino que al dibujar, en algunas ocasiones, la trayectoria de un único rayo (en la reflexión o en la refracción), puede parecer que es indistinto el uso del concepto de imagen de un modelo u otro. Clarificar las diferencias entre ambos modelos supondrá, sobre todo, mostrar las diferencias del concepto de imagen óptica que se desprende de ellos.

Para realizar un análisis comparativo de los modelos de Alhazen y Kepler, presentaremos cinco situaciones reveladoras, algunas de ellas estudiadas por Goldberg, Bendall y Galili (1991) donde se destacan las insuficiencias del modelo de Alhazen frente al de Kepler. En concreto trataremos de responder a las siguientes cuestiones:

- a) ¿Por qué en un sistema lente convergente-pantalla vemos únicamente la imagen en una sola posición de la pantalla?
- b) ¿Qué ocurre con la imagen producida por una lente convergente delgada cuando se tapa la mitad de la lente?
- c) ¿Cómo es posible ver la imagen producida por una lente convergente sin necesidad de pantalla?
- d) Si en idéntica situación a la anterior, se tapa media lente y se mira a la imagen desde la misma posición en la que se veía entera, ¿por qué se ve la mitad?
- e) ¿Cuáles son las diferencias entre la reproducción que se ve en una cámara oscura y la imagen formada por una lente convergente?

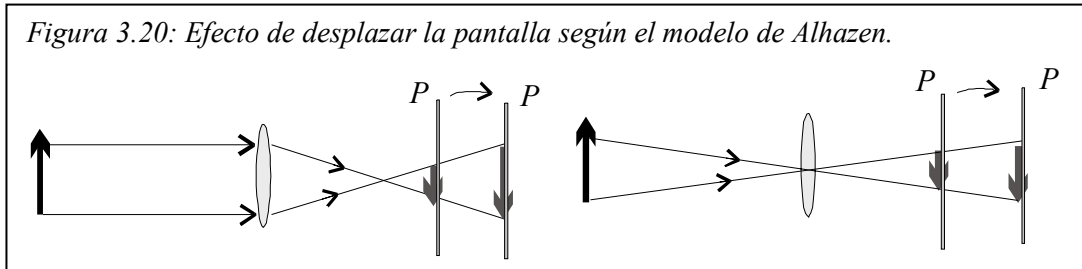
a) ¿Por qué en un sistema lente convergente-pantalla vemos únicamente la imagen en una sola posición de la pantalla?

La respuesta a esta cuestión se deriva fácilmente del propio concepto de imagen óptica de Kepler. Según este modelo, hemos estudiado que la imagen se forma al converger en cada punto de la pantalla la luz emitida por cada punto del objeto que atraviesa la lente. Para objetos suficientemente alejados, la lente convierte los haces divergentes en convergentes. Desde este punto de vista es obvio que la imagen sólo se pueda ver en una única posición de la pantalla, ya que, en otras posiciones, los haces de luz emergidos por esa una misma lente no convergen en un punto de la misma (Fig. 3.19), sino que forman círculos luminosos de diámetro variable.



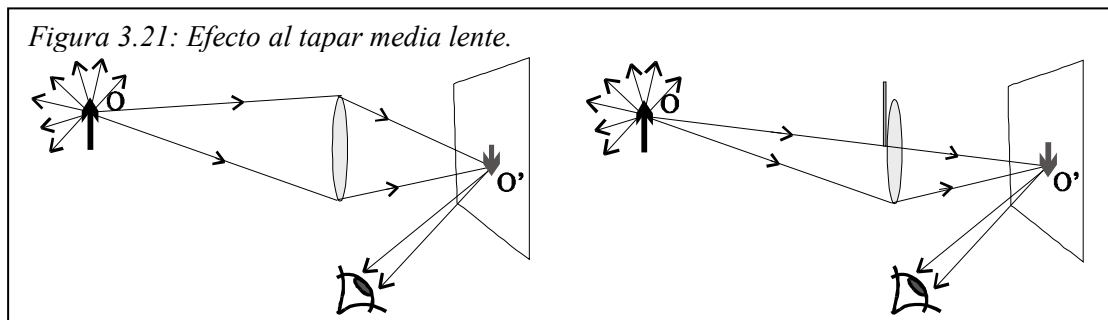
Sin embargo, con frecuencia, se realizan trazados gráficos en los que se forma la imagen con un único rayo, como si se derivaran del modelo de Alhazen. Cabe precisar que Alhazen, en el siglo XI, no estudió el funcionamiento de las lentes que en esa época no se utilizaban, por lo que los trazados a los que nos

referimos no son realizados por él, sino, más bien serían una consecuencia de sus principios. En las representaciones de la figura 3.20 puede comprenderse que si un único rayo fuera suficiente para formar la imagen óptica, las pantallas (P) situadas en distintas posiciones formarían imágenes de distinto tamaño. Se puede comprobar fácilmente que estas consecuencias del modelo de Alhazen se contradicen con la observación experimental.



b) Qué ocurre con la imagen producida por una lente convergente delgada cuando se tapa la mitad de la lente.

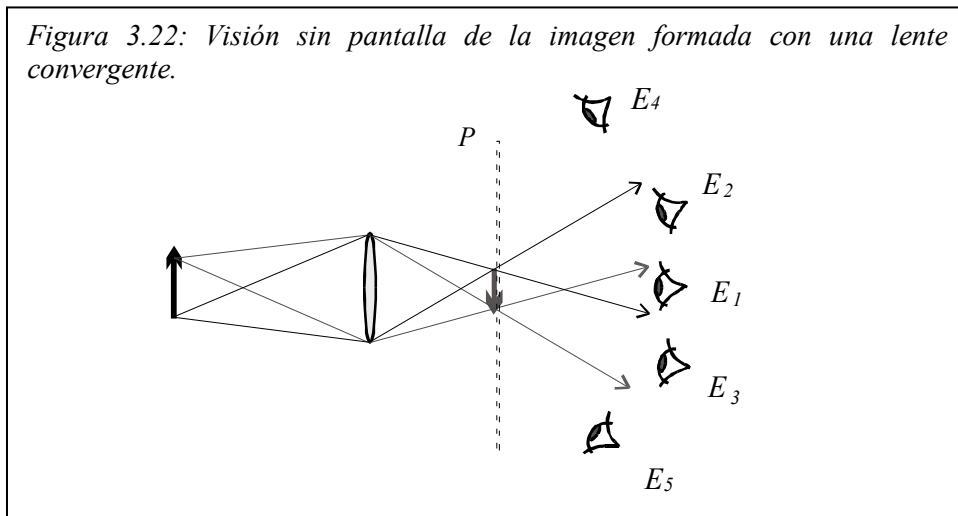
Desde el punto de vista de la teoría de Alhazen, cada punto de la imagen se habría formado por la incidencia de un solo rayo, por lo que tapar media lente supondría quitar la mitad de los rayos que llegan y formar la mitad de la imagen. El resultado experimental de ver la imagen entera, pero menos luminosa, sólo es predecible a partir del concepto de imagen óptica que se deriva de la teoría de Kepler, esto es, a partir del empleo de haces de luz que emanan de cada punto del objeto y entran en la superficie libre de la lente para converger en cada punto de la imagen. Desde cada punto de la imagen en la pantalla se difunde luz en todas las direcciones (¡algo que no ocurriría si la pantalla fuera un espejo!) y podemos verla desde una multitud de posiciones (Fig 3.21).



c) Cómo es posible ver la imagen producida por una lente convergente sin necesidad de pantalla.

Cuando se elimina la pantalla y se mira hacia el objeto a través de la lente, es posible ver la imagen si nos situamos en la dirección de propagación de la luz y, debido a la necesaria acomodación del ojo, a cierta distancia de donde se situaba la pantalla. La imagen de un objeto lejano obtenida con una lente convergente, con pantalla o sin ella, es una *imagen real* ya que desde cada punto de la imagen se emite luz.

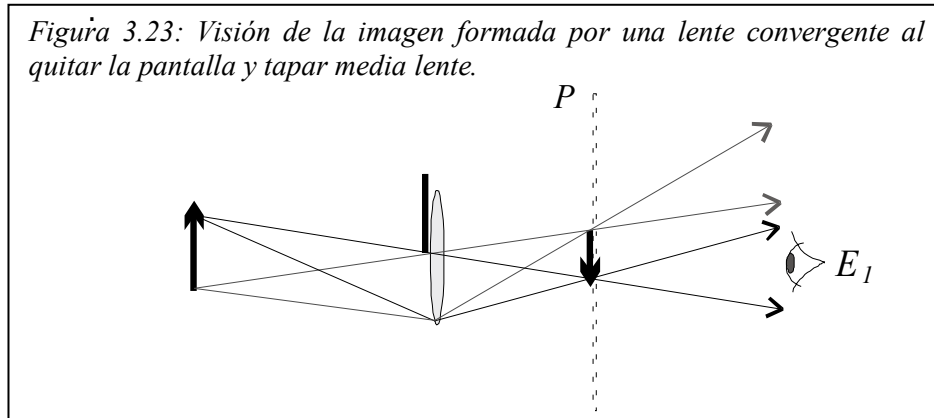
De acuerdo con el modelo de Kepler, en la figura 3.22 se observa que cada haz de luz emitido por cada punto del objeto, después de atravesar la lente, converge en cada punto de la imagen y, si se elimina la pantalla (P), continúan divergiendo desde dichos puntos. Así pues, desde la posición E_2 sólo puede verse la parte inferior del objeto y desde la posición E_3 sólo la parte superior. Desde E_1 se puede ver el objeto completo y desde E_4 y E_5 no puede verse la imagen.



Estos hechos experimentales no son predecibles a partir de la teoría de Alhazen, ya que no hay ningún trazado gráfico que haga posible explicar este fenómeno si la imagen se formara a partir de un único rayo emitido desde cada punto de objeto. Dicho de otro modo, en el caso de que se elimine la pantalla y utilizando el concepto de imagen óptica que se deriva del modelo de Alhazen, no sería posible explicar que exista una posición del observador desde donde se vea la imagen entera.

d) Si en idéntica situación a la anterior, se tapa media lente y se mira a la imagen desde la misma posición en la que se veía entera, por qué se ve la mitad.

Trazando haces de luz desde cada punto del objeto hasta la superficie libre de la lente se puede representar un diagrama que explique por qué, en este caso, desde la misma posición, E_1 , en donde antes se podía ver la imagen entera, ahora se ve media imagen (Fig 3.23)

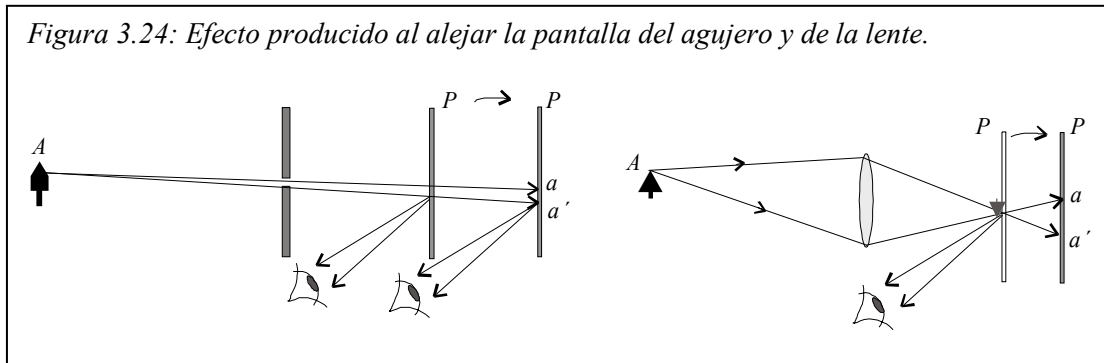


Por los mismos argumentos que los apuntados en el apartado anterior ningún trazado realizado a partir del modelo de Alhazen podría explicar esta observación.

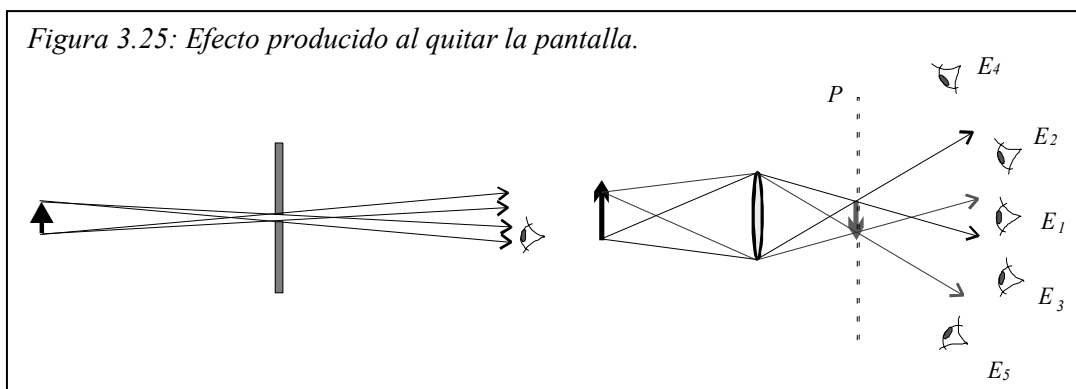
e) Cuáles son las diferencias entre la reproducción que se ve en una cámara oscura y la imagen formada por una lente convergente.

Normalmente, se utiliza la palabra imagen para designar la reproducción del objeto que se puede obtener en una pantalla traslúcida de una cámara oscura o cámara estenopéica. Sin embargo, conceptualmente, son profundas las diferencias entre esta "reproducción" y la imagen real obtenida con una lente convergente para que podamos designarla como imagen. Haciendo uso del modelo de Kepler, analizaremos estas diferencias mostrando los efectos que se producen en la cámara oscura y en el sistema convergente al alejar la pantalla y al quitarla.

En la figura 3.24 podemos observar que en el caso de la cámara oscura, al alejar la pantalla, la mancha luminosa a-a' prácticamente permanece invariable, mientras que en el sistema convergente, pequeños desplazamientos de la pantalla provocan que el punto imagen se torne una gran mancha luminosa. Por ello, en un sistema con lente convergente, al alejar la pantalla, se deja de ver la imagen y, en una cámara oscura de agujero suficientemente pequeño, podemos seguir viendo, prácticamente sin alteraciones, una réplica del objeto

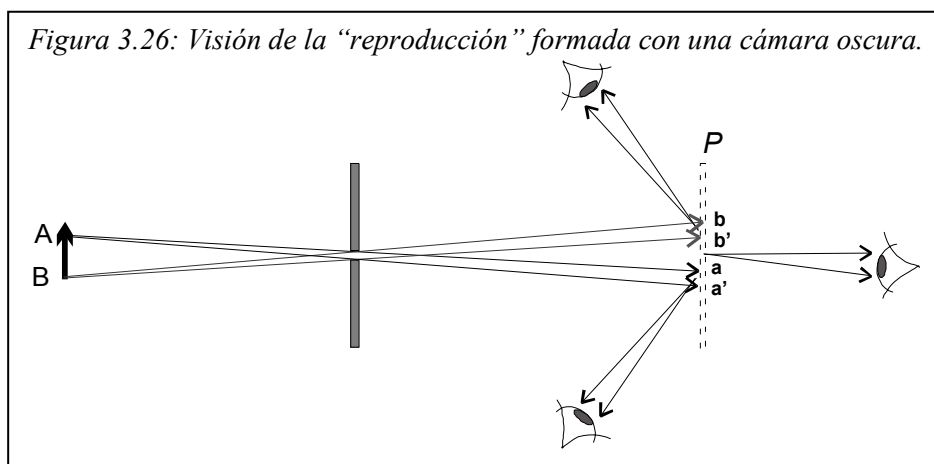


También son diferentes los efectos producidos al quitar la pantalla en ambos dispositivos. En la figura 3.25 se puede comprender por qué al quitar la pantalla de la cámara oscura no vemos el objeto al mirar hacia él a través del agujero: tan sólo llega a la pupila un haz divergente de luz procedente de un punto del objeto. En cambio, en el segundo dispositivo, si quitamos la pantalla y miramos hacia el objeto a través de la lente, es posible ver su imagen entera en el lugar donde antes estaba la pantalla, si el observador se sitúa en aquellas posiciones donde sobre su ojo inciden haces divergentes de luz procedentes de todos los puntos de la imagen, lo que ocurre en la zona E₁ (en E₂ verá la parte inferior; en E₃ la superior; en E₄ y E₅ no se ve la imagen) como hemos analizado anteriormente.



Siendo cualitativamente tan grandes las diferencias, si no podemos distinguir si la figura que vemos en una pantalla es una imagen óptica formada con un sistema convergente o es una réplica formada con una cámara oscura de agujero pequeño, es sólo por las limitaciones del poder de resolución del ojo humano. Lo que llamamos "punto" imagen ocupa, en realidad, en la retina, la superficie de tres conos (Huebner y Smith, 1994) lo que equivale a que, en las mejores condiciones de contraste luminoso, no se puedan distinguir separados dos puntos cuya distancia subtienda con el ojo un ángulo menor de 1' de arco (Gil del Río, 1984). 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 la superficie de tres conos, por lo que es interpretada como si proviniera de un solo punto.

Analizando el patrón de iluminación que se obtiene en una cámara oscura aclararemos esta cuestión. En la figura 3.26 se representa, a partir del modelo de Kepler, como un observador situado en distintas posiciones ve una reproducción de un objeto AB en una pantalla traslúcida (P) colocada detrás de un pequeño agujero. El agujero limita los haces de luz procedentes de cada punto del objeto y que producen en la pantalla unas regiones de iluminación (a-a', b-b'). Las regiones de puntos cercanos se solapan, pero si el agujero es pequeño, un observador ve el patrón de iluminación como una reproducción del objeto invertido. Aunque esta reproducción pueda ser similar, a simple vista y dado el poder de resolución del ojo, a la imagen formada con una lente convergente, conceptualmente son tan grandes las diferencias que únicamente denominaremos imagen real a la obtenida con una lente convergente en el marco del modelo de visión de Kepler.



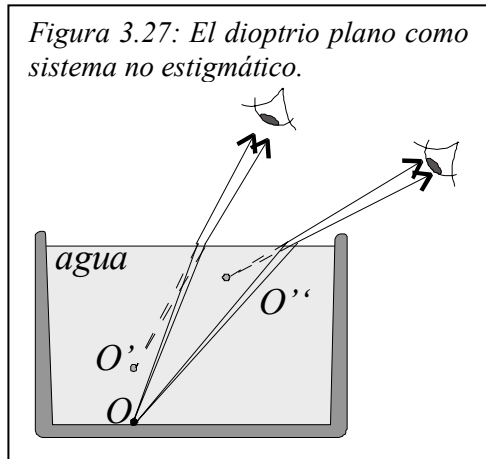
De la discusión anterior (Goldberg, et al. 1991) se desprende, obviamente, que de acuerdo con la teoría de Kepler, el criterio para que una reproducción sea considerada una imagen real no puede ser, simplemente, que pueda ser vista en una pantalla. El término imagen real debe ser empleado en unas condiciones más restrictivas que, cómo hemos visto, en síntesis, son: a) sólo existe imagen real en una única posición para cada tipo de lente convergente y para cada posición del objeto y b) la luz procedente de cada punto del objeto converge, después de atravesar la lente convergente delgada, en un punto donde se localiza la imagen, que puede ser observada mirando en la dirección de propagación de la luz (sin necesidad de pantalla) desde un punto alejado. Estos criterios permiten definir el concepto de imagen de una forma objetiva en el campo de la óptica geométrica paraxial sin involucrar el poder de resolución del ojo y diferenciarla claramente de la reproducción que se ve en la pantalla de una cámara de agujero.

3.1.8 Aportaciones de la óptica geométrica posterior a Kepler al modelo de visión

Aunque estos esquemas geométricos basados en las hipótesis de Kepler permiten conceptualizar la imagen óptica, realizar predicciones contrastables, explicar hechos que hasta entonces no pudieron ser explicados y elaborar un modelo de ojo más consistente, el hecho de no disponer de una ley para la refracción le impidió relacionar las características geométricas de la lente con la refracción que en ella se produce y, por tanto, abordar matemáticamente los problemas de aberración esférica que se dan. Además, al no considerar la heterogeneidad de la luz no pudo explicar la coloración de los bordes de las imágenes que se obtienen al mirar por los telescopios que se empezaban a usar.

El concepto de imagen óptica y los trazados de rayos necesarios para localizar las imágenes y dar sus características es el gran avance de Kepler en la óptica geométrica paraxial. **Descartes** (1637) en su *Dióptrica*, una vez establecida la regla de los senos para la refracción, se introduce en el estudio de las superficies de las lentes con el fin de corregir la aberración esférica, detectada por Kepler, y mejorar, con ello, la calidad de los instrumentos ópticos.

Con la ley de la refracción se puede explicar que dos observadores no vean en la misma posición la imagen de un objeto sumergido (Fig 3.27). Por el contrario, sí ven en la misma posición la imagen de un objeto producida por un espejo o por una lente en la aproximación paraxial. Por ello, los ópticos denominan a éste como sistema "no estigmático" o no formador de imágenes únicas. Cuando el observador se encuentra sobre la vertical al objeto, dado que el estrecho haz de luz que entra en la pupila del ojo impone una restricción similar a la paraxial realizada para las lentes, independientemente de la altura a la que se encuentre., podemos considerar que el sistema forma una imagen única. En este caso el observador localiza la imagen también sobre la vertical al objeto. En todos los modelos históricos que hemos analizado, se suponía que la imagen de un objeto sumergido en agua cuando se miraba desde el exterior se localizaba sobre la vertical, sin embargo, esta suposición no solo no se justificaba por ningún principio, sino que tampoco coincide con la observación si el observador se separa de la normal al objeto.



Por otro lado, para Descartes la luz es un movimiento instantáneo del medio con claras conexiones con el pensamiento aristotélico, aunque a veces utiliza analogías con partículas en movimiento o con vibraciones. El color lo entiende como una propiedad del cuerpo cuyas partículas pueden estar sometidas a rotaciones distintas y que serían la causa de las diferencias cromáticas. Con esta concepción del color no es posible iniciar mejoras en los instrumentos ópticos para corregir la aberración cromática que en ellos se observa.

Con Descartes y la ley de la refracción podemos considerar completado un primer marco de conocimientos en la óptica geométrica y en la visión, si exceptuamos la visión de los colores. Sin embargo, a la vez que se cierra este capítulo de la historia de la óptica, se abre, y ahora con más intensidad, el de la naturaleza de la luz. Filósofos discípulos suyos y otros (Boulliau, La Chambre, Petit, Anjo, Huygens ...) debatieron en los años posteriores si la luz es de naturaleza sustancial o accidental (algo que le ocurre al éter). La Chambre publicó en 1657 el tratado "La Lumiere" en el que se recoge que existen varios tipos de luces,

entre ellas *las luces débiles de los colores*. La luz misma es transparente pero el color con que vemos los cuerpos es asignado a un tipo de luz (Ferraz 1974, pp 229). Esta idea será mantenida por muchos filósofos posteriores.

Es necesario llegar hasta 1.665, cuando Hooke y Grimaldi al enfrentarse con los anillos de colores producidos por las lentes o al plantear el problema de la difracción, formularon hipótesis de propagación no instantánea y consideraron la luz como una alteración local consistente en una vibración rápida de las partículas del éter (Mason 1985).

Sin embargo, a pesar de que en el ambiente científico de la época se daba por supuesto que la luz no era un fenómeno instantáneo, una medida aproximada de su velocidad de propagación no se obtuvo hasta 1676. Roemer, que conocía que el intervalo de tiempo medio entre dos eclipses sucesivos de cualquiera de los satélites de Júpiter depende de la distancia entre Júpiter y la Tierra, pudo explicar este fenómeno astronómico anómalo suponiendo que la luz no se propaga instantáneamente y determinar la velocidad aproximada de su propagación a partir de datos astronómicos (Làndsberg, 1984).

Aunque la luz no sea un ente físico instantáneo, ni el modelo de visión de Kepler, ni la ley de la refracción de Descartes se ven afectadas; si acaso, la determinación de su velocidad de propagación refuerza la consideración de entidad física independiente y aumenta, aún más, el debate sobre su naturaleza.

Huygens (1690), en su "*Tratado de la luz*" sistematizó deductivamente las leyes de la óptica geométrica con modelos ondulatorios. Según estos modelos, la luz se propaga en el éter desde la fuente en forma de ondas esféricas, siendo el éter una sustancia que llena los poros de la materia y de los cuerpos transparentes. Con este modelo explica la propagación no instantánea de la luz, deduce las leyes de la reflexión especular y las de la refracción, incluso la reflexión total, y deduce el teorema de Fermat como una consecuencia de su modelo de propagación y no como un principio físico en sí mismo. Sin embargo, en su tratado, no avanza ninguna explicación de la visión de los colores., de hecho confiesa expresamente en la introducción de su "*Tratado de la luz*" que no aborda el problema de la visión de los colores por ser "*materia muy difícil y sobre todo a causa de tantas maneras diferentes de producir los colores*". Se sabe que Newton le había comunicado algunas de sus experiencias sobre los colores (Westfall 1996).

Paralelamente, al final del siglo XVII, **Newton** atacó con multitud de experimentos la hipótesis de la modificación de la luz sostenida por la mayoría de los filósofos de la época, según la cual la luz, de naturaleza homogénea, al atravesar un prisma o ciertos filtros cambia de color. Según la hipótesis corpuscular de Newton (Newton, 1704), la luz blanca es heterogénea y está formada por chorros de partículas de varios tipos, correspondiendo las partículas de un mismo tipo a una luz de un determinado color. Las partículas diferentes que forman la luz blanca se refractan de manera distinta al pasar del vacío a un medio más denso, debido a que la velocidad de las partículas en un medio diferente del vacío es distinta para cada tipo de partículas, lo que explicaba la dispersión de la luz blanca al atravesar un prisma. A pesar de esta teoría de carácter mecánico de los colores, Newton reconoció la importancia que tiene "el sensorio" para explicar las sensaciones de color que el ojo humano es capaz de captar.

Para Kepler el color era irradiado por los cuerpos a la vez que la luz; para Newton la propia luz es de naturaleza cromática por lo que una única entidad es utilizada para explicar la forma y tamaño de las imágenes ópticas y, también, el color con que se ven. Aunque Newton reconoce que en el color existen componentes sensoriales además de los mecánicos, a partir de su hipótesis corpuscular, el color pasa de ser una propiedad de los cuerpos a ser, fundamentalmente, una propiedad de la luz y del "sensorio". Con la hipótesis corpuscular de Newton, se dispone de una herramienta para corregir las aberraciones cromáticas que aparecen en los instrumentos ópticos que utilizan lentes gruesas.

Sólo a partir del siglo XVIII, con el paradigma aportado por la *Óptica* de Newton a la ciencia de la luz, los científicos buscaron pruebas de la presión ejercida por las partículas lumínicas al chocar con los cuerpos sólidos y, con ello, abrieron campos de investigación, lo que no hicieron los primeros partidarios de las ondas. Como señala Kuhn (1971), hasta que no se planteó una hipótesis sobre la naturaleza de la luz avalada por la autoridad de Newton, no se dispuso de un paradigma desde el que estructurar programas de investigación y abordar los nuevos problemas surgidos.

Pero antes de llegar a ese punto sí se formularon modelos sobre la visión y teorías sobre la formación de las imágenes que explicaron los fenómenos

luminosos, permitieron comprender la corrección mediante lentes de algunos defectos visuales e, incluso, diseñar telescopios y otros instrumentos ópticos con este cuerpo teórico. De hecho, en su "Óptica", Newton, antes de estudiar la heterogeneidad de la luz con la que explicaría los fenómenos cromáticos, planteó ocho definiciones y ocho axiomas en donde se recogen los conocimientos necesarios para explicar, desde el punto de vista de la óptica geométrica, la visión de los objetos y la formación de imágenes en los instrumentos ópticos. En estos postulados y axiomas se recogen, básicamente, los conocimientos de la óptica geométrica desarrollada por Kepler y que explican la visión. La única excepción reseñable es el concepto de rayo de luz ya que para Kepler es únicamente una dirección de propagación "*sin nada de la propia luz*" y para Newton es parte de la misma luz: "*llamo rayo de luz a la luz o parte de la luz menor que se puede detener sola, sin detener al resto, o propagar sola, o hacer o padecer algo sola sin que el resto de la luz lo haga o lo padezca*" (Newton, 1704, Definición 1ª de Óptica). Estudios recientes (Raftopoulos et al., 2005) aducen que Newton basa muchas explicaciones de su óptica en un modelo de rayos de luz, que son líneas rectas trazadas desde la fuente y que la refrangibilidad de los cuerpos actúa en líneas perpendiculares a su superficie. Esto es, Newton utiliza en muchas de las explicaciones ópticas un modelo neutral que no se decanta por ninguna teoría sobre la naturaleza de la luz y que huye de la controversia entre los partidarios de las hipótesis ondulatoria y corpuscular de la naturaleza de la luz.

La concepción psicofísica de la percepción del color fue desarrollada por Thomas Young a comienzos del siglo XIX con su teoría tricromática de la visión del color. Según ésta, las sensaciones de color son producto de la interacción de la luz con tres dispositivos fotorreceptores de la retina que poseen distinta sensibilidad espectral (Sanz, 1993). Cuando una fuente luminosa puntual forma su imagen en la retina, el grado de estimulación que provoca en los fotorreceptores (conos retinianos) es distinto según la frecuencia de la luz y según el tipo fotorreceptor. No obstante, en la sensación cromática diferencial elaborada influye, además, la intensidad luminosa y el tipo de iluminación del entorno (Küppers 1992).

En el desarrollo de esta teoría se han determinado las curvas de respuesta de cada uno de los tipos de fotorreceptores a la frecuencia de la luz incidente a partir de una cierta intensidad y se han enunciado leyes empíricas semicuantitativas de la elaboración de la sensación cromática. Lo que no deja

lugar a dudas esta teoría de la visión del color es su característica de sensación que acompaña a la formación de imagen retiniana, lejos, por tanto, de atribuirlo a una propiedad de los cuerpos o a una propiedad de la luz. Sin embargo, a pesar de ello, es frecuente en el lenguaje de la Física, después de la teoría corpuscular de Newton, el uso de expresiones como luz blanca, luz roja, luz monocromática, etc, que parecen atribuir cada color a cada tipo de luz.

3.1.9 Cuadro-resumen de las principales teorías de la visión

En el cuadro 3.1 hemos recogido las principales ideas de los diferentes modelos de visión que hemos estudiado. En este resumen se recogen los siguientes tópicos: la visión directa, el tratamiento de la luz, la formación de sombras, la visión al mirar a un espejo, la visión al mirar a un objeto sumergido y la formación de una imagen en una pantalla.

Señalaremos un asterisco * en el caso de que ese tópico no haya sido tratado históricamente pero se pueda derivar lógicamente del modelo de visión.

Cuadro 3.1: Explicación de los tópicos familiares por los principales modelos de visión

TÓPICOS/ MODELOS	EMISIÓN	SIMULACROS	MIXTO	ALHAZEN	KEPLER
VISIÓN DIRECTA					
LUZ	Sólo fuentes primarias. Cualidad del espacio no independiente de la fuente. Rayo = recta proyectiva del fuego visual.	Sólo fuentes primarias. Cualidad del espacio no independiente de la fuente. Sin desarrollar un esquema geométrico.	Sólo fuentes primarias. Cualidad del espacio no independiente de la fuente. Rayo = recta proyectiva del fuego visual.	Fuentes primarias y secundarias. Ente físico instantáneo e independiente de la fuente. Rayo= portador de parte de la imagen	Fuentes primarias y secundarias. Ente físico instantáneo e independiente de la fuente. Rayo= indicador de una de las direcciones del haz esférico
SOMBRAS	Sólo para fuente puntual. 	---	Sólo para fuente puntual. 	Sombras y penumbras en fuentes extensas. 	Sombras y penumbras en fuentes extensas.
VISIÓN EN UN ESPEJO					
VISIÓN DE UN OBJETO SUMERGI DO					
IMAGEN ÓPTICA	---	(*) 	(*) 	(*) 	

3.2 ¿Qué deberíamos tratar de conseguir con los alumnos sobre “la luz y la visión” en la ESO? ¿Qué problemas podrían ser adecuados para organizar la enseñanza?

En cualquier campo de estudio de las ciencias nos encontraremos con una gradación de modelos y teorías capaces de explicar y predecir un cada vez mayor número de fenómenos, ¿cuál elegir para ser objetivo de la enseñanza?. Pensemos, por ejemplo, en el modelo Sol/ Tierra. El propio Fred Hoyle (1967) propuso una ordenación de los modelos heliocéntricos basada en el análisis histórico y epistemológico. Cuanto mayor sea la variedad y precisión de las observaciones que queramos explicar sobre el movimiento del Sol, más complejo deberá ser el modelo capaz de hacerlo. En este sentido, a la hora de elegir conviene tener en cuenta que *“en la enseñanza de la ciencia, el grado de sofisticación teórica en cualquier etapa debería estar determinado por la capacidad que tiene la teoría para explicar los fenómenos que encontrarán los alumnos”* (Hodson, 1985; Benson y Viennot, 2004). Tras el estudio realizado, en el caso de la óptica, es el modelo de Kepler (que acabamos de caracterizar) el que permite una concepción racional capaz de explicar la visión directa, cómo vemos en los espejos y a través de líquidos, por qué se producen los defectos habituales de la visión (miopía, hipermetropía) y cómo podríamos solucionarlos. Es decir, es el modelo de Kepler (ampliado para poder tratar la visión del color) sobre cómo se forman las imágenes (cómo vemos) el modelo más sencillo que aúna suficiente coherencia y capacidad predictiva y explicativa para que las personas puedan “pensar con él” y explicar satisfactoriamente (desde el punto de vista científico) buena parte de los fenómenos más cotidianos de la visión. Desde nuestro punto de vista es el modelo más sencillo con suficiente entidad como para ser objeto de enseñanza. Y de hecho es el que se trata de conseguir que aprendan los alumnos (aunque con escaso éxito, como veremos posteriormente) en la enseñanza habitual, tanto en la etapa obligatoria como en el Bachillerato.

Una vez establecido qué nos gustaría conseguir con los alumnos en la enseñanza secundaria, ¿qué problema está en el origen de lo que queremos que aprendan y podría ser adecuado para organizar la enseñanza en torno a él?

Como ya hemos avanzado en el apartado anterior, el análisis histórico y epistemológico sobre la luz y la visión nos muestra que antes de que la luz (sus

propiedades, su comportamiento) se convirtiera en objeto de investigación por sí misma (con preguntas tales como ¿por qué se propaga, se refleja o se refracta como lo hace?), los avances en el conocimiento científico en este campo se realizaron al tratar de solucionar el problema de *cómo vemos* (Ferraz, 1974). Tras el análisis realizado y para un nivel de formación básica, hemos considerado que el problema "**¿cómo vemos? ¿cómo podríamos ver mejor?**", tiene suficiente interés y capacidad estructurante para organizar la enseñanza. El objetivo a conseguir con los alumnos sería, pues, que fueran capaces de explicar cómo vemos, tanto en visión directa como en visión indirecta (al mirar a los espejos, a través de lentes, cuando el objeto y el ojo se encuentran en medios distintos, etc.) apropiándose de un modo funcional del modelo de Kepler.

Ello supone, como hemos visto, conseguir dos ideas fundamentales: a) todos los objetos que vemos deben ser idealizados como un sistema de fuentes luminosas puntuales que emiten luz en todas direcciones (esféricamente) y b) la imagen de un punto se forma en la retina cuando un haz divergente (cónico) de luz proveniente de dicho punto (parte de la luz emitida en todas direcciones) es hecho converger en un punto de ella (modelización del ojo como lente convergente y pantalla). Cuando vemos un punto a través de un espejo o de un líquido es porque el vértice del haz divergente de luz que nos llega al cristalino se encuentra en dicho punto (aunque allí no hay ningún objeto, el ojo ve como si estuviera allí la fuente luminosa).

A lo largo de la historia y también desde un punto de vista lógico, la consecución de dichas ideas se ha realizado paulatinamente, y grandes pasos necesarios han sido (y son):

- a) Concebir la visión como un proceso en el que participan la luz, el ojo y el objeto que es visto.
- b) Idealizar o modelizar dicho proceso, utilizando hipótesis sobre la propagación de la luz de naturaleza geométrica que permitan explicar, predecir y poner a prueba las ideas (Alhazen ya modelizó los objetos extensos como un conjunto de puntos que emitían luz en todas direcciones en línea recta, y utilizó dicho modelo para explicar las sombras y penumbras, aunque para explicar la formación de imágenes sólo usaba un rayo proveniente de cada punto).

- c) Formular una hipótesis sobre la formación de imágenes según la cual, en visión directa, la imagen se obtiene cuando un haz divergente de luz emitido por cada punto de la fuente luminosa entra en el ojo y converge en un punto de la retina (dicha hipótesis sólo fue posible por los avances sobre la fisiología del ojo y la construcción de lentes que no se habían producido aún en la época de Alhazen -quien modelizó el ojo como una cámara oscura- pero que estaban a disposición de Kepler, quien modelizó el ojo como una lente convergente y una pantalla.
- d) Mostrar la capacidad explicativa y predictiva de dicha hipótesis, al explicar sin las inconsistencias de modelos anteriores la visión indirecta (espejos, a través de líquidos y lentes) y diseñar objetos, instrumentos nuevos, para mejorar la visión (gafas para corrección de miopía e hipermetropía, telescopio, ...). No obstante, es necesario señalar, también, los límites del modelo de Kepler (aberraciones, color, psicología de la percepción,...).

Es necesario resaltar, además, que las concepciones sobre cómo se propaga, refleja o refracta la luz aparecieron, en primer lugar, como hipótesis formuladas para explicar la visión y no como consecuencias de un estudio cuyo objeto era la naturaleza de la luz "*per se*". Sólo a partir de Newton (con su hipótesis corpuscular de la luz), puede considerarse que la luz adquiere entidad propia -desligada de la visión- como objeto de investigación.

Así pues, el modelo histórico más sencillo que tiene suficiente coherencia y poder explicativo como para ser objeto de enseñanza es el modelo de visión de Kepler que es el que, típicamente, se trata de enseñar en la educación secundaria (tanto en la etapa obligatoria como en Bachillerato, con diferencias más cuantitativas que cualitativas), aunque se suele omitir, incluso, el nombre de dicho modelo. Kepler –sin abordar la percepción del color ni la fisiología del ojo- inventó un concepto de imagen óptica y de su proceso de formación que superó las inconsistencias de las ideas anteriores y que, aún hoy día, es funcional, es decir, puede utilizarse para explicar y realizar predicciones sobre la visión directa e indirecta de los objetos.

El objetivo a conseguir con los alumnos sería, pues, que **fuera capaces de explicar cómo vemos, tanto en visión directa como en visión indirecta (al mirar a los espejos, a través de lentes, cuando el objeto y el ojo se encuentran en medios distintos, etc.) apropiándose del modelo de Kepler.** La consecución de dicho

objetivo supondría adquirir un conocimiento con poder explicativo, con el cual se puedan hacer y probar predicciones, comprender y diseñar instrumentos, y, por tanto, con sentido en sí mismo.

Todas estas consideraciones tras el estudio realizado, nos permitirán proponer - de una manera tentativa- qué supone una adecuada comprensión del modelo de visión de Kepler, que grandes pasos hay que superar para alcanzar una comprensión funcional de este modelo y qué obstáculos es previsible encontrar en los estudiantes.

3.3 ¿Qué supone la comprensión de la teoría de Kepler sobre la luz y la visión? ¿Qué obstáculos es necesario superar para conseguir dicha comprensión? (Metas parciales y obstáculos asociados)

Hemos visto que el problema fundamental de la óptica que está en el origen de lo que queremos que aprendan nuestros alumnos es el de "¿cómo vemos?", y parece adecuado (añadiendo "¿cómo podemos ver mejor?", para poner énfasis en la dimensión CTSA) para estructurar la enseñanza a partir de él. Se trata de una cuestión de hecho, cuya validez se someterá a pruebas en la segunda parte de esta tesis. En segundo lugar, podemos identificar las ideas que supusieron grandes avances o pasos necesarios para la elaboración del modelo de visión de Kepler (y que, por tanto, deben ser adquiridas para su comprensión) así como posibles obstáculos que pueden encontrarse. Estas previsiones son de un alto valor para elaborar una secuencia problematizada de actividades potencialmente relevante, con oportunidades para que se den los pasos necesarios y se superen los posibles obstáculos.

Presentamos una síntesis de nuestras decisiones sobre qué se requiere para llegar a comprender cómo vemos, para comprender el modelo de visión de Kepler (lo que denominamos indicadores de comprensión) y de posibles obstáculos asociados.

Cuadro 3.2: Indicadores de una comprensión adecuada sobre cómo vemos (pasos necesarios para comprender el modelo de visión de Kepler)

<p>A. Concebir la visión a partir de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo. Lo que supone:</p> <ul style="list-style-type: none">- A₁. Describir el proceso de visión directa e indirecta a partir de la luz que llegue al ojo procedente del objeto.- A₂. Saber que los objetos que vemos emiten luz y son, por tanto, fuentes secundarias de luz.- A₃. Concebir la luz como una entidad física con existencia independiente en el espacio separada de las fuentes primarias y/o secundarias y del ojo del observador. <p>B. Disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo, según el cual:</p> <ul style="list-style-type: none">- B₁ Los rayos son conceptos ideales no visibles (ni la propia luz) que sólo representan cada una de las direcciones de propagación de la luz.- B₂ Desde cada fuente puntual la luz es emitida en todas las direcciones (esféricamente). Un haz de luz es parte de la esfera de luz emitida.- B₃ Las fuentes luminosas extensas (primarias o secundarias) se pueden idealizar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales. <p>C. Saber qué es una imagen óptica y cómo se forma (en el modelo de Kepler). Lo que supone:</p> <ul style="list-style-type: none">- C₁. Conocer que el ojo es un instrumento óptico formador de imágenes en la retina que puede ser modelizado como un sistema formado por un lente y una pantalla. La imagen retiniana aporta información sobre la forma, tamaño, color y lejanía (perspectiva) del objeto que vemos.- C₂. Considerar que en visión directa la imagen se obtiene cuando un haz divergente de luz emitido por cada punto de la fuente luminosa entra en el ojo y converge en un punto de la retina. En visión indirecta, el haz de luz emitido por cada punto de la fuente luminosa, después de incidir en el instrumento óptico (espejo, lente, superficie de separación de dos medios,...) es desviado hasta el ojo y la imagen que se obtiene en la retina provoca la sensación de ver una imagen en el punto de donde procedería la luz si no hubiera sido desviada (punto que puede ser localizado geoméricamente por ser el origen directo del haz divergente de luz que entra en el ojo). <p>D. Concebir el color con que vemos los objetos como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferencial de tres fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente, lo que supone (además de lo señalado en A):</p> <ul style="list-style-type: none">• D₁. Conocer la diferente sensibilidad de los fotorreceptores retinianos• D₂ Considerar que la luz "blanca" es de carácter heterogéneo (formada por muchos tipos de luz) al interpretar los fenómenos de difusión luminosa en los objetos iluminados. <p>E. Conocer los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos. Es decir:</p> <ul style="list-style-type: none">• E₁. Conocer que la imagen "nítida" y sin "bordes coloreados" se puede obtener geoméricamente de los sistemas ópticos cuando limitamos la luz incidente a un estrecho haz paraxial y cuando consideramos lentes delgadas.• E₂ Considerar que en la sensación de la visión participa en último término la mente y que el modelo de Kepler no puede explicar las ilusiones ópticas, algunos defectos de visión, ni la interpretación de lo que vemos.

Pero el análisis histórico y epistemológico no sólo nos permite justificar decisiones sobre qué problema elegir para organizar la enseñanza por investigación y cuál puede ser el objetivo a conseguir en un primer nivel, así como sus límites, sino que también nos permite identificar los obstáculos que hubo que superar hasta llegar a la solución dada por Kepler, las ideas que permitieron avanzar y las limitaciones y virtudes de las mismas. Dentro del modelo de enseñanza por investigación, cuya hipótesis básica es que el cambio conceptual debe ir acompañado del cambio metodológico y de la implicación actitudinal necesaria para que sea posible, donde "comprender" es poder justificar lo que se piensa, es lógico pensar que los obstáculos e ideas superadoras deben estar presentes en el diseño de la estructura de una unidad didáctica o plan de investigación en torno al problema planteado. En el cuadro 3.3 se muestran algunos de grandes obstáculos que históricamente/ lógicamente hubo/ hay que superar para elaborar esta teoría y aceptar sus ideas.

Aunque desde el punto de vista epistemológico caben pocas dudas de la conveniencia de tratar dichos obstáculos ya que la discusión sobre distintas alternativas favorecerá un conocimiento más justificado, podrá dudarse de que fuera necesario desde el punto de vista didáctico, simplemente porque dichos obstáculos históricos podrían no serlo para los estudiantes, que podrían conseguir el objetivo pretendido tratando las ideas "correctas" sin tener que contemplar precursores históricos. Parte de este trabajo, como ya indicamos en las intenciones iniciales, lo vamos a dedicar a probar la necesidad de que cualquier estrategia de enseñanza deberá contemplar la existencia de dichos obstáculos para que los estudiantes comprendan cómo vemos.

Cuadro 3.3: Obstáculos conceptuales y epistemológicos que previsiblemente hay que superar para comprender el modelo de visión de Kepler

<p>Obstáculos derivados de una concepción en la que no se relaciona el objeto, la luz emitida por él y el ojo como receptor de la misma para que sea posible la visión. Lo que se manifestará por creer que:</p> <ul style="list-style-type: none">- EL ojo no es un receptor de luz, bien por pensar que "algo" es emitido por el ojo (por lo que se podrá aceptar que se vea en la oscuridad total) o que el objeto emite una imagen hasta él- No es necesario que los objetos que vemos sean fuentes de luz- Sólo existe luz en las fuentes luminosas o en sus proximidades, por lo que no se considera una entidad física independiente en el espacio <p>Obstáculos derivados de no disponer de un esquema de representación geométrica idealizado de la luz. Lo que se manifestará por:</p> <ul style="list-style-type: none">- Creer que la luz o los rayos de luz se ven. No considerar el rayo de luz como una invención sin entidad material, ni color, ni asimilable a los halos de luz que se ven alrededor de las fuentes primarias- No modelizar las fuentes luminosas extensas como conjuntos de fuentes puntuales emisoras de luz en todas las direcciones, ni trazar haces divergentes de luz desde cada punto de la fuente luminosa- No utilizar las consecuencias geométricas de la propagación de la luz para predecir fenómenos ópticos <p>Obstáculos derivados de concebir la imagen óptica como una emanación del objeto. Lo que se manifestará por:</p> <ul style="list-style-type: none">- Creer que la imagen se traslada "ya hecha" desde el objeto o que los rayos son portadores de cada uno de los puntos de la imagen- No considerar al ojo como un instrumento óptico formador de imágenes, por lo que se creía que la imagen tiene existencia independientemente del ojo <p>Obstáculos derivados de no concebir el color como una sensación. Lo que se manifestará por:</p> <ul style="list-style-type: none">- No considerar el carácter heterogéneo de la luz "blanca"- No interpretar la sensación de color a partir de la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente, por lo que asignarán el color a una propiedad del cuerpo o de la luz que refleja o, simplemente, lo ilumina <p>Obstáculos derivados de no conocer los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos</p> <ul style="list-style-type: none">- Desconocen el campo de aplicabilidad de la óptica geométrica (aproximación paraxial)- No considerar que en la sensación de la visión participa en último término la mente (ilusiones ópticas, interpretación de lo que vemos, ...)
--

El hallazgo de estos obstáculos conceptuales y epistemológicos que es necesario superar para poder comprender *¿cómo vemos?* según el modelo de visión de Kepler viene avalado por los resultados de investigaciones didácticas recientes.

Así, Andersson y Bach (2004) recomiendan que para mejorar la enseñanza de la óptica geométrica es necesario prestar atención a algunos aspectos claves:

- *Clarificar que la luz que se propaga entre las fuentes y los efectos no puede ser vista*
- *Establecer la idea clave de la óptica de que la visión se explica por la luz que entra en el ojo procedente del objeto que es visto*
- *Introducir técnicas para demostrar la trayectoria de la luz y avisa que si estas técnicas se introducen durante las primeras lecciones, los estudiantes pueden conseguir fácilmente la impresión de que la luz se ve propagándose por el espacio, es decir, que la visión es una capacidad separada que no depende de la luz que entra en el ojo sino algo del ojo que mira, enviando algo etc.*
- *Introducir técnicas geométricas para la formación de la imagen, según las cuales cuando un estrecho cono de luz que diverge de un punto P de un objeto y, debido a la refracción o a la reflexión, se concentra otra vez en otro punto P_1 , una imagen de P aparece en P_1 , y la idea correspondiente para las imágenes virtuales*

Parecidas indicaciones advierten Buty et al., (2004), cuando al plantearse herramientas de diseño y análisis de secuencias de enseñanza, para el caso de la óptica geométrica señalan la necesidad de prestar atención al siguiente conocimiento de la "vida diaria" para el que hay que diseñar instrumentos didácticos a fin de construir el correspondiente conocimiento físico:

- *La concepción de la imagen entera que viaja desde el objeto de donde es emanada.*
- *Respecto a la representación geométrica de la luz, el objeto y la imagen son considerados globalmente y no modelizados como conjuntos de puntos luminosos.*

En el cuadro 3.4 presentamos un compendio de la información de este apartado.

Cuadro 3.4: META ORIENTADORA, PROBLEMA Y SUBPROBLEMAS ESTRUCTURANTES, PASOS NECESARIOS Y OBSTÁCULOS ASOCIADOS. "¿CÓMO VEMOS? ¿CÓMO PODEMOS VER MEJOR?"

META ORIENTADORA (U OBJETIVO CLAVE)	
Ser capaz de explicar cómo vemos, tanto en visión directa como en visión indirecta (al mirar a los espejos, a través de lentes, cuando el objeto y el ojo se encuentran en medios distintos, etc.) apropiándose del modelo de Kepler. Lo que supondrá adquirir un conocimiento con poder explicativo, con el cual se puedan hacer y probar predicciones, comprender y diseñar instrumentos, y, por tanto, con sentido en sí mismo.	
PROBLEMA ESTRUCTURANTE	SUBPROBLEMAS ESTRUCTURANTES
¿Cómo vemos? ¿Qué es necesario para que veamos bien? ¿Cómo podemos ver mejor?	¿Cómo explicar la visión indirecta, cuando vemos los objetos al mirar a un espejo o cuando están sumergidos,...? ¿Cómo explicar y corregir las anomalías visuales?
METAS PARCIALES (PASOS NECESARIOS) Y OBSTÁCULOS ASOCIADOS	
<p>A. Concebir la visión a partir de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo. En el que el objeto es una fuente luminosa, la luz una entidad independiente en el espacio y el ojo un receptor de luz.</p> <p>Posibles obstáculos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Creer que el ojo no es un receptor de luz, bien por pensar que "algo" es emitido por el ojo (por lo que se podrá aceptar que se vea en la oscuridad total) o que el objeto emite una imagen hasta él - No considerar que los objetos que vemos sean fuentes de luz. - Pensar que sólo hay luz sólo en las fuentes luminosas o en sus proximidades, por lo que no se considera una entidad física independiente en el espacio. <p>B. Disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo, según el cual los rayos son conceptos ideales no visibles (ni la propia luz), que desde cada fuente puntual la luz es emitida en todas las direcciones (esféricamente y un haz de luz es parte de la esfera de luz emitida) y que las fuentes luminosas extensas (primarias o secundarias) se pueden idealizar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.</p>	

<p>Posibles obstáculos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Creer que la luz o los rayos de luz se ven. No considerar el rayo de luz como una invención sin entidad material, ni color, ni asimilable a los halos de luz que se ven alrededor de las fuentes primarias. - No modelizar las fuentes luminosas extensas como conjuntos de fuentes puntuales emisoras de luz en todas las direcciones, ni trazar haces divergentes de luz desde cada punto de la fuente luminosa. - No utilizar las consecuencias geométricas de la propagación de la luz para predecir fenómenos ópticos. <p>C. Conocer el concepto de imagen óptica del modelo de Kepler. Lo que supone considerar al ojo como un instrumento óptico en cualquier fenómeno óptico y formar la imagen óptica punto a punto a partir de haces de luz tanto en visión directa como indirecta.</p> <p>Posibles obstáculos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Creer que la imagen se traslada "ya hecha" desde el objeto o que los rayos son portadores de cada uno de los puntos de la imagen. - Creer que la imagen óptica existe independientemente del ojo <p>D. Concebir el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferencial de tres fotorreceptores retinianos. Lo que supone la necesidad de considerar el carácter heterogéneo de la luz "blanca"</p> <p>Posibles obstáculos(además de los señalados en A):</p> <ul style="list-style-type: none"> - No considerar el carácter heterogéneo de la luz "blanca" - No interpretar la sensación de color a partir de la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente, por lo que asignarán el color a una propiedad del cuerpo o de la luz que refleja o, simplemente, lo ilumina. <p>E. Conocer los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos.</p> <p>Posibles obstáculos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Desconocer el campo de aplicabilidad de la óptica geométrica (aproximación paraxial,...) - No considerar que en la sensación de la visión participa en último término la mente (ilusiones ópticas, interpretación de lo que vemos, ...)
--

3.4 Propuesta de una estructura problematizada para la unidad didáctica sobre “la luz y la visión” en la ESO

Ya hemos decidido justificadamente que el problema de ¿cómo vemos? está en el origen y fue el motor para la elaboración de una teoría sobre la luz y la visión (el modelo de Kepler) con suficiente capacidad explicativa y predictiva para que sea apropiada en este nivel de enseñanza. Ya hemos argumentado que este mismo problema, ¿cómo vemos?, ¿cómo podemos ver mejor? puede ser, también, el origen de los conocimientos que queremos que aprendan nuestros alumnos.

Pero una enseñanza problematizada debe contemplar, además de ese problema estructurante, una estrategia lógica para abordarlo. Desde el punto de vista histórico y lógico podemos, también, orientar el diseño de esta estrategia, ya que sabemos que se dieron las siguientes pautas:

- La superación de los “simulacros” emanados por los objetos para ser vistos o la emanación del fuego visual a partir de las experiencias de Alhazen por las que los objetos que vemos son considerados fuentes luminosas secundarias y, por tanto, la visión como un proceso que se produce cuando llega luz al ojo del observador.
- El sistema explicativo de la visión de Alhazen y de Kepler constaba de un sistema geométrico de representación de la luz (como una entidad física en el espacio) con el que explicar y predecir fenómenos ópticos.
- El estudio de las lentes permitió profundizar en el modelo de visión y modelizar el ojo como un instrumento óptico formador de imágenes, así como reformular el propio concepto de imagen óptica. Recordemos que el concepto de imagen óptica de Kepler tenía mas poder explicativo y predictivo que el de Alhazen ya que no sólo daba cuenta de las observaciones anómalas de los diámetros lunares obtenidas con la cámara oscura, sino que podía predecir dónde el ojo localiza la imagen que ve (por ejemplo al mirar a un espejo) sin recurrir a principios *ah hoc* empíricos, con sólo aplicar las consecuencias de la propagación de la luz y su propio concepto de imagen.
- El comportamiento geométrico de la luz: la propagación (esférica) rectilínea en todas las direcciones en los medios homogéneos, la reflexión

en los espejos, la refracción al cambiar de medio, la propia determinación de la rapidez de propagación, etc. no se formularon como hechos empíricos derivados de una determinada concepción de la naturaleza de la luz sino como hipótesis para explicar cómo vemos. La contrastación de cada uno de estos comportamientos y determinaciones se realizó, pues, por la coherencia interna de la teoría que explica cómo vemos.

- El programa de investigación que condujo a la elaboración de una teoría que explicara cómo vemos no fue una consecuencia del conocimiento previo de la naturaleza de la luz. Sólo cuando se tenían explicaciones suficientemente coherentes y universales a los fenómenos ópticos, se modelizó el ojo como un instrumento óptico y se establecieron los límites de la validez de la óptica geométrica los científicos se plantearon el problema de la naturaleza de la luz como objeto de sus investigaciones.

Pensamos que la estructura problematizada de la unidad didáctica sobre “la luz y la visión” en la ESO debe contemplar, además del planteamiento del problema ¿cómo vemos?, la estrategia lógica que se deriva de las pautas anteriores. En resumen, esta estrategia debe contemplar:

- A.** Plantear el problema ¿cómo vemos? como origen de una teoría geométrica de la luz y la visión y organizar la enseñanza en torno a él.
- B.** Establecer la necesidad de que llegue luz al ojo para que se produzca la visión, antes de abordar el estudio de los fenómenos ópticos.
- C.** Elaborar un sistema de representación geométrico idealizado de la luz.
- D.** Modelizar el ojo como un instrumento óptico formado por una lente y una pantalla con el que conceptualizar la imagen óptica.
- E.** Considerar la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción como hipótesis formuladas para explicar la visión y no como consecuencias de una determinada concepción de la naturaleza de la luz.
- F.** Poner a prueba el modelo de visión elaborado explicando la visión directa e indirecta y diseñando o “imaginando” instrumentos ópticos.
- G.** Plantear los límites de aplicación de la teoría geométrica de la visión.

Estas reflexiones, unido a la conveniencia de contemplar los obstáculos conceptuales y epistemológicos que se debieron y deben superar para que sean aceptadas las nuevas ideas de esta teoría de la luz y la visión, nos permiten

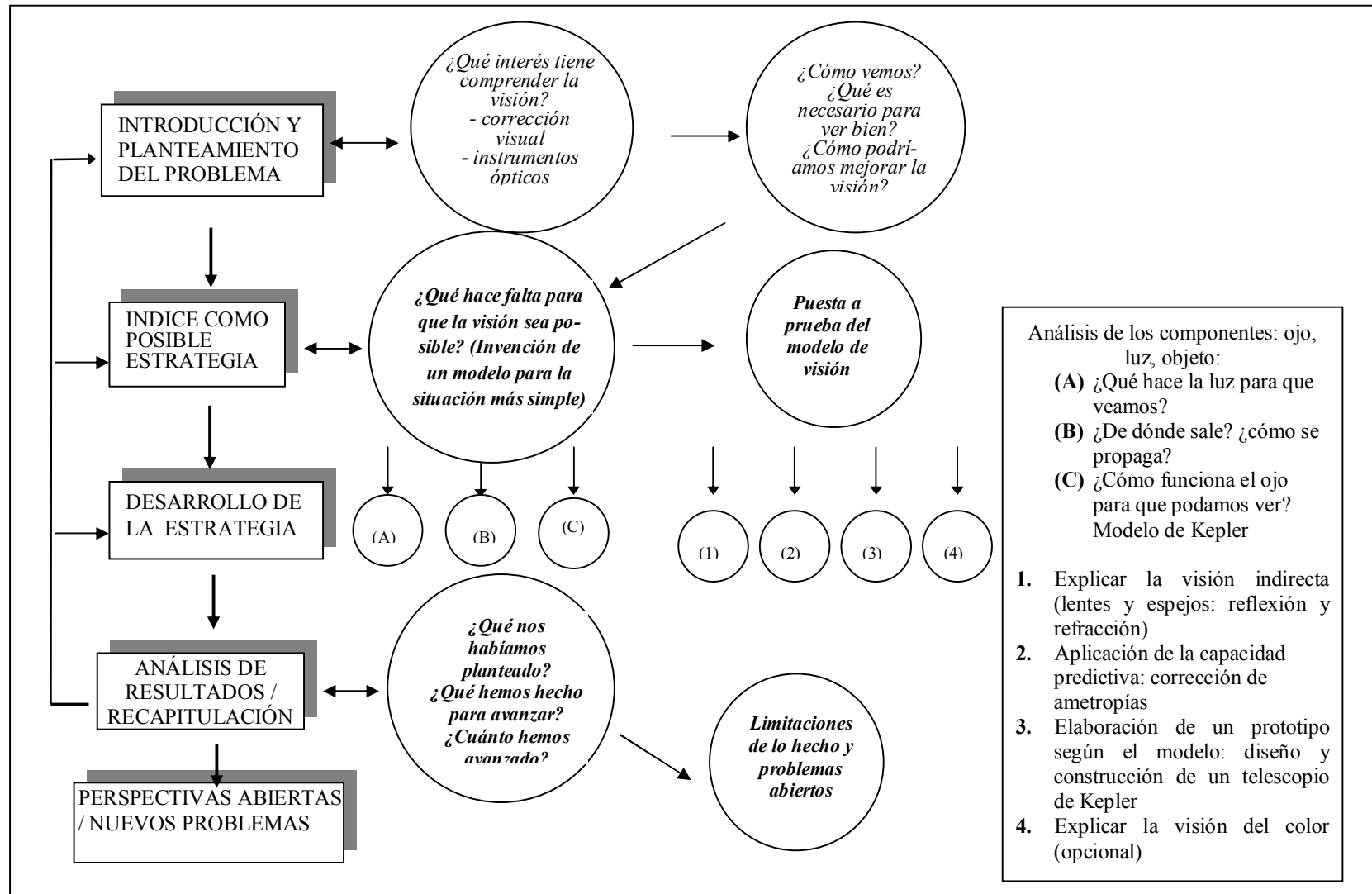
proponer, a modo de hipótesis, una estructura problematizada de la unidad didáctica que contenga el objetivo clave, el problema estructurante, la estrategia a seguir para avanzar en la solución del problema planteado, los objetivos más concretos o metas parciales para la comprensión de cómo vemos y que tengan en cuenta los obstáculos asociados. En el cuadro 3.5 presentamos la estrategia (o índice con una lógica problematizada) y en el gráfico 3.1 presentamos el gráfico de estructura problematizada que se interpreta por sí mismo y cuya confección hemos encontrado muy útil para planificar y para favorecer las recapitulaciones y la orientación de los alumnos y profesores en el aula

En la medida que el estudio empírico posterior muestre, que tanto antes como después de la instrucción, esos obstáculos a la comprensión de los objetivos o metas parciales están en la base de las dificultades que los estudiantes tienen para explicar los fenómenos ópticos, estaremos validando esta estructura. No obstante, su contrastación definitiva requerirá, al menos, del desarrollo completo de la secuencia de actividades, del sistema de evaluación, de la puesta a prueba en el aula y de la comparación con la enseñanza habitual a partir de los indicadores de lo que supone una buena comprensión de la "luz y la visión" en estos niveles de enseñanza.

Cuadro 3.5: "Luz y visión". Objetivo clave, problema estructurante y estrategia para avanzar

<p>Objetivo clave (¿Qué nos gustaría que los alumnos hubieran aprendido al final?)</p> <p>Conseguir que los alumnos se apropien de una concepción de cómo se produce la visión humana que permita explicar cómo vemos directa e indirectamente (con espejos, lentes,...) los objetos y comprender y diseñar instrumentos para mejorar la visión.</p> <p>Problema estructurante</p> <p>¿Cómo vemos?: ¿qué es necesario para que veamos bien?, ¿cómo podríamos mejorar la visión?</p> <p>Estrategia lógica para avanzar en el problema planteado</p> <p>Una posible forma de avanzar en el problema planteado podría consistir en abordar preguntas parciales cómo:</p> <ol style="list-style-type: none">0. ¿Qué interés tiene abordar el problema de la visión? (mejora de la calidad de vida: corrección de defectos visuales, construcción de instrumentos ópticos,...)1. ¿Qué hace falta para que la visión sea posible? Análisis de los componentes que participan en la visión: ojo, luz y objeto<ol style="list-style-type: none">1.1 ¿Qué hace la luz para que podamos ver?<ol style="list-style-type: none">1.1.1 ¿De dónde sale? (Las fuentes primarias y secundarias, puntuales y extensas,...)1.1.2 ¿Cómo se propaga? (velocidad de propagación, sombras y penumbras como consecuencia de su propagación,...)1.2 ¿Cómo funciona el ojo para que podamos ver?<ol style="list-style-type: none">1.2.1 Estudio anatómico del ojo1.2.2 Modelización del ojo humano como un sistema lente-pantalla. Concepto de imagen1.3 Recapitulación2. Puesta a prueba del modelo de visión<ol style="list-style-type: none">2.1 ¿Cómo explicar lo que vemos al mirar a espejos planos? ¿Cómo se comporta la luz en estas situaciones? Diseño y realización de experiencias2.2 ¿Cómo explicar lo que vemos al mirar a los objetos sumergidos en agua? ¿Cómo se comporta la luz en estas situaciones? Diseño y realización de experiencias2.3 ¿Cómo explicar lo que vemos al mirar a través de lentes convergentes delgadas?2.4 ¿Cómo diseñar instrumentos para mejorar la visión?: ¿cómo hacer que los objetos lejanos los veamos cerca? Diseño y construcción de un telescopio de Kepler2.5 ¿Cómo corregir los defectos visuales?2.6 ¿Cómo explicar la visión del color? (opcional)3. Recapitulación: limitaciones de la óptica geométrica y del modelo de visión4. Problemas abiertos

Gráfico 3.1: Estructura problematizada del tema: ¿Cómo vemos? ¿Cómo podemos ver mejor?"



Una vez elaborada la "estructura gruesa" del tema, es necesario concretar una secuencia de actividades para proponer a los alumnos, esto es, un plan concreto de investigación o "programa-guía" que haga que existan oportunidades reiteradas de aplicar las características genuinas de la estructura problematizada: formulación y puesta a prueba de las ideas, realización de recapitulaciones, actividades prácticas para someter a prueba esas ideas ... y, también, como señalan Viennot y Chauvet (1997), actividades para atacar directamente los posibles obstáculos que puedan tener los alumnos para avanzar con comprensión. Para ello disponemos de la identificación de las metas parciales o pasos necesarios y de los obstáculos previstos para hacer posible su consecución que ya hemos presentado.

Ahora bien, antes de la puesta en práctica de la secuencia de actividades en el aula, consideramos necesario (como hemos señalado en los cuadros de preguntas-guía del estudio histórico-epistemológico) realizar un estudio empírico sobre la relevancia didáctica de las metas y obstáculos previstos. En primer lugar, para valorar en qué medida existen y persisten los obstáculos antes y después de la enseñanza habitual. En caso de encontrar una gran persistencia significaría que la atención prestada a dichas metas y obstáculos puede producir mejoras sensibles en el aprendizaje. En segundo, para obtener información de primera mano de razonamientos, dibujos, creencias de los alumnos que no han superado dichos obstáculos, de manera que podamos generar oportunidades para que se expliciten y salgan a discusión y debate en el aula. Y, por último, para tener una referencia con la que comparar el efecto producido por nuestra propuesta.

Presentamos, pues, el estudio empírico que hemos realizado con este fin en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4

¿EN QUÉ MEDIDA LA PLANIFICACIÓN ELABORADA PARA LA ENSEÑANZA DE LA LUZ Y LA VISIÓN CON UNA ESTRUCTURA PROBLEMATIZADA ES DIDÁCTICAMENTE RELEVANTE?

4.1 Formulación y justificación de la primera hipótesis

Hemos visto como el estudio histórico y epistemológico nos ha permitido extraer consecuencias útiles para la organización de la enseñanza de la "luz y la visión", así, en el capítulo anterior, hemos podido ofrecer respuestas a algunos de los interrogantes que planteábamos en la introducción de este trabajo y que son necesarias para planificar la enseñanza y proponer una estructura problematizada de una unidad didáctica. Estos interrogantes eran:

- *¿Qué problemas están en el origen de las teorías que queremos que pasen a formar parte de la forma de pensar de nuestros alumnos? Y, para organizar la enseñanza,*
- *¿Qué problema se puede plantear para organizar la estructura del tema en torno a él? Y, suponiendo un ambiente que suministre oportunidades para la apropiación de la epistemología científica,*
- *¿Qué estrategia, índice o plan de investigación se debería seguir para avanzar en la solución al problema planteado? ¿Cómo planificar la evaluación para que oriente e impulse la buena marcha de la investigación?*

Pero poder plantear la organización y la estructura problematizada de una unidad didáctica sobre la luz y la visión en la ESO ha supuesto conocer en profundidad, histórica y epistemológicamente, la teoría que queremos que pase a formar parte del modo de pensar y de proceder de nuestros alumnos. Este estudio ha hecho posible plantear el problema *¿cómo vemos?* como problema estructurante de la unidad didáctica, una estrategia lógica para avanzar en su resolución y, a la vez, hemos identificado las metas parciales o indicadores de comprensión de *¿cómo*

vemos? de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, así como los obstáculos conceptuales y epistemológicos que previsiblemente hay que superar para que este modelo pueda ser aceptado y utilizado funcionalmente (cuadro 3.4, pag. 83). Pero, además, el conocimiento en profundidad de este modelo deberá permitir según la planificación propuesta, completar la secuencia de actividades del tema (la estructura fina) y el sistema de evaluación.

El protocolo que hemos seguido para planificar la enseñanza con una estructura problematizada, no sólo permite disponer de la estructura gruesa de la secuencia didáctica, sino que también hace posible realizar un estudio empírico con el que contrastar nuestras previsiones y obtener información de primera mano, valiosísima, para la elaboración justificada de la estructura fina. La concreción y el diseño de esta secuencia de actividades completa de la unidad didáctica y del sistema de evaluación requieren que se contemplen las posibles ideas y razonamientos de los estudiantes, etc. Este estudio empírico deberá, pues, aportar información sobre:

- Evidencia del tipo de razonamientos usados a fin de que se puedan proponer actividades que activen otros razonamientos de naturaleza no arbitraria para explicar los fenómenos.
- Ejemplos de actividades que sirvan de contraejemplos a los razonamientos espontáneos.
- Sugerencias sobre qué diseños prácticos y tecnológicos se pueden realizar para profundizar en los conceptos clave, mejorar la actitud hacia el aprendizaje de las ciencias, despertar el interés, integrar a los alumnos "perdidos", ...
- El diseño de un sistema de evaluación apropiado que evite los posibles obstáculos y oriente e impulse al aprendizaje.
- ...

La hipótesis que estructura y orienta este estudio empírico, la formulamos en la forma:

- *"Las metas parciales y los obstáculos identificados para la comprensión de cómo vemos de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, son relevantes para la mejora didáctica"*

Particularizaremos el alcance de la "relevancia didáctica" a la que hacemos referencia con dos derivaciones al afirmar que si nuestra hipótesis es cierta esperamos encontrar que:

H_{1.1}. Los alumnos tienen ideas y razonamientos sobre las metas parciales necesarias para comprender cómo vemos similares a los obstáculos recogidos en el cuadro 3.4, que deben contemplarse si deseamos que se apropien del modelo de visión de Kepler.

H_{1.2}. La enseñanza habitual no contempla los obstáculos detectados en el estudio histórico y epistemológico y tiene un carácter marcadamente empirista y aproblemático

En primer lugar, queremos señalar que al derivar del estudio histórico realizado el conjunto de obstáculos que previsiblemente tendrán los estudiantes, estamos estableciendo un paralelismo entre sus ideas intuitivas y las mantenidas en algún momento de la historia de la ciencia. En opinión de Matthews (1994) esta ha sido un área de investigación derivada de las ideas defendidas por Piaget en su Epistemología Genética, o de la tesis Kuhn según la cual la "*ontogenia cognitiva recapitula la filogenia científica*". Algunos ejemplos son los trabajos recopilatorios de Gunstone y Watts (Cap. 5 de Driver et al. 1989) sobre la asociación de fuerza y movimiento o el de Furió et al. (1987) sobre las concepciones de los gases, etc.

Por otro lado, no partimos de cero: numerosos trabajos de investigación didáctica sobre las concepciones alternativas de los estudiantes en el campo de la óptica geométrica pueden ser interpretados como consecuencia de la existencia de estos obstáculos en el pensamiento de los estudiantes. Algunas de las investigaciones acerca de las concepciones de los alumnos sobre la imagen óptica y la visión así lo muestran y permiten fundamentar nuestra hipótesis.

Diversos autores (Andersson y Karrquist 1983, Collis et al.1998, , 1989, La Rosa et al. 1984, Osborne et al. 1993, Saxena 1996, Selley 1996a, 1996b, Viennot y Chauvet, 1997 etc.) han señalado la existencia de modelos de visión alternativos a partir de los cuales los alumnos interpretan la visión sin necesidad de que llegue luz al ojo procedente del objeto y sin tener un esquema de representación de la luz geométrico e idealizado.

También se ha mostrado la existencia y persistencia de ideas alternativas a la visión del color, aunque estas están íntimamente relacionadas con el modelo con que se interprete la visión. Difícilmente se puede achacar la sensación de color, por ejemplo, al tipo de luz que incide en el ojo si se interpreta la visión suponiendo que "algo" sale del ojo. Básicamente, los alumnos interpretan el color como una propiedad del objeto o de la luz que los ilumina y, en ocasiones, la gama de colores son una consecuencia de la mezcla luz y oscuridad (Andersson y Karrquist, 1983; Feher, y Rice, 1992; Salinas y Sandoval, 1994, etc.)

Otros autores han mostrado la existencia de concepciones alternativas sobre la imagen óptica que se muestran inalteradas después de la instrucción:

- Goldberg y McDermott (1987) han investigado las ideas de los estudiantes del curso introductorio de Física de la Universidad sobre el comportamiento de las lentes convergentes y la imagen que se ve en una pantalla y han constatado que un elevado porcentaje de estudiantes piensa que la imagen sigue existiendo aunque se elimine la pantalla, que se seguiría viendo aunque se aleje la pantalla y que se vería la mitad si se tapara media lente.
- Galili (1996), agrupa las ideas de los estudiantes que han investigado Goldberg y MacDermott y él mismo en dos tipos de esquemas de pensamiento:
 - Esquema ingenuo de pensamiento, o de "imagen holística" característico de los alumnos antes de la instrucción, ontológicamente similar a la teoría de los filósofos atomistas griegos (Galili y Hazan, 2000a, 2000b).
 - Esquema de conocimiento del novato o "de imagen proyectada", ontológicamente similar a la teoría de Alhazen (Galili y Hazan, 2000a, 2000b).

De estos esquemas de pensamiento se derivan, lógicamente, las respuestas de los estudiantes a las distintas cuestiones que planteaban Goldberg y McDermott. Este tipo de razonamiento común es coherente con la tendencia de los estudiantes a materializar los conceptos de la física que ha señalado L. Viennot (2002) a propósito de las ideas alternativas relativas al concepto de imagen óptica.

- Por otro lado, Viennot y Kaminski (1991) han señalado la existencia de una "ilusión" escolar al creer que el aprendizaje de los procedimientos

algorítmicos conlleva la comprensión de los conceptos, por lo que parece intuirse que la enseñanza habitual, basada fundamentalmente en la repetición de algoritmos geométricos de construcciones de imágenes, no permite superar las dificultades señaladas a la comprensión de la imagen óptica.

4.2 Operativización de la primera hipótesis

Para contrastar cada una de estas derivaciones de la hipótesis recurriremos, obviamente, a las metas parciales y el conjunto de obstáculos asociados para comprender el modelo de visión de Kepler que hemos derivado del estudio histórico y epistemológico. Por otro lado, hay que resaltar que en la medida que el alcance de la relevancia didáctica a la que se refiere nuestra hipótesis está referido a la enseñanza habitual, nuestro protocolo de elaboración de temas con una estructura problematizada provee también de una herramienta para el análisis y evaluación de sus carencias y, por tanto, para plantear la necesidad de elaboración propuestas alternativas.

Vamos a describir de un modo más pormenorizado cada una de estas derivaciones, lo que permitirá profundizar en las mismas y deducir consecuencias más detalladas y precisas.

En la primera derivación de la hipótesis ($H_{1.1}$) habíamos afirmado que “*Los alumnos tienen ideas y razonamientos sobre las metas parciales necesarias para comprender cómo vemos similares a los obstáculos recogidos en el cuadro 3.4, que deben contemplarse si deseamos que se apropien del modelo de visión de Kepler*”. Lo que permite extraer dos consecuencias contrastables:

$H_{1.1.1}$ Que dichos obstáculos existirán en los estudiantes de ESO antes de la enseñanza.

$H_{1.1.2}$ Que esos obstáculos persistirán en los estudiantes de diferentes niveles después de la instrucción habitual en óptica geométrica.

En primer lugar, si nuestra intención es verificar que los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler existen en los estudiantes antes de la enseñanza y persisten a la instrucción habitual, la operativización de esta

primera derivación de la hipótesis la haremos a partir de los obstáculos que hemos señalado en el capítulo anterior y que recogemos en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Operativización de H_{1.1}

Para comprender cómo vemos, de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, es necesario:	Sin embargo, los estudiantes de ESO antes de la enseñanza y los estudiantes de distintos niveles después de la instrucción habitual en óptica geométrica:
A. Concebir la visión a partir de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo	<ul style="list-style-type: none"> • Al interpretar la visión, no consideran al ojo receptor de luz. • No consideran que los objetos que vemos sean fuentes de luz. • Creen que sólo existe luz en las fuentes luminosas o en sus proximidades, por lo que no se la considera una entidad física independiente en el espacio.
B. Disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo	<ul style="list-style-type: none"> • Creen que la luz o los rayos de luz se ven. • No modelizan las fuentes luminosas extensas como conjuntos de fuentes puntuales emisoras de luz en todas las direcciones ni trazan haces divergentes de luz desde cada punto de la fuente luminosa. • No utilizan las consecuencias geométricas de la propagación de la luz para predecir fenómenos ópticos.
C. Conocer el concepto de imagen óptica del modelo de visión de Kepler	<ul style="list-style-type: none"> • Creen que la imagen se traslada “ya hecha” desde el objeto o que los rayos son portadores de cada uno de los puntos de la imagen. • Creen que la imagen óptica existe independientemente del ojo.
D. Concebir el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferencial de tres fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente	<ul style="list-style-type: none"> • No consideran el carácter heterogéneo de la luz “blanca”. • No relacionan la sensación de color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente.
E. Conocer los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos¹	<ul style="list-style-type: none"> • Desconocen el campo de aplicabilidad de la óptica geométrica. • No consideran que en la sensación de la visión participa en último término la mente (ilusiones ópticas, interpretación de lo que vemos, ...).

Para operativizar de la segunda derivación de nuestra hipótesis (H_{1.2}), que hace referencia a que “*La enseñanza habitual no contempla los obstáculos detectados en el estudio histórico y epistemológico y tiene un carácter marcadamente empirista y aproblemático*”, extraemos tres consecuencias contrastables, ya que esa afirmación se manifestará por:

¹ Los obstáculos a esta meta parcial únicamente serán requeridos a los estudiantes después de la enseñanza habitual

H_{1.2.1}. Los profesores de Física y Química y los libros de texto presentan carencias que afectan a la comprensión de aspectos claves del modelo de visión de Kepler. Lo que se pondrá de manifiesto si encontramos que algunos de los obstáculos clave que hemos identificado para su comprensión se derivan de las explicaciones de los libros de texto y forman parte de la forma de pensar de los profesores que incluso no reconocen su existencia. Es decir, los profesores y los libros de texto expresarán ideas y razonamientos consecuencia de:

- No disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo. Lo que se manifestará por:
 - No señalar que la luz y los rayos no son visibles
 - No modelizar las fuentes luminosas extensas como conjuntos de fuentes puntuales emisoras de luz en todas las direcciones ni trazar haces divergentes de luz desde cada punto de la fuente luminosa.
- No utilizar el concepto de imagen óptica del modelo de visión de Kepler. Lo que se manifestará por:
 - Formar la imagen a partir de rayos que parecen ser portadores de cada uno de los puntos de la imagen.
 - Representar la imagen óptica sin hacer referencia al ojo del observador, pareciendo dar a entender que su existencia es independiente del ojo del observador.
- No concebir el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferencial de los fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente, lo que se manifestará por:
 - Usar un lenguaje en el que asignan el color a una propiedad de la luz sin que sean matizadas expresiones coloquiales.
 - No relacionar el color con la respuesta al tipo de luz de los fotorreceptores retinianos.

H_{1.2.2}. Los profesores de Física y Química y los libros de texto presentan la enseñanza habitual de la óptica geométrica de forma empirista y aproblemática.

Esta presentación aproblemática se pondría de manifiesto por no tener las características de la estructura problematizada que hemos elaborado. En concreto, esperamos que los libros de texto y los profesores de Física y Química

no propongan los indicadores siguientes, característicos de la estructura problematizada para la secuencia de enseñanza de la óptica geométrica:

1. Plantear el problema de “cómo vemos” como origen de la teoría geométrica de la luz y la visión, o cualquier otro que pueda originar un proceso de construcción racional del modelo de visión.
2. Proponer actividades para mostrar el interés del estudio que se va a realizar (su relevancia histórica, su influencia tecnológica, la importancia en la salud, etc.).
3. Plantear una secuencia de apartados que responda a una lógica problematizada, es decir, hacer referencias a alguna de las siguientes pautas:
 - 3.1 Establecer la necesidad de que llegue luz al ojo para que se produzca la visión, antes de abordar el estudio de los fenómenos ópticos.
 - 3.2 Explicitar un sistema de representación geométrico idealizado de la luz, en donde se explica el significado del rayo y del haz luminoso, etc,...
 - 3.3 Elaborar un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica.
 - 3.4 Considerar la propagación rectilínea, la reflexión o la refracción de la luz como hipótesis formuladas para explicar la visión y no como leyes empíricas sin relación con la visión.
4. Prestar atención a los obstáculos que pueden impedir la comprensión de los conceptos implicados el modelo de visión de Kepler.

Por último, si queremos probar que la enseñanza habitual no contempla los obstáculos detectados en el estudio histórico y epistemológico y tiene un carácter marcadamente aproblemático, un corolario de esta derivación sería que las actividades que se proponen en los exámenes de selectividad deben reflejar estas características. Es decir:

H_{1.2.3}. Las pruebas de selectividad son coherentes con el tipo de enseñanza a la que van dirigidas, es decir, evocan una visión de la enseñanza aproblemática y empirista, a la vez que no prestan atención a los aspectos claves del modelo de

visión de Kepler. Lo que se pondrá de manifiesto si la mayoría de las cuestiones que se plantean:

- Solicitan respuestas de tipo numérico, algorítmico o memorístico.
- No soliciten respuestas relacionadas con el modelo de visión de Kepler, ni con la clarificación de los conceptos fundamentales de ese modelo.

4.3 Diseños experimentales para la contrastación de la primera hipótesis

4.3.1 Diseño experimental para obtener evidencias de la existencia y persistencia de los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler en los estudiantes.

En la primera derivación de la hipótesis ($H_{1.1}$) habíamos afirmado que “*Los alumnos tienen ideas y razonamientos sobre las metas parciales necesarias para comprender cómo vemos, similares a las recogidas en el cuadro 3.4, que deben contemplarse si deseamos que se apropien del modelo de visión de Kepler*”. Lo que permite extraer dos consecuencias contrastables:

$H_{1.1.1}$ Que dichos obstáculos existirán en los estudiantes de ESO antes de la enseñanza.

$H_{1.1.2}$ Que esos obstáculos persistirán en los estudiantes de diferentes niveles después de la instrucción habitual en óptica geométrica.

Para contrastar estas dos consecuencias de la primera derivación de la hipótesis hemos diseñado una colección de actividades (véase anexo 1 en pag. 373) que tratarán de encontrar evidencias de los distintos obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler. En esa colección de actividades hay algunas que intentan encontrar evidencia del mismo obstáculo, la conveniencia de usar una u otra estará en función de la muestra de alumnos a la que va destinada. Preferiremos cuestiones más cerradas para alumnos de ESO antes de la enseñanza y cuestiones más abiertas para estudiantes de ESO o de bachillerato después de la enseñanza.

Para probar la existencia y persistencia de estos obstáculos, hemos utilizado tres muestras de estudiantes cuyas características son:

- Muestra preinstrucción de ESO: 71 alumnos de ESO del Instituto de Enseñanza Secundaria "Luis García Berlanga" de San Juan de Alicante, 29 de 2º curso y 42 de 3º curso, entre 13 y 15 años de edad que no han recibido enseñanza de óptica geométrica durante esa etapa educativa. Los alumnos respondieron a las cuestiones planteadas en distintos grupos durante una sesión de clase al final del segundo trimestre del curso 2000-01. Para clarificar el significado de algunas respuestas la mitad de los alumnos de esta muestra, aproximadamente, fueron requeridos con posterioridad en entrevista individual.
- Muestra postinstrucción de ESO: 183 estudiantes de 2º curso de ESO (13-14 años), 98 alumnos del colegio privado "Jesús María" de Alicante que habían recibido enseñanza de óptica geométrica durante 12 sesiones de clase siguiendo la unidad didáctica contenida en el libro de texto de 2º de ESO de la editorial Oxford University (Barrio, 2003) durante el curso 2003-04 y 85 alumnos del Instituto de Enseñanza Secundaria "José Marhuenda Prats" de Pinoso (Alicante) que durante 18 sesiones del curso 2002-03 habían utilizado apuntes elaborados por los profesores. Las respuestas fueron recogidas después de haber terminado la enseñanza de esa unidad didáctica. Hay que mencionar que durante los años que hemos realizado esta investigación ha habido cambios en la legislación que afectaban al currículo de las materias científicas, quedando la óptica geométrica en 2º curso de ESO, cuando anteriormente figuraba en el tercer curso.
- Muestra postinstrucción de Bachillerato: 59 alumnos matriculados en la asignatura de Física de 2º de bachillerato (17-19 años) de cuatro institutos públicos de la provincia de Alicante (IES de Castalla, IES Haygon e IES Canastell de San Vicente, e IES Figueras Pacheco de Alicante) durante el segundo trimestre del curso 2000-2001. Se procedió de idéntica forma a la muestra anterior. Los cuestionarios fueron contestados entre una semana y un mes después de haber terminado los estudios de óptica geométrica que forman parte del temario de la asignatura de Física.

No consideramos necesario precisar más detalles de las características de las muestras ya que como han investigado Perales y Nievas (1989), en el campo de la óptica geométrica, el análisis correlacional parece confirmar que existe independencia entre las variables sociales (sexo, tipo de residencia, estudios de los padres, ocupación,...) y las variables cognitivas (o tipo de respuestas ante

fenómenos de óptica) de los alumnos. Si acaso, destacar que una de las muestras post-instrucción se refiere a alumnos de entre 3 y 4 años más que los de antes de la enseñanza y con esos mismos años de formación en Física y Química, por lo que la contrastación de nuestra hipótesis con esta muestra es muy exigente.

En la colección de actividades a la que hacíamos referencia (véase anexo 1 en pag. 373) se abordan diferentes situaciones relacionadas con la visión y los fenómenos ópticos: cómo se interpreta la visión tanto al mirar directamente como indirectamente (al mirar a un espejo plano, a un objeto sumergido o a una pantalla), la luz como entidad independiente en el espacio, las fuentes secundarias de luz, la idealización de las fuentes de luz como conjunto de puntos luminosos, los esquemas de representación utilizados (si se ve la luz, cómo se representa,...) y la visión del color.

No obstante, hay que señalar que la formulación definitiva de estas cuestiones se hizo después de algunos ensayos realizados durante el curso 1998-99. El análisis de la idoneidad de las cuestiones se completó con entrevistas personales, tras las cuales se añadieron distractores en algunas cuestiones de opción múltiple o se modificó el enunciado. A pesar de esto, concluimos, como norma general y especialmente para los alumnos de 2º y 3º de ESO (13-15 años), que cada cuestión será leída una a una por el profesor investigador dejando un tiempo prudencial para su realización entre cada actividad y atendiendo personalmente las dudas que planteen los estudiantes. Después de completar el cuestionario los estudiantes dispusieron de unos diez-quince minutos extra para repasar, completar o modificar sus respuestas iniciales. El tiempo total para cada cuestionario en cada uno de los grupos de las diferentes muestras fue de una sesión de clase de 55 minutos aproximadamente, aunque algunos alumnos lo alargaron unos minutos más.

Fueron empleadas distintas agrupaciones de la colección de cuestiones del anexo 1, según la muestra a la que fuera dirigida:

- Para la muestra de alumnos de 2º y 3º de ESO (13-15 años) antes de la enseñanza el cuestionario denominado **C1-a** contiene 11 actividades codificadas desde C-1 a C-11.
- Para la muestra de alumnos de 2º y 3º de ESO (13-15 años) después de la enseñanza habitual el cuestionario **C2-a** contiene 7

actividades con los códigos: C-1.1, C-3, C-3.1, C-4, C-5-1, C-7.1 y C-11.

- Para la muestra de alumnos de 2º curso de bachillerato (17-19 años) después de la instrucción en el tema de óptica geométrica del programa de Física de ese curso, el cuestionario **C3-a** contiene 11 actividades con los códigos: C1.1, C-3, C-4, C-5, C-6, C-7, C-8, C-9, C-10, C-11, C-12.

En la tabla 4.2, se amplía la información reseñada en la tabla 4.1, señalando la forma en que se obtiene la evidencia buscada y el código de la actividad en cada muestra que ha sido utilizado para obtenerla.

Tabla 4.2: Códigos de las cuestiones utilizadas para obtener evidencias de la existencia y persistencia de obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler

Para comprender cómo vemos, de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, es necesario:	Sin embargo, los estudiantes de ESO antes y después de la enseñanza habitual en óptica geométrica:	Antes de la enseñanza	Después de la enseñanza habitual	
		ESO C1-a	ESO C2-a	BAC C3-a
A. Concebir la visión a partir de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo del observador.	A₁ . No consideran necesario que llegue luz al ojo procedente del objeto al interpretar la visión: <ul style="list-style-type: none"> - Para ver directamente - Para ver en un espejo - Para ver un objeto sumergido - Creen que es posible ver en total oscuridad 	C-1 C-7 C-8 C-2	C-1.1 C-7.1 -	C1.1 C-7 C-8 -
	A₂ . No consideran a los objetos iluminados fuentes luminosas, por lo que: <ul style="list-style-type: none"> - No señalan que los objetos emitan luz al ser iluminados - No citan objetos iluminados como ejemplos de fuentes luminosas 	C-3 -	C-3 C-3.1	C-3 -
	A₃ . No consideran la luz como una entidad física que viaja en el espacio, por lo que: <ul style="list-style-type: none"> - Creen que sólo existe luz en las fuentes luminosas o en sus proximidades - Creen que la luz desaparece cuando se apaga la fuente luminosa 	C-4a C-4b	C-4a C-4b	C-4a C-4b

Tabla 4.2 (continuación): Códigos de las cuestiones utilizadas para obtener evidencias de la existencia y persistencia de obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler

Para comprender cómo vemos, de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, es necesario:	Sin embargo, los estudiantes de ESO antes y después de la enseñanza habitual en óptica geométrica:	Antes de la enseñanza	Después de la enseñanza habitual	
		ESO C1-a	ESO C2-a	BAC C3-a
B. Disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo	B₁ . Creen que la luz o los rayos de luz se ven	C-5	C-5.1	C-5
	B₂ . No consideran las fuentes luminosas extensas como conjuntos de emisores puntuales			
	- Al explicar la visión directa de un objeto	C-1	C-1.1	C-1.1
	- Al representar la luz difundida por un objeto	C-3	C-3	C-3
	- Al explicar la visión de un objeto en un espejo	C-7	C-7.1	C-7
	- Al explicar la formación de la imagen en una pantalla	C-9	C-9	C-9
	B₃ . No representan haces de luz emitidos desde cada punto del objeto			
	- Al explicar la visión directa de un objeto	C-1	C-1.1	C-1.1
	- Al explicar la visión de un objeto en un espejo	C-7	C-7.1	C-7
	- Al explicar la visión de un objeto sumergido en agua	C-8	-	C-8
- Al explicar la formación de una imagen en una pantalla	C-9	C-9	C-9	
- Al predecir la sombra y penumbra	C-6	-	C-6	

Tabla 4.2 (continuación): Códigos de las cuestiones utilizadas para obtener evidencias de la existencia y persistencia de obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler

Para comprender cómo vemos, de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, es necesario:	Sin embargo, los estudiantes de ESO antes y después de la enseñanza habitual en óptica geométrica:	Antes de la enseñanza	Después de la enseñanza habitual	
		ESO C1-a	ESO C2-a	BAC C3-a
C. Conocer el concepto de imagen óptica del modelo de visión de Kepler	<p>C₁. Realizan trazados gráficos en los que la imagen se traslada "ya hecha" desde el objeto o que los rayos son portadores de cada uno de los puntos de la imagen ...</p> <ul style="list-style-type: none"> - Al mirar a un espejo - Al mirar hacia un objeto sumergido - Al mirar a una pantalla donde se ve la imagen formada por una lente convergente <p>▪ Como consecuencia consideran que la imagen que se ve en una pantalla:</p> <ul style="list-style-type: none"> - se mueve con la pantalla - existe aunque se quite la lente - se ve la mitad al tapar media lente <p>C₂. No consideran al ojo como un instrumento óptico formador de imágenes, por lo que:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No explican la percepción de la forma y el tamaño de los objetos que vemos a partir de la imagen retiniana - El ojo no participa como receptor de luz en los trazados gráficos de formación de la imagen en un sistema lente-pantalla 	C-7 C-8 C-9a	C-7.1 - C-9a	C-7 C-8 C-9a
		C-9b C-9c C-9d	C-9b C-9c C-9d	C-9b C-9c C-9d
D. Concebir el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferente de tres fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente	<p>D₁. No consideran el carácter heterogéneo de la luz "blanca"</p> <p>D₂. No relacionan el color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente</p>	C-11	-	C-11
		C-10	-	C-10
E. Conocer los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos	<p>E₁. Desconocen el campo de aplicabilidad de la óptica geométrica</p> <p>E₂. No consideran que en la sensación de la visión participa en último término la mente (ilusiones ópticas, interpretación de lo que vemos, ...)</p>	-	-	C-12
		-	-	C-12

Para completar el diseño experimental de la primera derivación de la hipótesis, analizamos a continuación las actividades utilizadas para la muestra de ESO antes de la enseñanza (Cuestionario **C1-a**), comentando, en algún caso, la actividad alternativa usada en alguna de las muestras post-instrucción. En cada una de las actividades del cuestionario los comentarios constan de:

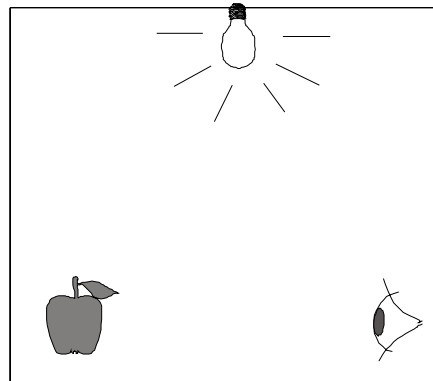
- Las aportaciones de la investigación didáctica que, además de ayudar al diseño de la cuestión, a veces, pueden ser una contrastación realizada por otro equipo investigador de alguno de los obstáculos que componen la hipótesis. Lo indicamos con el símbolo **(1)** al inicio de estas aportaciones.
- La interpretación de cada cuestión según la teoría de *Kepler ampliada*. La indicamos con el símbolo **(2)** al comienzo de la misma.
- El tipo de respuestas que esperamos encontrar si nuestra hipótesis fuera cierta. La indicamos con el símbolo **(3)**.

Cuestiones utilizadas para contrastar la existencia de obstáculos para la comprensión modelo de visión de Kepler relacionadas con aspectos básicos de la visión directa

C-1 En una habitación iluminada una persona ve una manzana.

a) Después de leer con atención las siguientes frases, señala con una **X** cuál es para tí la mejor explicación sobre cómo vemos la manzana:

- Vemos porque la miramos.
- Vemos porque el ojo envía “la mirada” hacia la manzana.
- Vemos porque de ella sale una imagen (o una especie de reflejo) que llega hasta el ojo.
- Vemos porque de ella sale una imagen y el ojo envía “la mirada”.
- Vemos porque la luz que sale de ella llega hasta el ojo.
- Si no estás de acuerdo con ninguna de las anteriores completa la frase: Vemos porque



b) Dibuja en el esquema anterior las líneas y rayos de luz que consideres necesarios para aclarar tus ideas.

(1) La enseñanza de los fenómenos ópticos y de la visión debe comenzar por elaborar un modelo que contemple la visión como un proceso en el que es

necesario que la luz que emite el objeto entre en el ojo del observador. Obviamente, la interpretación correcta de los fenómenos ópticos y del comportamiento de la luz que con ellos viene asociado no es posible sin disponer de un modelo de recepción adecuado. Por otro lado, el proceso de la visión es de gran complejidad al necesitar para su comprensión aportaciones de la Física, de la Biología, de la Fisiología, de la Química y de la Psicología. El debate histórico respecto de este proceso es buena prueba de esta complejidad y es de esperar, por tanto, la existencia de modelos alternativos, de sentido común, para explicar la visión.

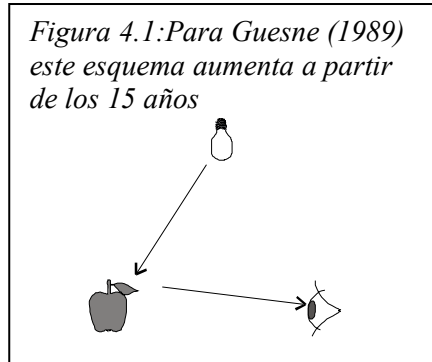
Las investigaciones didácticas de los últimos años han puesto de manifiesto que no debe suponerse la existencia de un modelo de recepción de luz en alumnos más jóvenes ni de estas edades (Andersson y Karrquist, 1983; La Rosa et al., 1984; Guesne, 1989; Monk, 1991; Osborne et al., 1993; Mohapatra et al., 1995; Selley, 1996b; Collis et al., 1998) Rice y Feher, 1987; Perales y Nievas, 1990, incluso tampoco en alumnos de bachillerato (Puey y Carcavilla, 1995; Galili y Hazan, 2000a ; Galili y Hazan, 2000b) o de segundo curso universitario (Salinas y Sandoval, 1994).

En la línea de trabajo de estos investigadores, durante el curso 1997-98 realizamos 14 entrevistas individuales a alumnos de 3º y 4º de ESO (14-16 años) en las que, entre otras cosas, se les invitaba a que realizaran un diagrama que incluyera el ojo para explicar cómo podían ver cualquier objeto, la mitad de ellos no consideró necesario enviar luz hasta el ojo y la cuarta parte, aunque sí dibujaba flechas hasta el ojo, también lo hacían con su "mirada" como flechas que salen del ojo (Martínez Torregrosa y Osuna, 1999).

Las opciones de respuesta que ofrecemos en esta cuestión son semejantes a las ideas alternativas encontradas por estas investigaciones aunque, para el caso de visión directa de los objetos, no suelen ofrecer la propuesta de "una imagen (o una especie de "reflejo" según es denominado frecuentemente por los estudiantes) viaja desde el objeto hasta el ojo para poder verlo". Esta idea presenta ciertas similitudes con el modelo de visión de emisión de "simulacros" atribuido a Demócrito y los atomistas. Es más, cuando Guesne (1989) y los otros investigadores citados opinan que la proporción de alumnos que suelen optar por modelos de recepción de luz es mayor a partir de los 15 años, suelen representar las ideas con el diagrama de la figura 4.1. Pero este esquema puede estar

enmascarando que aquello que viaja hasta el ojo es la "imagen o reflejo" del objeto visto y no necesariamente luz, por lo que estimamos conveniente su inclusión como una de las opciones de repuesta.

Los investigadores presentan la idea del movimiento de las imágenes desde el objeto hasta el ojo sólo cuando los alumnos se enfrentan a la visión de imágenes formadas por espejos o por lentes (Galili, 1996, Galili y Hazan, 2000a).

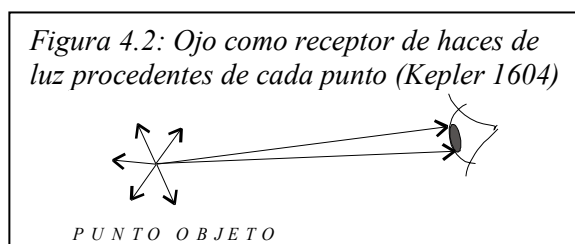


El apartado b) de esta cuestión intenta que los alumnos representen la idea manifestada, con lo que, además de conseguir dibujos típicos, reforzaremos la seguridad en nuestra interpretación de la opción elegida.

Selley (1996b) apunta que, en términos de coherencia con la experiencia familiar, los modelos de emisión o de "ojo activo", es decir, aquellos en los que el ojo "envía la mirada", pueden ser más avanzados que los modelos de recepción secundaria, en los que entra luz en el ojo procedente de los objetos que vemos, ya que tienen más poder de explicación de fenómenos cotidianos: sombras, perspectivas,..., y no necesitan una suposición "absurda" (como es la emisión secundaria de luz) que es contraria a la observación cotidiana. Incluso defiende la enseñanza del modelo de emisión cooperativa (cuando al objeto llegan luz de la fuente primaria y la "mirada" del ojo) en el caso de los alumnos más jóvenes (10-11 años) ya que satisface dos requerimientos:

- Ser un modelo psicológicamente de acuerdo con el esfuerzo que acompaña al acto de ver: dirigir la mirada y focalizar el objeto.
- Se infiere directamente de los experimentos simples que es el objeto, no el ojo, el que debe ser iluminado.

(2) El esquema básico sobre cómo un observador ve un objeto parte de una idea desarrollada por Kepler en 1604: los objetos que se ven son considerados como conjuntos de puntos emisores de luz y desde cada punto de un objeto, un haz divergente de luz debe penetrar en el ojo (Fig. 4.2) y



cada punto de la retina estará distintamente iluminado por cada punto del objeto (Cap. 5 de Ad Vitellionem Paralipomena). El sistema córnea-cristalino del ojo hace converger el haz de luz divergente hasta un punto de la retina y el sistema cerebro-ojo hace posible que el observador vea el punto en el origen del haz divergente.

El término "punto objeto" en óptica debe ser precisado: desde el punto de vista geométrico se trata de un punto matemático, desde el punto de vista fisiológico se trata del límite de resolución del ojo humano. Este límite está evaluado, en las mejores condiciones de contraste, como el de un objeto que subtende, desde el ojo, un ángulo de algo menos de $1'$, lo que equivale a un objeto de, aproximadamente, 1 mm situado a 5 m de distancia. Para la detección de este "punto" se necesita un conjunto de tres detectores retinianos (conos), lo que se ha venido a denominar píxel humano. Hablar del sistema ojo-cerebro como el encargado de ver los objetos es totalmente procedente ya que los 130 millones de detectores que existen en cada ojo humano "comunican" la información al cerebro mediante 1 millón de células nerviosas, por lo que es justo decir que parte de la información visual se procesa en el ojo (Huebner y Smith 1994).

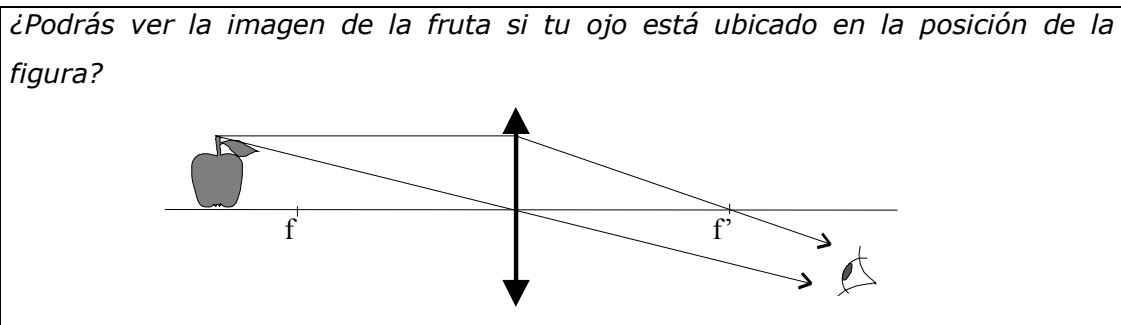
(3) No esperamos, en absoluto, que en los esquemas que realicen los alumnos de la muestra de ESO antes de la enseñanza, aparezcan haces divergentes de luz procedente de cada punto del objeto que se ve. El estudio de la dificultad que tienen los alumnos sobre la consideración de las fuentes luminosas como conjunto de fuentes puntuales será tratado expresamente en otras cuestiones. Esperamos, de acuerdo con nuestra hipótesis, una concepción de la visión en la que no es necesario que llegue luz procedente del objeto al ojo del observador.

La cuestión que hemos planteado para alumnos después de la enseñanza está redactada de forma abierta y solicita que, además de explicitar un modelo que explique cómo vemos un objeto, explique también que en el interior del ojo se forma una imagen, por la que reconocemos la forma o tamaño del objeto que vemos. la redacción es la siguiente:

- C-1.1** a) Explica cómo podemos ver un objeto.
b) Explica también por qué al ver un objeto reconocemos si es de mayor o menor tamaño, o si es de una forma u otra. Dibuja esquemas que ayuden a comprender tus razonamientos

(1) La mayoría de las investigaciones didácticas se han limitado a probar que los alumnos antes y después de la instrucción sostienen modelos de visión alternativos sin profundizar en la función del ojo como instrumento óptico y, sobre todo su relación con el concepto de imagen.

Salinas y Sandoval (1997) plantearon la siguiente cuestión a estudiantes argentinos de segundo curso de ingeniería que realizaban prácticas de óptica básica:



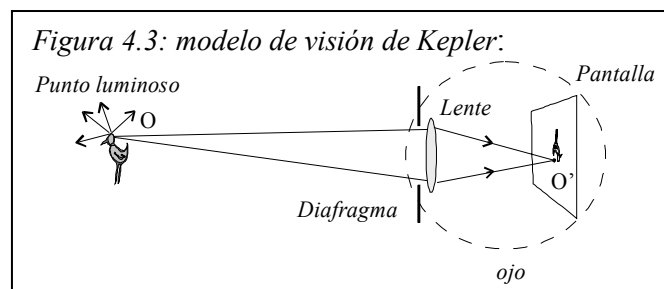
La mayoría de los estudiantes (24 de una muestra de 29) respondieron afirmativamente. Para justificar la respuesta, explicaron que al ojo llegan rayos provenientes del sistema óptico, sin tener en cuenta que esos rayos son convergentes. Para poder ver es necesario formar una imagen en la retina (pantalla del sistema óptico ojo) y esto sólo es posible, en un ojo emétrope, a partir de la entrada en él de un haz divergente de luz ya que el ojo tiene una potencia mínima determinada y la retina está situada en una posición fija.

En un ojo emétrope adaptado a la visión lejana, es decir, cuando el cristalino tiene la curvatura de mínima potencia, un haz de luz paralelo convergería en un punto de la retina. Si el haz que entra es convergente, con esa misma adaptación del cristalino, el punto imagen estaría situado antes de la retina y, sobre ella, incidiría un círculo de luz de mayor o menor diámetro. De no tratarse de algún ojo hipermétrope no es posible la visión nítida en este caso. Aunque no creemos que las investigadoras pretendan estas explicaciones por parte de los alumnos, sus respuestas muestran que, o simplemente el ojo no es un sistema formador de imágenes, o no conocen cómo ese sistema convergente forma la imagen en la retina.

(2) El tamaño de los objetos y la perspectiva eran percepciones explicadas fácilmente con el modelo de emisión del fuego visual. La explicación kepleriana a cómo vemos da respuesta a estos fenómenos considerando al ojo como instrumento óptico formador de imágenes, siendo el tamaño de esa imagen formada en la retina lo que justifica que diferenciamos el tamaño de los objetos y explique la perspectiva. Por otro lado, la formación de esta imagen retiniana está íntimamente relacionada con la explicación de la visión directa e indirecta ya que, en último término, la imagen siempre se forma en la retina del ojo. Por tanto, una adecuada comprensión de la visión y del propio concepto de imagen supone considerar al ojo como un instrumento óptico.

Como hemos comentado, la ciencia de la visión comienza a ser considerada la ciencia de la luz cuando Leonardo da Vinci, a partir de la teoría de Alhazen, desarrolla un modelo de ojo similar a una cámara oscura (Tarásov y Tarásova, 1985). Aunque hasta la teoría de Kepler no se obtiene una explicación aceptable del ojo como instrumento óptico, lo que queremos destacar aquí es que, para comprender la visión, es necesario considerar al ojo como un dispositivo formador de imágenes.

El modelo más elemental de instrumento óptico asimilable al ojo es un sistema formado por una lente convergente y una pantalla. Esta lente debe variar su potencia para que se forme la imagen en una pantalla situada a una distancia fija cuando el objeto se sitúa en un amplio margen de distancias (Fig 4.3).



(3) Para la resolución completa y correcta de la cuestión que proponemos es necesario conocer cómo se localiza la imagen en una pantalla, lo que abordaremos de forma más extensa en cuestiones posteriores, por ello, en esta primera actividad, las respuestas de los alumnos serán categorizadas según recurran o no a la idea del ojo como formador de imágenes. No obstante,

podremos detectar si, a pesar de la enseñanza, describen el proceso de la visión sin hacer referencia a la necesidad de que llegue luz al ojo.

Una consecuencia de la concepción en la que no es necesario que llegue luz al ojo es la posibilidad de ver en la oscuridad total, lo que se plantea en la siguiente cuestión.

C-2. Imagina una habitación cerrada en la que no hay ningún objeto luminoso, es decir, en **total oscuridad**. Señala con una **X** las afirmaciones que consideres correctas:

- Se pueden ver los ojos de algunos animales (gatos, búhos,...).
- Se pueden ver los objetos muy pulidos (espejos, metales,...).
- Se puede ver pero con mucha dificultad, no nítidamente.
- Las personas no pueden ver pero algunos animales (gatos, búhos,...) sí.
- Ni las personas ni los animales pueden ver nada.

(1) La posibilidad de ver en la oscuridad es aceptada desde modelos de emisión ya que los alumnos son capaces de inventar elaboraciones para dar cuenta de este hecho (Selley 1996b) de manera similar a como lo hicieron algunos filósofos griegos. Platón, por ejemplo, aceptaba que el "rayo" que sale del ojo puede penetrar en la oscuridad.

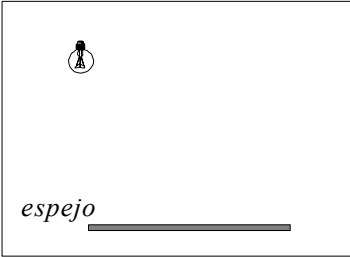
(2) Se conocen opiniones parecidas a las proposiciones de que consta la cuestión, que han sido defendidas a lo largo de la historia. Ferraz en su "Teorías sobre la naturaleza de la luz" (1974, pag. 46) expone que Heliodoro de Larisa, autor que añade ciertos detalles a la obra óptica de Euclides, cita expresamente en relación a la visión en la oscuridad y en defensa del modelo de emisión de "fuego visual": *"Que los rayos salidos del ojo son luz lo prueban múltiples hechos; hay animales que ven de noche sin ayuda de luz exterior y son capaces de pacer en la oscuridad; el emperador Tiberio podía ver en las tinieblas; los ojos de los animales nocturnos resplandecen como el fuego"*.

Esta idea también está presente en Aristóteles. Kepler en 1604 en el apéndice de su obra "Ad Vitellionem Paralipomena" refuta la idea de Aristóteles presente en "De anima" según la cual: *"Entre las cosas que se ven en la noche o en la oscuridad, algunas brillan sin emitir luz"* (Kepler 1604, pag.141)

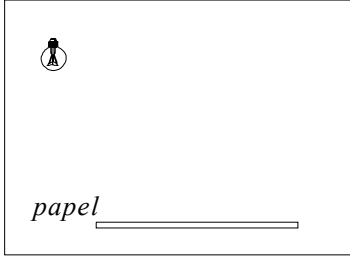
(3) Aunque sólo la última afirmación es coherente con el modelo de visión por recepción de luz, es de esperar que los alumnos que sostengan algunos modelos de visión alternativos consideren correctas algunas otras afirmaciones.

El modelo de visión, de recepción de luz, con el que los alumnos deben poder enfrentarse a una multitud de fenómenos ópticos, necesita considerar que los objetos iluminados son fuentes secundarias de luz. La siguiente actividad intentará probar que las ideas que tienen los alumnos sobre las fuentes secundarias son efectivamente barreras para la formulación de un modelo acorde con el pensamiento científico.

C-3. Explica qué le ocurre a la luz de una bombilla cuando llega a un espejo y cuando llega a un papel. Dibuja en los esquemas siguientes los rayos de luz que consideres para aclarar tus ideas.



espejo



papel

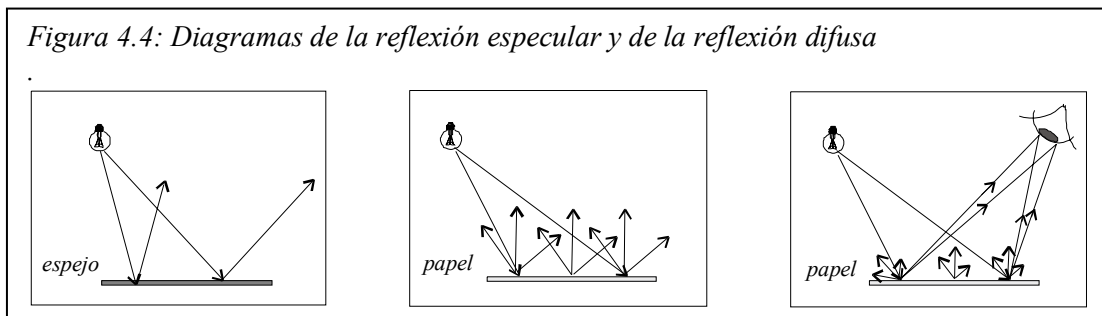
.....

.....

(1) Guesne (1989), a partir de cuestionarios escritos, descubre que alrededor del 30 % de los chicos de 13-14 años admite que la luz pueda ser reflejada por los objetos ordinarios, aunque los resultados de las entrevistas, derivadas de otras situaciones distintas a las del cuestionario, muestran que los alumnos pueden dar contestaciones opuestas a esa noción. La creencia de que un espejo refleja luz y un papel no lo hace puede estar arraigada, en parte, por una de las características más sobresalientes de la epistemología espontánea y es la de estar dirigida por la percepción de los aspectos más llamativos (Martínez Torregrosa et al., 1993): nos podemos deslumbrar con las luces de un coche al mirar al espejo retrovisor pero, raramente se puede sufrir esta experiencia con un papel.

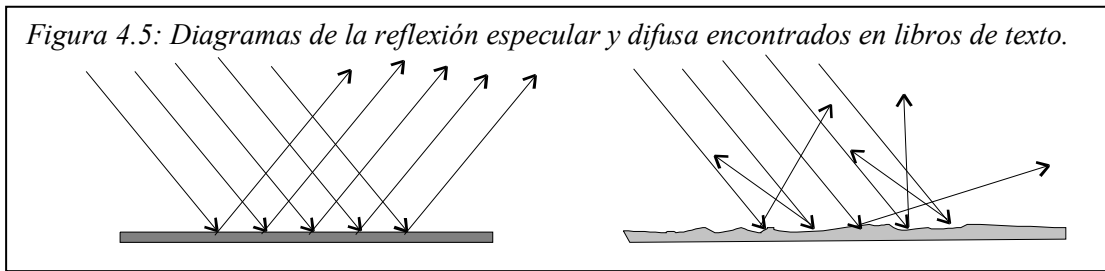
Por otro lado, Galili, Goldberg y Bendall (1991) deducen de su experiencia que rara vez los alumnos de secundaria que han sido formados en óptica comprenden las diferencias entre la reflexión especular y la reflexión difusa.

(2) El análisis que realizan de lo que ocurre con la luz al incidir en esas superficies, está representado en los esquemas de la figura 4.4. Un haz de luz divergente de una fuente puntual se refleja en un espejo plano, a partir de las leyes de la reflexión, tal y como se muestra. El haz que llega al papel, lo ilumina convirtiéndolo en una fuente extensa y secundaria de luz, por lo que cada punto de ella será considerado como un foco emisor de haces completos de luz. La luz es reflejada de forma difusa, es decir, en todas las direcciones desde cada punto del papel pero no con la misma intensidad.



De estos esquemas se puede derivar la explicación científica de la visión directa del papel o la visión indirecta al mirar a un espejo. En el caso del papel, parte del haz de luz procedente de cada punto puede entrar en el ojo del observador (y esto, para distintas posiciones del mismo) con lo que, si la superficie del papel es uniforme, todo punto puede ser indistinguible y podrá verse uniformemente iluminado el trozo de papel.

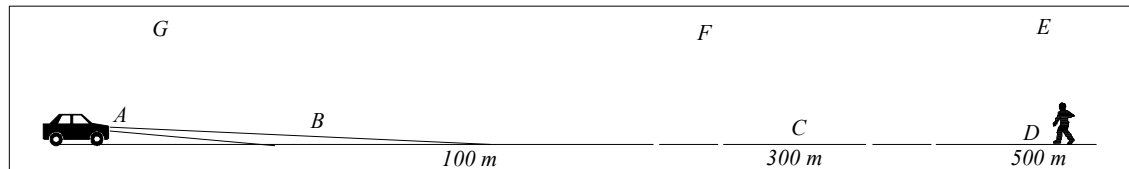
(3) Esperamos que los alumnos utilicen rayos que rebotan en el espejo para explicar el comportamiento de la luz y, de forma similar a como se interpretaban estos fenómenos por algunas escuelas filosóficas griegas y de la Europa cristiana medieval, no lo hagan en los cuerpos opacos que consideramos fuentes secundarias de luz. Dado que la palabra reflexión suele ser usada en el lenguaje coloquial de forma ambigua, al presentar en la actividad la interacción de la luz con un espejo y un papel, obligamos a los alumnos a distinguir, con algo más que esa palabra, lo que le ocurre a la luz cuando incide en el espejo y cuando incide en el papel. Es posible que aquellos que piensen que la luz también es reemitida por el papel elaboren diagramas como el de la figura 4.5, mucho más después de haber recibido instrucción en óptica geométrica, dado que es usual encontrarlo en los libros de texto.



En el cuestionario **C2-a** para alumnos de ESO después de la enseñanza habitual se incluye una variante, la cuestión **C-3.1**, que pretende confirmar si los alumnos creen que los objetos iluminados que vemos tienen la consideración de fuentes secundarias de luz, sin que tengan que dibujar rayos ni compararlo con lo que pasa en un espejo, para ello se les solicita que nombren objetos de la clase de donde crean que sale luz. Si como esperamos esto es un obstáculo no superado por la enseñanza habitual, los estudiantes únicamente citarán fuentes primarias.

Otra barrera que puede estar presente en los alumnos que sostienen modelos alternativos de visión es la no consideración de la luz como una entidad en el espacio independiente del ojo y de la fuente. La siguiente actividad del cuestionario está propuesta para detectar si existen estas dificultades.

C-4. El esquema representa a una persona que en una noche oscura ve, a lo lejos, un coche con los faros encendidos



a) Indica las zonas dónde crees que hay luz:

.....

b) Cuando se apagan los faros del coche ¿dónde crees que está, ahora, la luz que había en esas zonas?

(1) La noción de la luz en el espacio, disociada de su fuente o de sus efectos, es un requisito necesario para entender cómo vemos y tratar problemas de óptica. Guesne (1989), a partir de entrevistas personales con estudiantes franceses de 13-14 años, señaló que los estudiantes de estas edades se refieren a la noción de la luz en el espacio en determinadas situaciones únicamente. Muchos de los estudiantes asimilan estrictamente la luz a las fuentes (primarias) o a sus efectos.

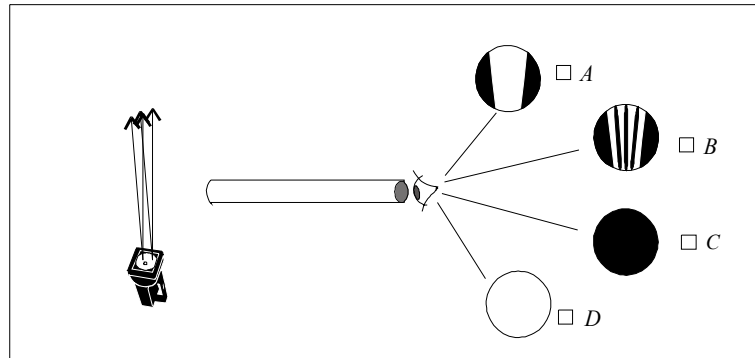
El apartado a) de esta actividad es similar a otra utilizada por Andersson y Karrquist (1983) con estudiantes suecos de entre 12 y 15 años para conocer si la luz era considerada como una entidad en el espacio, independiente del ojo y de la fuente. Sólo un 1 % afirmaba que la luz era capaz de propagarse por sí sola hasta el infinito. El apartado b), que añadimos nosotros, nos permitirá mostrar si los estudiantes piensan que la luz, después de apagarse los faros del coche, está, ahora, viajando en el espacio o bien ha sido absorbida por la materia y la diferencian claramente de los objetos iluminados o de las zonas desde donde se pueden ver las fuentes luminosas. Este apartado se justifica porque es posible que se piense en la luz como una entidad separada de las fuentes y del ojo, pero que sea un ente estático, como un "baño" que inunda el espacio y que desaparece cuando se apaga la fuente primaria.

Puey y Carcavilla (1995) a partir de cuestiones de opción múltiple obtienen que la mitad de los alumnos de 2º de BUP (15-16 años), antes de recibir enseñanza de óptica geométrica, identifica luz con sus fuentes. También señalan que la mayoría de los alumnos que opinan que existe luz en el espacio independientemente de las fuentes, en otras cuestiones abiertas, parecen considerar a la luz como un medio donde se propagan las imágenes más que como una entidad que se propaga en el espacio.

(3) De acuerdo con nuestra hipótesis, los alumnos que no han sido formados en óptica, y aquellos en los que la enseñanza habitual no haya modificado sus ideas iniciales, no tendrán una concepción de luz como una entidad independiente en el espacio, por lo que las zonas que señalarán en las que hay luz serán las zonas donde existen fuentes luminosas o sus proximidades y, como consecuencia, cuando se apaguen los faros pensarán que se ha extinguido la luz.

Cuestiones utilizadas para contrastar la existencia de obstáculos para la comprensión modelo de visión de Kepler relacionadas fundamentalmente el esquema de representación geométrico e idealizado de la luz

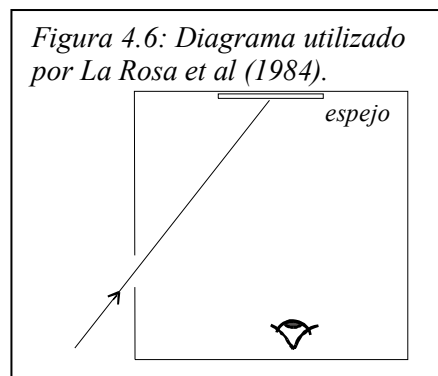
C-5. En una habitación de paredes negras cuya única fuente de iluminación es una linterna, una persona mira a través de un tubo hacia el haz de luz de la linterna. ¿Qué verá en esta situación? Señala con una X la opción que creas correcta.



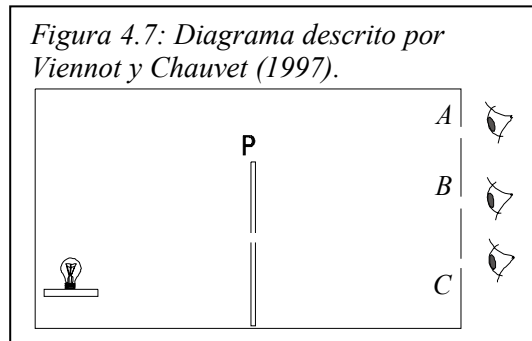
(1) Existen datos de otras investigaciones en donde se pone de manifiesto que los alumnos piensan que la luz es visible en sí misma lo que es una idea considerada como un tópico de sentido común. Para los estudiantes, el rayo de luz, lejos de ser el concepto teórico de los científicos para indicar una dirección de propagación de la luz, es un concepto ambiguo, de algo visible, con entidad real y lo asemejan a los halos coloreados que se ven alrededor de, por ejemplo, el fuego o las lámparas, o a la línea continua de partículas de polvo que difunden luz cuando un haz entra por una rendija de la ventana, etc.

La Rosa et al. (1984) preguntaron a alumnos de 16-17 años que no habían recibido formación en óptica si podrían ver la luz que entra por el agujero en una habitación de paredes negras y perfectamente limpia y que se dirige hacia un espejo de la pared (Fig 4.6). Solo el 12% de los alumnos respondieron correctamente que ni el espejo ni la luz podrán ser vistos en estas condiciones. Parecidos resultados son obtenidos por Saxena (1991) con alumnos de enseñanza secundaria de cuatro niveles diferentes. Creemos, no obstante, que para probar este tópico, esta actividad añade de forma innecesaria la dificultad de la reflexión en el espejo.

Figura 4.6: Diagrama utilizado por La Rosa et al (1984).



Por otro lado, Viennot y Chauvet (1997) citan los resultados obtenidos por Kaminski en 1989 y por Chauvet en 1990 al preguntar a estudiantes franceses de enseñanza secundaria, a profesores de enseñanza secundaria y a estudiantes de arte, qué podrán ver al mirar por cada uno de los agujeros del



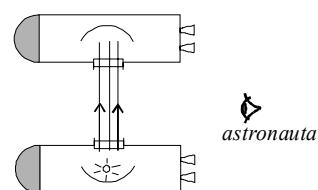
dispositivo experimental de la figura 4.7. No más del 5% de las diferentes muestras predice correctamente qué podrá verse al mirar por cada agujero cuando la pequeña lámpara está encendida.

(2) Sin embargo, sabemos que los “rayos de luz” que vemos colarse entre las rendijas de las ventanas o los que a veces vemos entre las nubes, etc. son producto de la visión de la multitud de pequeñas partículas de polvo del aire o de gotitas de agua en las cuales se difunde la luz. Por lo que al mirar a través del tubo de la cuestión C-5 que estamos comentando “se verá”, simplemente, la pared negra del fondo lo que se representa en la opción C, a no ser que sobre la linterna se haya dispersado humo o polvo.

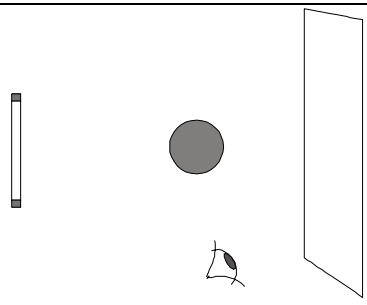
(3) De acuerdo con lo anterior, esperamos que los estudiantes que no tienen una concepción geométrica e idealizada de la luz, respondan mayoritariamente la cuestión escogiendo cualquiera de las opciones distintas de la c).

Otra cuestión similar a esta, con el mismo objetivo, es la contenida en el cuestionario **C2-a** para la muestra de alumnos de ESO después de la enseñanza habitual, **C-5.1**, obtenida del trabajo de Galili y Hazan (2000a). En ella, al estar el observador en el espacio, donde el profesor avisa expresamente que no hay “nada”, se salva el inconveniente de las posibles partículas de polvo en las que se puede pensar.

C-5.1 ¿Qué verá el astronauta de la figura (representado con un ojo) cuando mira hacia el haz de luz que se emite por una de las naves y se refleja en la otra?



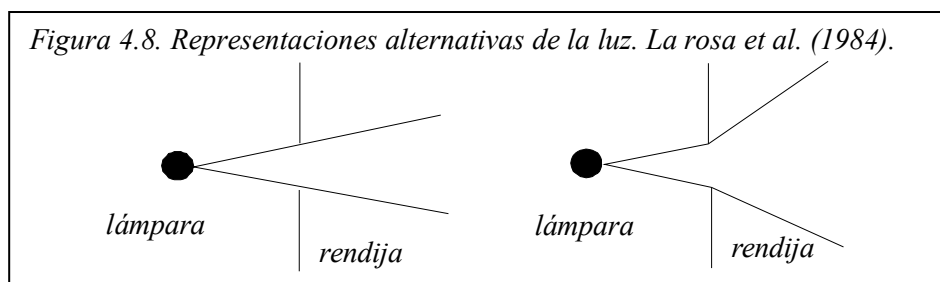
En la siguiente cuestión abordaremos el tratamiento de las fuentes extensas y el uso geométrico de la propagación de la luz para realizar predicciones, otro de los aspectos imprescindibles para explicar cómo vemos en los que es necesario tener una concepción geométrica idealizada de la luz.

<p>C-6. Un tubo fluorescente está encendido y es la única fuente de iluminación de la habitación. Situamos delante de él una pelota, ¿cómo será (en tamaño, forma, color,...) la sombra que se ve en la pared? Dibújala y acompaña este esquema de los rayos que consideres para justificar tu respuesta.</p>	
--	--

(1) En los últimos años, distintos investigadores han tratado la cuestión de cómo entienden los estudiantes el comportamiento de la luz en el proceso de formación de sombras:

La Rosa et al. (1984) a partir de las respuestas de alumnos de 16-17 años sin formación en óptica a cuestionarios sobre distintas situaciones de iluminación de una habitación (unas en donde una pared producía sombra y otras en las que una ventana permitía la iluminación), señalan la existencia de algunas estructuras de pensamiento sobre el comportamiento de la luz y sus representaciones. Estas estructuras de pensamiento pueden resumirse en:

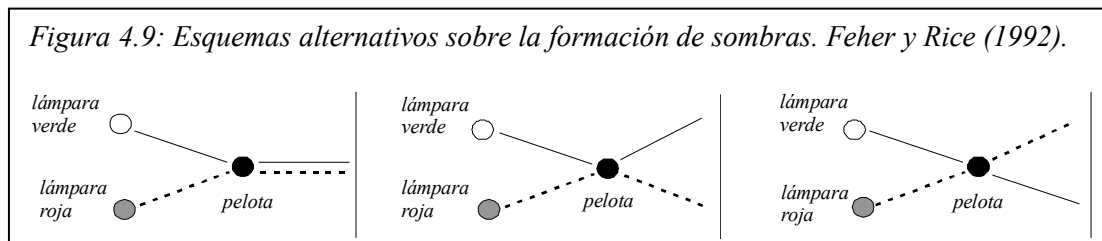
- ausencia de representaciones gráficas a la hora de predecir la forma de la sombra y otros efectos.
- Representaciones gráficas en las que se dibujan líneas rectas a partir de un solo punto o bien las líneas rectas se doblan al pasar, por ejemplo, por una ventana (Fig.4.8).



Andersson y Karrquist (1983) también detectaron que en un tercio de las representaciones gráficas de los alumnos, el cono luminoso procedente de una fuente puntual se abre al atravesar una ventana.

Para Guesne (1989), alrededor de un tercio de los alumnos de 13-14 años se refieren correctamente a la noción de la propagación rectilínea de la luz para adivinar el tamaño de la sombra de un palo en una pantalla, cuando es iluminado por una pequeña lámpara. Algunos utilizaron la idea de propagación recta de la luz sólo en sentido horizontal.

Feher y Rice (1992) realizaron entrevistas a alumnos de entre 8 y 13 años en un apartado de un museo de la ciencia para estudiar las concepciones sobre el color y sombras de color. Además de las concepciones sobre color, que comentaremos, detectaron que los alumnos realizan diagramas para predecir las sombras en los que las rectas de propagación de la luz se doblan en los bordes del objeto opaco o dibujan rectas sólo en direcciones preferenciales. Se representan en la figura 4.9 los diagramas alternativos que obtuvieron usando dos pequeñas fuentes de luz roja y verde y una pelota.



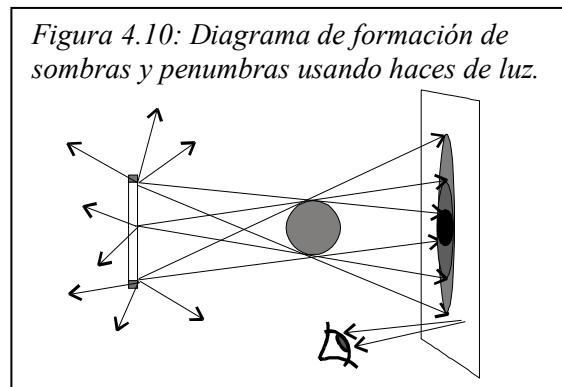
Galili y Hazan (2000 a) a partir de los resultados de otros investigadores y de ellos mismos, han caracterizado dos esquemas alternativos de pensamiento sobre la formación de sombras:

a) El esquema que denominan "sombra imagen" en el que una sombra es una especie de imagen que se ha separado del objeto. Este esquema de pensamiento estaría caracterizado por las siguientes ideas:

- La sombra se amolda a la forma del objeto.
- La forma de la sombra no depende de la forma de la fuente luminosa.
- Una sombra es un "reflejo" (reproducción) de un objeto.
- Siempre hay una sombra y la luz hace que se vea.
- La sombra es independiente una vez que sale del objeto.
- La luz hace que "se dispare" la producción de la sombra del objeto.

- Los estudiantes no predicen la formación de penumbra.
 - La forma de la sombra no se relaciona con el bloqueo de la luz.
 - Hay una ausencia de correlación en los dibujos de los estudiantes entre la distribución de luz, el tamaño y la posición de un objeto, y la sombra marcada.
- b) El esquema "asociativo de sombra" en el que la sombra depende de los alrededores. Este esquema de pensamiento estaría caracterizado por las siguientes ideas:
- Una fuente de luz más potente produce una sombra mayor.
 - Una fuente de luz puntual crea una sombra tenue.
 - Un aumento en el tamaño de la fuente de luz ocasiona una disminución en el tamaño de la sombra.
 - La forma de la sombra de un cuerpo depende de la localización de la fuente de luz y del objeto.
 - Una fuente de luz inclinada lanza una sombra oblicua.
 - Un aumento en la distancia del objeto a la pared, aumenta el tamaño de la sombra.

(2) La respuesta correcta a esta cuestión requiere disponer de un esquema de representación geométrica de la luz en el que la luz que emite cada punto de la fuente se propaga en todas las direcciones y se representa mediante haces divergentes. Una representación correcta que explicaría la formación de sombra y penumbra sería la de la figura 4.10.



(3) De acuerdo con nuestra hipótesis, aparecerán formas alternativas de predecir la sombra y penumbra que se ve en la pantalla como consecuencia de no disponer de un esquema de representación geométrica de la luz en el que la luz que emite cada punto de la fuente se propaga en todas las direcciones y se representa mediante haces divergentes.

Cuestiones utilizadas para contrastar la existencia de obstáculos para la comprensión modelo de visión de Kepler relacionadas fundamentalmente con la visión indirecta y la imagen óptica

El obstáculo fundamental a esta meta parcial es creer que la imagen óptica es una emanación del objeto que se traslada ya hecha o que los rayos son portadores de cada uno de sus puntos. Las consecuencias de esta concepción, que ya han sido analizadas para los alumnos después de la instrucción habitual en la cuestión **C-1.1**, serán ahora abordadas en situaciones de visión indirecta: al mirar hacia un espejo plano, al mirar a un objeto sumergido o a la imagen que vemos en una pantalla. No obstante las cuestiones **C-7** y **C-8** y **C-9** aportarán también información sobre otros obstáculos ya analizados, en concreto: si en la visión consideran que llega luz al ojo procedente del objeto, si en los trazados gráficos las fuentes extensas son tratadas como conjuntos de puntos emisores de luz y si representan haces divergentes desde cada punto.

C-7. El dibujo representa una persona que ve la imagen de un pájaro al mirar a un espejo.

a) Después de leer con atención las siguientes frases, señala con una X cuál es para tí la mejor explicación sobre cómo vemos su imagen al mirar al espejo.

- El ojo envía “la mirada” que rebota en el espejo y llega al pájaro.
- Una imagen del pájaro llega al espejo, rebota y llega hasta el ojo.
- Una imagen del pájaro llega hasta el espejo y se queda en él. El ojo envía “la mirada” a esa imagen en el espejo.
- Una parte de la luz que sale de cada punto del pájaro rebota en el espejo y llega hasta el ojo.
- Si no estás de acuerdo con ninguna de las anteriores completa la frase: Vemos la imagen del pájaro porque

b) Dibuja en el esquema anterior las líneas o los rayos de luz que consideres conveniente para aclarar tus ideas.



(1) Las opiniones de los alumnos respecto a la visión indirecta (catóptrica), al mirar a un espejo, pueden estar condicionadas por la concepción de la visión

directa de los objetos, por las ideas que tengan sobre la emisión de luz de los cuerpos iluminados y por las ideas que posean sobre el propio comportamiento de la luz. Sin embargo no debemos esperar una estricta coherencia en esas opiniones con respecto a las respuestas dadas en cuestiones anteriores que pudieran estar relacionadas. Criterios como "naturalidad", "proximidad afectiva", "validez local e inmediata" (Hewson, 1990) son habitualmente utilizados, y compartidos, en la producción y aceptación del conocimiento cotidiano. De la misma forma a como Martínez Torregrosa et al. (1993) expresan que los alumnos pueden afirmar sin problemas que "los gases no pesan, excepto el butano", podemos suponer que los alumnos utilicen un modelo de emisión para explicar la visión directa de los objetos y para la visión de las imágenes por reflexión cambien a, por ejemplo, un modelo de emisión de imágenes desde el objeto.

Las investigaciones didácticas han señalado un conjunto de concepciones alternativas a las científicas en las explicaciones que los alumnos, de diferentes edades, sostienen para explicar la visión al mirar a un espejo plano:

- La Rosa et al. (1984) señalan que, a pesar de que los alumnos dan muestras de conocer el hecho de poder dirigir la luz reflejada a distintos lugares utilizando un espejo, a la hora de responder dónde hay que colocar un objeto para ser visto al mirar a un espejo, la respuesta mayoritaria fue "enfrente", lo que tiene ciertas similitudes con los modelos mixtos de visión, analizados en el estudio histórico, en los que la imagen viaja hasta el espejo siguiendo la línea perpendicular trazada desde el objeto y queda alojada en él.

- Goldberg y McDermott (1986), a partir de entrevistas personales y cuestionarios a estudiantes de más de 17 años, han señalado que alrededor de un 30% de ellos opina que la imagen que se ve al mirar a un espejo plano se localiza en el espejo. Un 50% opina que la posición de la imagen que se ve, depende de la posición del observador. Para la realización de esta última predicción los estudiantes han utilizado un

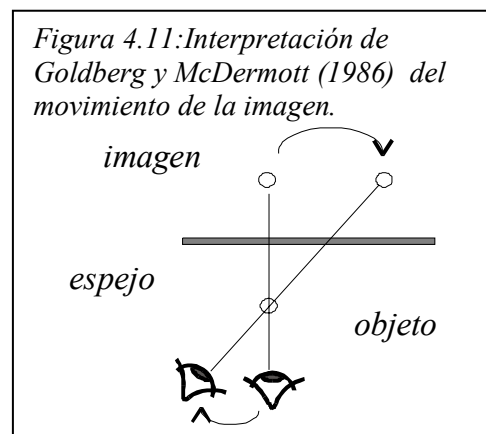
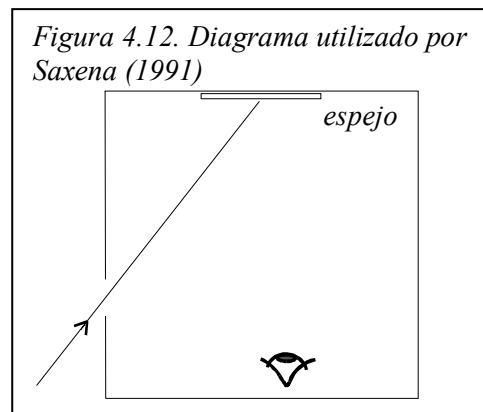


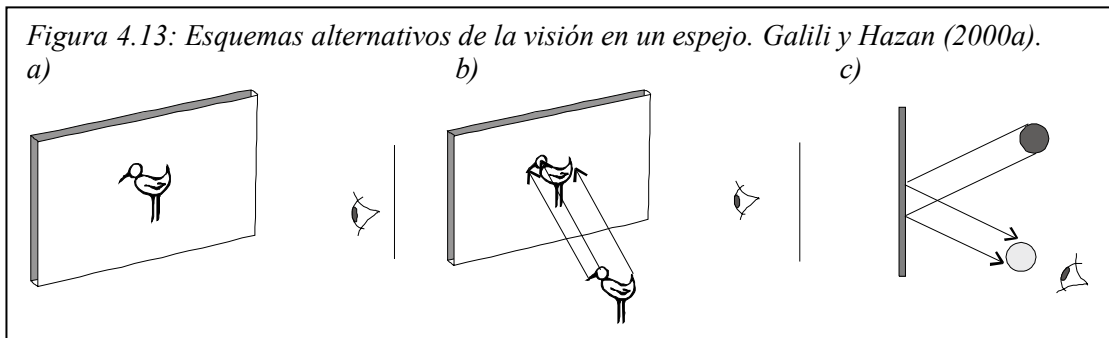
diagrama como el de la figura 4.11 en la que se detecta que sus razonamientos están, claramente, condicionados por modelos de visión alternativos: al cambiar la posición del observador, también deberá cambiar la dirección de la línea de mirada y, con ella, la posición de la imagen. En este mismo estudio, Golberg y McDermott destacan que, con frecuencia, los estudiantes tienen dificultades derivadas del conflicto entre sus predicciones basadas en la interpretación de sus experiencias y las predicciones basadas en la aplicación de las leyes de la reflexión.

- Saxena (1991) preguntó a alumnos de enseñanza secundaria de India qué podrán ver desde la posición del observador de la figura 4.12 al mirar al espejo, que se encuentra en una habitación de paredes negras con un orificio por donde entra luz. Además de respuestas erróneas derivadas de la idea de que la luz es visible, que hemos comentado anteriormente, aparecen otras características de la visión en espejos: piensan que el espejo es visible por sí mismo y que la luz, aunque no llegue perpendicular al espejo, puede ser reflejada en esa dirección. Aunque los estudiantes pueden usar las leyes de la reflexión correctamente, para justificar su respuesta, repentinamente, violan esos principios.



- Galili y Hazan (2000a) señalan la existencia de varias formas de razonamiento para interpretar la visión de la imagen al mirar a un espejo plano:
 - a) Según la estructura de pensamiento que denominan "esquema espontáneo de visión", la imagen del objeto se localiza en la superficie del espejo y los diagramas que realizan los alumnos no conectan ni relacionan la imagen que se ve con el ojo del observador (Fig. 4.13 a).
 - b) Según la estructura de pensamiento que denominan "esquema de imagen holística", la imagen que se ve al mirar a un espejo plano es una replicación corpórea del objeto y que se mueve hasta el espejo donde permanece en su superficie (Fig. 4.13 b).
 - c) Según la estructura de pensamiento que denominan "imagen proyectada", los rayos de luz llevan una imagen del objeto hasta el

espejo donde se refleja y puede alcanzar al ojo del observador para que sea vista (Fig. 4.13 c).



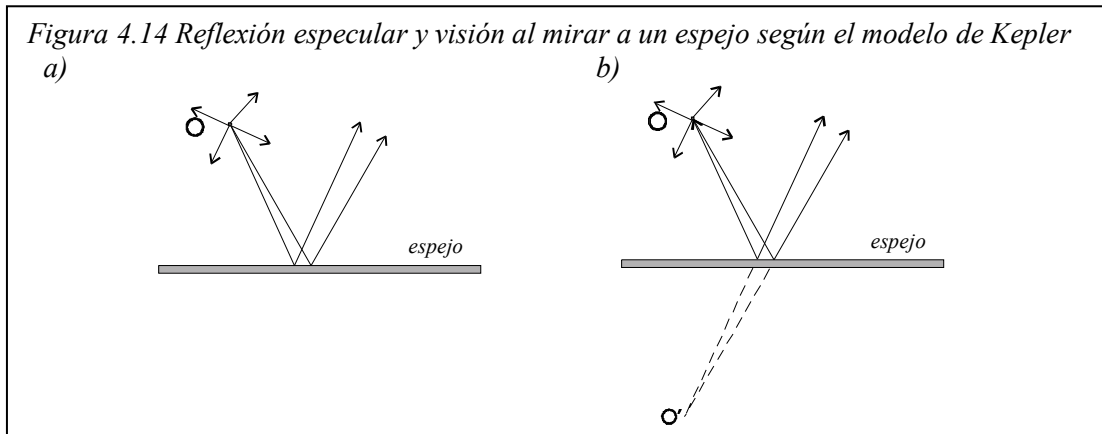
- Puey y Carcavilla (1995) reconocen que muchas de las respuestas de los estudiantes de 2º de BUP antes de estudiar óptica, cuando se les pide que expliquen la formación de la imagen en un espejo plano, se asemejan a la concepción de los "simulacros" de los filósofos epicúreos. Algunas de las frases que utilizan los alumnos para explicar la formación de la imagen y que dan cuenta de su pensamiento son:

- "Los rayos de luz se reflejan en una superficie muy pulida y devuelven la imagen pero a la inversa".
- "Por alguna razón el espejo no admite la luz de nuestra imagen y la devuelve".
- "La luz ayuda a que la imagen se refleje de forma asimétrica...".
- "En la superficie del espejo se calca la imagen con el mismo tamaño".
- "La luz que llega al espejo rebota y al volverse hacia nosotros, pero en sentido contrario, se refleja nuestra imagen".
- "El objeto proyecta una imagen en el espejo que nos la manda a nosotros".
- ...

- Algunas exploraciones realizadas con alumnos españoles después de haber estudiado óptica en 2º de BUP (Pérez de Landazabal et al., 1987) ponen de manifiesto que en los alumnos "persiste un esquema completamente erróneo sobre la formación de imágenes en espejos. La imagen de un objeto coincide con la sombra que vería un observador y que proviene de la persistencia del esquema de rayos visuales que proceden del ojo para explicar la visión de los objetos".

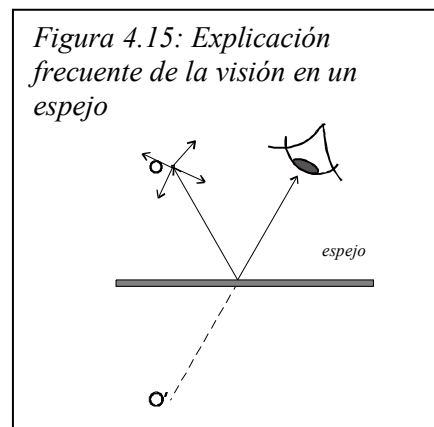
(2) La realización correcta del diagrama (Fig. 4.14), según el modelo de Kepler, requiere varias hipótesis:

- Sobre la fuente: considerar al objeto como un conjunto de puntos que emiten luz en todas las direcciones.
- Sobre la luz: el haz divergente de luz que llega al espejo se refleja según las leyes de la reflexión pero, dado que cada rayo llega al espejo con un ángulo diferente, la reflexión es distinta para cada uno de ellos y el haz de luz reflejado también es divergente; de manera que parece haber sido producido por el punto O' . Es necesario dibujar otras líneas (punteadas) al otro lado del espejo que bien podrían llamarse "líneas de mirada", para localizar en el diagrama dónde cree el observador que está el origen de ese haz divergente, esto es, dónde se localiza la imagen del punto O .
- Sobre la formación de imágenes por el ojo: el ojo hace que un haz divergente que proviene de un punto, se transforme en un haz que converge en un punto de la retina. El ojo funciona exactamente igual independientemente de que el punto O' sea real o no.



Todas ellas supusieron un avance para explicar la visión, y una superación de ideas anteriores bien caracterizadas. Sin embargo, diagramas como el de la figura 4.15, que aparecen con frecuencia en los libros de texto habituales, son incompletos porque no representan cómo el observador puede formar y ver la imagen, ni justifican su posición.

A este respecto Kepler en 1604 (Cap. 3 de

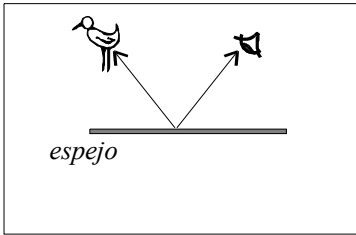
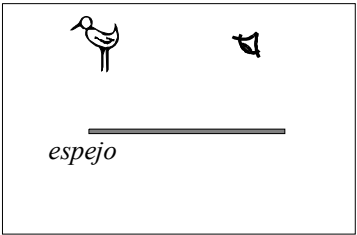


"Ad Vitelionem Paralipomena") expresa el concepto de la imagen al mirar a un espejo plano como: "La imagen es la visión de un objeto ligado a un error de las facultades que concurren a la visión. Así, la imagen por ella misma no es casi nada, y es necesario, sobre todo, recurrir a la imaginación". "La imagen es, así, obra de la visión y comporta cuatro características: color, distancia, posición y tamaño, y cada uno de estos caracteres, para ser comprendidos, deben ser explicados por referencia al instrumento de la visión".

(3) De acuerdo con nuestra hipótesis, esperamos que las opciones elegidas por los estudiantes sean aquellas en las que la imagen se traslada "ya hecha" (entera, como un todo) hasta el espejo para quedarse allí o rebotar hasta el ojo, o, en el caso de que dibujen rayos, tracen sólo uno desde cada punto del objeto como si éstos trasladaran pequeñas partes de la imagen. No obstante, es previsible que algunos alumnos opten por una concepción como la euclidiana contenida en la opción primera en la cual, "la mirada" enviada por el ojo rebota en el espejo sin hacer referencia a la imagen. Es de esperar, también, que las líneas que dibujen en los esquemas sólo representen la imagen viajando o la línea mirada sin que de ellos se pueda extraer alguna otra consecuencia como la localización precisa de la imagen, su tamaño o su disposición espacial.

En el cuestionario **C2-a** para alumnos de ESO después de la enseñanza habitual, se introduce una modificación en esta cuestión (C-7.1). En ella se les ofrece un esquema de visión, advirtiéndoles que es incorrecto, para que lo modifiquen explicando las razones, lo que permite asegurar que los estudiantes puedan cambiar una primera idea inicial irreflexiva.

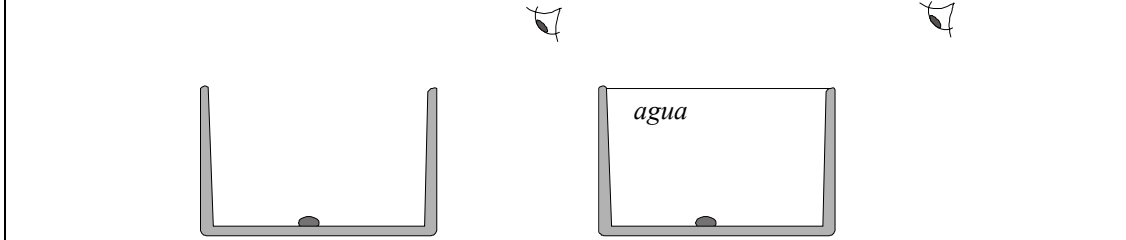
C-7.1 Una persona que no ha estudiado óptica realiza el esquema siguiente para explicar cómo vemos al mirar a un espejo plano. Con lo que has aprendido en clase indica las razones por las que está equivocada y realiza un esquema mejor.

	
---	--

Otra situación en la que, de acuerdo con nuestra hipótesis, es previsible que los alumnos se refieran a la imagen y la traten como una emanación del objeto que

se traslada ya hecha o portada por rayos, es la visión de un objeto sumergido en un recipiente con agua.

C-8. Desde la posición donde se encuentra el “ojo” no se puede ver el objeto del fondo de recipiente, pero si se llena con agua sí puede verse. Explica este fenómeno y dibuja un diagrama que lo explique.



(1) Tenemos escasa información de otras investigaciones que ofrezcan resultados de situaciones similares a la que aquí presentamos con alumnos que no han recibido formación en óptica. Andersson y Karrquist (1983) propusieron una actividad similar en sus trabajos con alumnos que ya habían recibido instrucción. Cerca del 50% de los alumnos de 14 y 15 años, después de haber recibido enseñanza de óptica, citaron la refracción en sus respuestas, pero sólo el 5% de las respuestas explicaban claramente que los rayos de luz se doblan al salir del agua camino hacia el ojo. A pesar de la enseñanza previa de los alumnos, en más del 20% de las respuestas los rayos procedían del ojo y se doblaban al entrar en el agua.

Vázquez (1990) ha detectado en alumnos españoles de secundaria (15-16 años) después de la enseñanza de óptica, un alto grado de confusión entre la propagación de la luz en la refracción y la observación de un palo sumergido parcialmente en el agua. Solbes y Zacaes (1993) han detectado que un gran porcentaje de los alumnos de secundaria (3º BUP), en el curso siguiente a haber recibido enseñanza de óptica parece desconocer el fenómeno de la refracción en la situación del cuestionario.

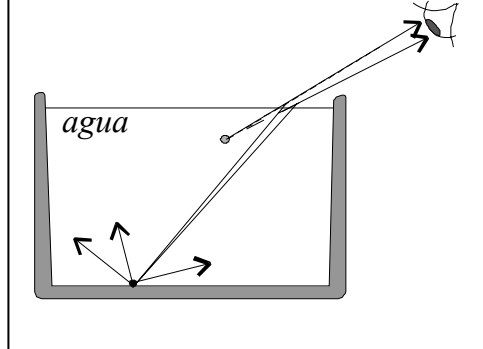
Puey y Carcavilla (1995), con una cuestión similar a esta, han constatado con una muestra de estudiantes de 4º curso de Ciencias Físicas de la especialidad de Óptica, licenciados en Ciencias Físicas y licenciados en Ciencias Químicas, que más del 80 % de los diagramas realizados para explicar la visión del objeto sumergido era incorrecto (bien por trazar mal los rayos o, en la mayoría de los casos, por dibujar un solo rayo).

(2) La realización correcta del diagrama, según el modelo de Kepler, requiere, de forma similar a la visión en un espejo, tres hipótesis:

a) Sobre la fuente: considerar el objeto como un conjunto de puntos que emiten luz en todas las direcciones.

b) Sobre la luz: un estrecho haz divergente de luz procedente de un punto del objeto dirigido hacia el borde del recipiente, al salir del agua, cada rayo sufre una desviación de acuerdo con las leyes de la refracción, de forma que el

Figura 4.16: Esquema de la visión de un objeto sumergido en agua.



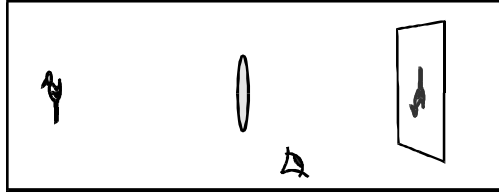
nuevo haz de luz divergente que llega al ojo parece haber sido producido por O' . Aplicando exactamente las leyes de la refracción a los rayos que limitan un estrecho haz como el dibujado en el esquema de la figura 4.16, el punto O' no se localiza sobre la vertical del objeto como parecen dar a entender la mayoría de los manuales de Física y como predecían los modelos de Euclides y Alhazen.

c) Sobre la formación de imágenes en el ojo: en este caso, de la misma manera que al mirar al espejo plano, el ojo forma una imagen en la retina a partir del haz divergente de luz que entra en él, independientemente de que el origen de ese haz, O' , sea un objeto real o no.

(3) De acuerdo con nuestra hipótesis, las dificultades de los estudiantes para la realización de un diagrama explicativo correcto procederán de: creer que la imagen se traslada ya hecha o transportada por rayos, no considerar que desde cada punto del objeto se emite luz en todas las direcciones que se representa mediante haces divergentes y de la aplicación de las leyes de la refracción a este caso.

Por último, abordaremos el caso de la formación de una imagen (real) con una lente convergente y que podremos ver al mirar a una pantalla. El esquema se ha desprovisto de ejes principales y focos con la intención de que los alumnos que han recibido instrucción no repliquen memorísticamente el esquema de formación de la imagen a partir de estos elementos, sino que recurran al significado propio del concepto de imagen óptica según el modelo de Kepler.

C-9. Con una lente como la de una lupa, podemos ver la imagen de un objeto iluminado sobre una pantalla. (en el esquema se representa este fenómeno que es similar al que ocurre cuando usamos un proyector y podemos ver la imagen de una diapositiva en una pantalla)



- a) Explica cómo crees que se forma la imagen que vemos en la pantalla. Dibuja en este esquema los rayos que creas necesarios.
- b) Si alejamos la pantalla de esa posición, ¿qué cambios crees que se producirán en la imagen? Señala con una **X** la respuesta que creas correcta:
- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Se verá de mayor tamaño. | <input type="checkbox"/> No se verá |
| <input type="checkbox"/> Se verá de menor tamaño. | <input type="checkbox"/> Se verá de igual tamaño |
| <input type="checkbox"/> Otra respuesta: | |
- c) Si quitamos la lente, ¿qué cambios crees que se producirán en la imagen? Señala con una **X** la respuesta que creas correcta:
- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> La imagen seguirá existiendo pero no se verá | <input type="checkbox"/> La imagen seguirá existiendo y se verá |
| <input type="checkbox"/> Otra respuesta: | <input type="checkbox"/> No existirá la imagen |
- d) Si tapamos la mitad superior de la lente con un cuerpo opaco, ¿qué cambios crees que se producirán en la imagen? Señala con una **X** la respuesta que creas correcta:
- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Sólo se formará la mitad superior de la imagen | <input type="checkbox"/> Se formará la imagen entera pero menos luminosa |
| <input type="checkbox"/> Sólo se formará la mitad inferior de la imagen | <input type="checkbox"/> Otra respuesta: |

(1) La investigación educativa ha utilizado la interacción de la luz con las lentes convergentes con distintos propósitos:

E. Guesne (1989) señala algunas de las interpretaciones que dan los alumnos de 13-14 años respecto del comportamiento de la luz al interactuar con una lupa: mientras unos piensan que la lupa agranda la luz, otros opinan que la concentran, pero pocos pueden realizar una representación gráfica de esas ideas.

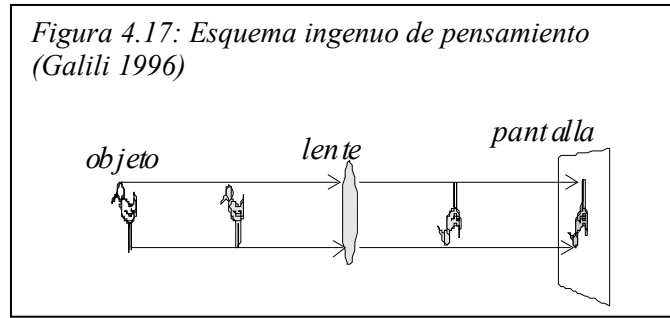
Goldberg y McDermott (1987) han investigado, a partir de entrevistas y de cuestionarios escritos, las ideas de los estudiantes del curso introductorio de Física de la Universidad de Washington, antes y después de la instrucción, sobre el comportamiento de las lentes convergentes y la imagen que se ve en una

pantalla. La actividad que presentaban era similar a la de nuestro cuestionario con el único cambio de sustituir la diapositiva del pájaro por una lámpara con el filamento incandescente. Las conclusiones que han obtenido a partir de las respuestas de los alumnos antes de la enseñanza se pueden resumir en:

- El 60% de los estudiantes piensa que si se quita la lente en la pantalla existiría una imagen derecha.
- El 95% de los estudiantes piensa que si se tapa media lente se desvanece media imagen.
- El 70% de los estudiantes opina que si, una vez que está enfocada la imagen en la pantalla, se mueve la pantalla hacia la lente, la imagen cambia de tamaño y permanece clara.
- El 90% de los estudiantes piensa que al quitar la pantalla y mirar directamente al objeto a través de una lente, la imagen estará situada en la lente, a pesar de realizar la experiencia.

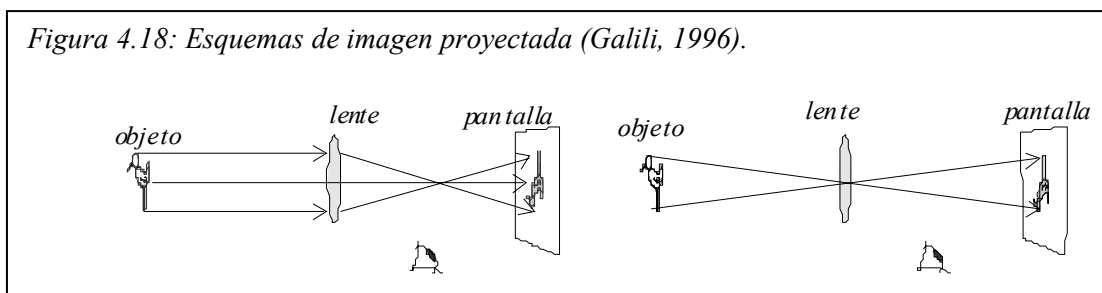
Galili (1996), agrupa las ideas de los estudiantes que han investigado Goldberg y MacDermott y él mismo, en dos tipos de esquemas de pensamiento:

- Esquema ingenuo de pensamiento, o de "imagen holística" característico de los alumnos antes de la instrucción. En este esquema, una imagen del objeto atraviesa (en presencia de luz) la lente. La lente invierte la imagen entera y después de que alcance la pantalla, se localiza en ella y puede ser vista por el observador (Fig. 4.17).



Este esquema de pensamiento es ontológicamente similar a la teoría de los filósofos atomistas griegos (Galili y Hazan 2000a, 2000b) y en él se manifiestan algunos de los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler que como consecuencia del estudio histórico y epistemológico hemos señalado. Podemos concretarlos en: los objetos iluminados no son fuentes luminosas emisoras de haces esféricos de luz desde cada uno de sus puntos, en los diagramas realizados no existe una representación geométrica de la que derivar consecuencias ópticas, ni el ojo es un instrumento óptico formador de imágenes y la imagen óptica es una especie de objeto que se traslada desde el objeto hasta la pantalla donde se deposita.

- Esquema de conocimiento del novato o “de imagen proyectada”. En este esquema los rayos son emitidos por cada punto del objeto e interactúan con la lente. Cada rayo porta información estructural del objeto y la imagen es reconstruida en la pantalla por un conjunto de rayos (Fig. 4.18).



De estos esquemas de pensamiento se derivan, lógicamente, las respuestas de los estudiantes a las distintas cuestiones que planteaban Goldberg y McDermott. Esto es:

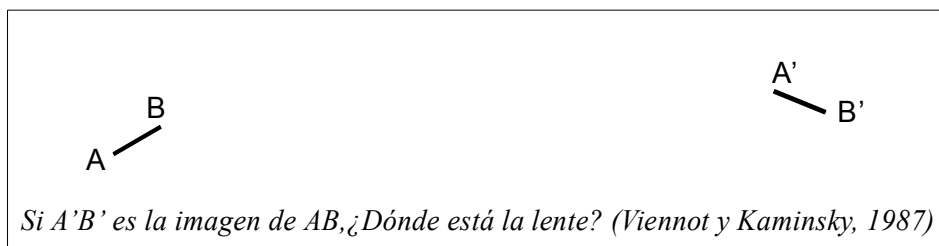
- Que al quitar la lente se piense que la imagen sigue existiendo.
- Que al tapar parte de la lente se piense que se formará media imagen.

- Que al separar la pantalla de esa posición se piense que pueda seguir viéndose la imagen.
- Que la imagen no pueda verse en ausencia de pantalla.

Este esquema de pensamiento es ontológicamente similar a la teoría de Alhazen (Galili y Hazan 2000a, 2000b) y en él se manifiestan, también, algunos de los obstáculos para la comprensión de la imagen óptica que hemos señalado. En concreto: los alumnos construyen la imagen de la pantalla a partir de un único rayo procedente de cada punto del objeto, el ojo no es considerado un instrumento óptico formador de imágenes en ese dispositivo ya que en los diagramas la luz no interacciona con él.

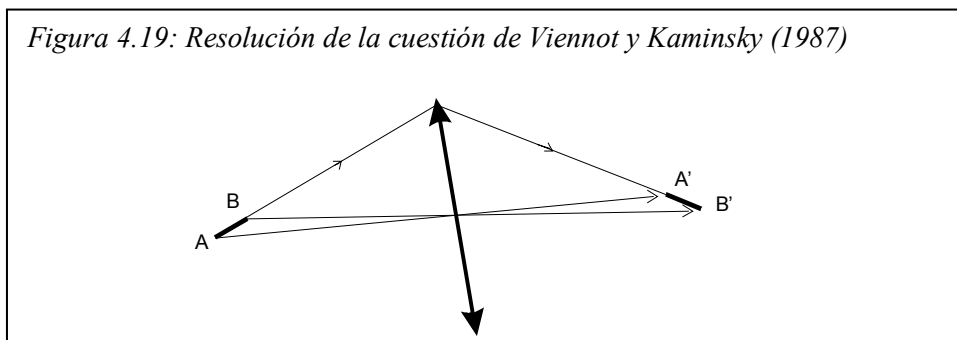
Con estudiantes españoles, Pérez de Landazabal y Juncos del Egado (1987) señalan que los alumnos de 2º de BUP (15-16 años) después de la enseñanza de óptica tienen dificultades de explicación de las imágenes formadas por lentes convergentes. En algunos casos los alumnos opinan que las imágenes se forman por reflexión y que no se precisa lente para obtener la imagen de un objeto luminoso en una pantalla. En general, llaman la atención de la necesidad de considerar que todos los puntos del objeto emiten luz hacia todos los puntos de la lente, en vez de quedarse con el "juego geométrico" de dos o tres rayos.

Por otro lado, Viennot y Kaminski (1991) han señalado que el aprendizaje exclusivamente centrado en las construcciones tradicionales sobre la posición de la imagen (con la "panoplia" de focos, eje óptico, centro óptico, etc.) bloquea la reflexión conceptual. Por lo que parece intuirse que la enseñanza habitual, basada básicamente en la repetición de algoritmos geométricos de construcciones de imágenes, no permite superar los obstáculos señalados para la comprensión del modelo de visión de Kepler. Profundizan en esta línea cuando constatan que este bloqueo es el que puede estar impidiendo una solución aceptable a la siguiente cuestión que fue propuesta a estudiantes franceses después de la enseñanza secundaria y a profesores españoles en formación.



El porcentaje de respuestas aceptable no sobrepasa el 5 % en ninguna de las poblaciones, a pesar de la llamada masiva, en todos los grados de competencia, a una panoplia de útiles de construcción clásicos: centro óptico, eje óptico (preferentemente horizontal, focos primarios y secundarios, rayos paralelos, ...). Estos autores señalan que "existe la ilusión escolar que consiste en pensar que el aprendizaje de procedimientos algorítmicos es suficiente y arrastra detrás de él la comprensión de los conceptos".

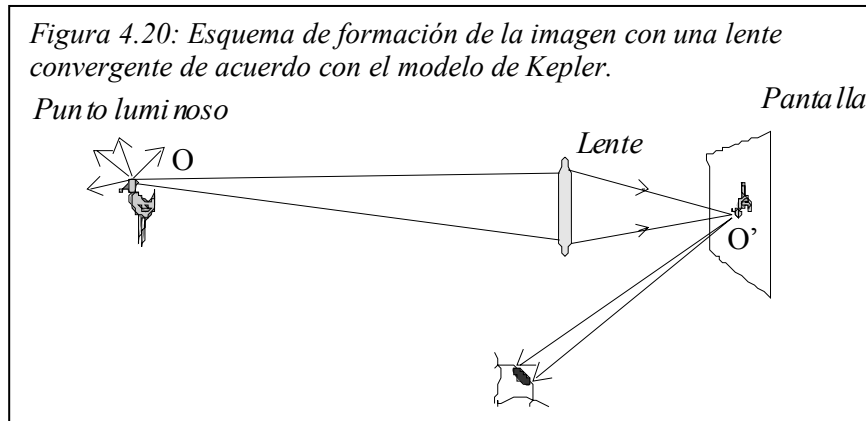
De hecho, para responder a esta cuestión es suficiente tomar en serio la definición gaussiana para un sistema estigmático: A' es la imagen de un punto A cuando todo rayo trazado desde A , después de la lente se traza pasando por A' . Entonces el rayo incidente AB emerge según $A'B'$. Aunque lejos de una resolución habitual, la resolución sólo reclama el concepto mismo de imagen (Fig. 4.19).



En las conclusiones de la tesis doctoral de Lucia Puey y que se recogen en Puey y Carcavilla (1995) se cita expresamente que:

- La interpretación de lo que es una *imagen* no es nada trivial y es preciso diseñar ejercicios adecuados para que el concepto se comprenda y se maneje acertadamente.
- Los diagramas en los que se utilizan únicamente *rayos que pasan por los focos o por el centro de la lente*, llevan a los alumnos a adquirir ideas incorrectas del concepto de imagen.

(2) La explicación de cómo vemos la imagen en una pantalla ha sido ya tratada anteriormente. El esquema de la figura 4.20, de acuerdo con la teoría de Kepler, representa esta explicación.



De este esquema se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La imagen es formada trazando haces divergentes de luz emitidos por cada punto del objeto.
- No existe imagen sin observador ya que esa "representación" (también llamada imagen) se ve en la pantalla porque forma una imagen en la retina del ojo (que de forma simplificada se puede asimilar a un sistema lente convergente-pantalla).
- Sólo vemos la imagen para una única posición de la pantalla ya que el haz de luz que atraviesa la lente converge en un solo punto a una distancia determinada de la lente.
- Si quitamos la lente no se forma la imagen ya que no hay instrumento que converja los haces de luz.
- Si tapamos la mitad de la lente dejamos pasar la mitad del haz de luz, por lo que la imagen será menos luminosa pero se verá en la misma posición y del mismo tamaño.

(3) Esperamos, de acuerdo con nuestra hipótesis, que las respuestas de los alumnos sean coherentes con una concepción de imagen que se puede tratar como un objeto "entero" que se traslada o a lo sumo que se forma con las contribuciones de únicos rayos trazados desde cada punto (similar a la concepción histórica de Alhazen). Con este tipo de concepción de la imagen, es de esperar que los alumnos no tracen rayos hasta el ojo del observador y que piensen que se pueda ver la imagen aunque se aleje la pantalla, incluso si se quita la lente, o que se vea media imagen al tapar media lente. Los trazados gráficos no serán trazados geométricos que permitan obtener la localización de la imagen ni sus características, en los alumnos antes de la instrucción. Después de la enseñanza habitual, es de esperar que aquellos que hayan aprendido el

algoritmo típico de construcción, necesiten señalar los puntos focales de la lente y el eje óptico para la localización geométrica de la imagen, pero dado que ésta ya se da en el enunciado de la cuestión, este tipo de respuestas no hace sino indicarnos un aprendizaje memorístico del algoritmo archirrepetido: "rayo que pasa por el foco sale paralelo, rayo que incide paralelo, sale por el foco,...", pero no el uso de haces divergentes necesario para la comprensión del concepto de imagen óptica que se deriva del modelo de visión de Kepler.

Cuestiones utilizadas para contrastar la existencia de obstáculos para la comprensión modelo de visión de Kepler relacionadas con la visión del color

C-10. Explica por qué crees que vemos el diferente color de los objetos.

.....

(1) La investigación didáctica sobre ideas alternativas de los alumnos ha puesto de manifiesto que para los estudiantes, antes de la instrucción, el color es básicamente una propiedad de los objetos.

La Rosa et al. (1984) han señalado las siguientes ideas como características de la epistemología de sentido común en lo referente al color:

- El color es una cualidad de los objetos que la intensidad de luz hace más o menos perceptible.
- La luz natural o luz blanca no tiene color, la palabra blanca es sinónimo de natural.
- A veces el cambio de color es explicado por una diferente intensidad de la luz. Así se entiende el azul como un color oscuro, de poca intensidad de luz, y el azul celeste es un color claro (de mucha intensidad de luz).

Feher y Rice (1992) han encontrado algunas de las ideas alternativas de los alumnos a partir de entrevistas con niños de entre 11 y 14 años durante una visita a la sección de experiencias de color de un museo de la ciencia. Allí, se les mostraba el "sorprendente" fenómeno de cambio de color con que se ven los cuerpos al ser iluminados con luces "coloreadas" y se les preguntaba sobre sus ideas acerca del color. En síntesis, para estas investigadoras, las predicciones que hacen los alumnos respecto del color de los objetos bajo varios tipos de luz son:

- La mayoría cree que el color es una propiedad de los objetos que permanece invariable bajo luz blanca.
- El color con que se ven los objetos puede cambiar con luz "coloreada". El mecanismo por el que se puede realizar este cambio está ligado a alguna propiedad especial de la luz "coloreada" que hace que pueda transformarlo en más claro, en más oscuro o mezclarse con el color del objeto.

Galili y Hazan (2000a) establecen que el esquema de sentido común prioritario en este tópico es el que denominan "color-pigmento" y según datos propios y de E. Feher y K. Rice se caracterizaría, además de lo ya citado anteriormente por:

- El color es debido a una mezcla de sustancias especiales diferentes de la luz.
- Las luces de varios colores, cuando se mezclan, permanecen separadas.
- Las luces de colores se mezclan como los pigmentos.
- En una mezcla de pigmentos, cada color es percibido separadamente.
- Una mezcla de luces coloreadas produce una luz un poco más oscura.
- En una mezcla de colores prevalece el más eficaz.
- El color es producido por diferentes estados de claridad.

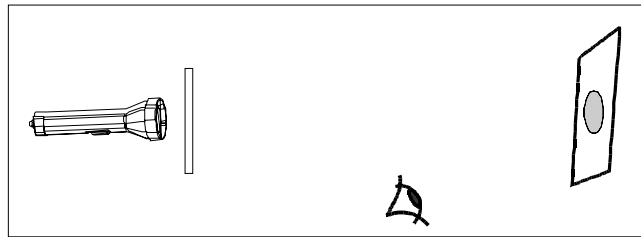
(2) Sin embargo el color es una sensación, una cualidad subjetiva, que se obtiene a partir de tres elementos: las características de la luz que incide en el ojo, las características fisiológicas del ojo y las características luminosas del entorno en el que se encuentra el objeto (Küppers, 1992). Esta complejidad hace que sea difícil suponer que las personas tengamos elaborada una teoría de cómo se obtiene esa sensación que acompaña a la visión de los objetos. Es de esperar que las explicaciones que den los alumnos revelen barreras similares a las que ha puesto de manifiesto el análisis histórico. Entre ellas:

- El color como propiedad del cuerpo (filósofos griegos).
- La asignación del color a una propiedad sólo del objeto y que la luz revela (Alhazen).
- El color como una propiedad del cuerpo que se irradia esféricamente como la luz (Kepler).
- Asignar color o colores a la luz (La Chambre).
- La superación de la idea de la modificación de la luz y, por tanto, la necesidad de considerar a la luz "blanca" como un entidad heterogénea (Newton).

- El necesario conocimiento de la fisiología de los receptores retinianos, (Young).

(3) De acuerdo con nuestra hipótesis, esperamos que en las explicaciones que den sobre por qué vemos los cuerpos de un determinado color lo atribuyan, fundamentalmente, a una propiedad exclusiva del objeto o de la propia luz.

C-11 Al interponer un filtro azul ante el haz de luz de una linterna, podemos ver una mancha azul sobre una pantalla, en dónde antes veíamos una mancha blanca.



Explica en este fenómeno, el papel que realiza el filtro.

.....

(1) Hemos comentado anteriormente que la investigación didáctica ha señalado esquemas espontáneos de pensamiento respecto de la visión del color. En general el color de los cuerpos es atribuido a una propiedad de los cuerpos y, en ocasiones, es asignado a una propiedad de la luz que puede mezclarse con el color del cuerpo y hacerlo cambiar, etc. (La Rosa et al. 1984; Feher y Rice 1992; Galili y Hazan, 2000a).

La función del filtro que se presenta en esta cuestión involucra directamente la concepción del carácter homogéneo o heterogéneo que se tenga sobre la luz y la concepción del color. Como esto último ha sido abordado en la cuestión anterior, nos limitaremos a comentar las investigaciones que hacen referencia a la relación del filtro con el tipo de luz, en estudiantes que han sido instruidos en óptica:

- Pérez y Juncos (1987) señalan la coexistencia de esquemas conceptuales de absorción y de superposición de colores en el paso de la luz por filtros en alumnos de bachillerato.
- Saxena (1991) señala que sólo el 20 % (aproximadamente, según la muestra) de los estudiantes explica que la función de un filtro rojo es dejar pasar a través de él luz roja.

- Salinas y Sandoval (1994) a partir de las respuestas de alumnos de 2º curso de estudios universitarios de ingeniería, señalan que para la mayoría de los estudiantes la interacción de la luz con los filtros consiste en absorber la luz de su color o la longitud de onda de su color. Esta idea induce a pensar que, para ellos, el color está en el objeto, del mismo modo que la masa o cualquier propiedad física. En otros razonamientos señalan de forma ambigua que la luz sale roja después de atravesar el filtro, como si la luz se tiñera en el filtro. Para estos autores, sin embargo, las explicaciones sobre cómo se ven los objetos de un determinado color, eran consideradas correctas si cumplían dos requisitos: que llegue luz al ojo procedente del objeto y que se explique la percepción del color como la "resultante" del espectro de la radiación luminosa que emite el objeto. No consideran necesario explicar la sensación de color a partir de las respuestas de los receptores retinianos, con lo que podría pensarse que las distintas radiaciones al mezclarse dan los distintos colores y que ellas mismas tuvieran color.

(2) Sabemos que a partir del tratado "La Lumière" de La Chambre en el siglo XVII (Ferraz, 1974), empezó a considerarse el color como un tipo de luz y que a partir de la publicación de la "Óptica" de Newton, la luz "blanca" pasó a ser considerada como una entidad de carácter heterogéneo en contraposición con la hipótesis de la modificación de la luz según la cual la interacción con la materia supone su modificación. En esta cuestión, sin necesidad de tener conocimientos profundos sobre la naturaleza de la luz, se puede dar una respuesta correcta a la función que realiza el filtro con sólo considerar la luz "blanca" de la linterna formada por la mezcla de varios tipos de luces y que el filtro absorbe algunas de ellas excepto el tipo que da lugar a que veamos una mancha azul en la pantalla (y el propio filtro azul).

(3) De acuerdo con nuestra hipótesis, esperamos que muchas de las respuestas de los alumnos no reflejen una concepción heterogénea de la luz "blanca". Es de esperar que el lenguaje usado en las respuestas que manifiesten el carácter heterogéneo de la luz identifiquen cada tipo de luz a un color, ya que es lógico pensar que si los alumnos creen que la luz es visible y la visión está unida a la sensación de color, cada tipo de luz será, para ellos, de un color.

Cuestiones utilizadas para contrastar la existencia de obstáculos para la comprensión modelo de visión de Kepler relacionadas sus límites de validez

La siguiente cuestión, que sólo será planteada para alumnos de bachillerato después de la instrucción, intentará mostrar que los alumnos desconocen fenómenos ópticos que no se pueden explicar con la aproximación paraxial de la óptica geométrica para explicar la visión.

C-12. Cita algunos fenómenos relacionados con la luz y la visión que la óptica geométrica no sea capaz de explicar.

(1) No tenemos conocimiento de trabajos de investigación didáctica que nos aporten información de este aspecto, si acaso, mencionar el trabajo de Colin y Viennot (1998) que analiza las dificultades de los estudiantes de 2º y 3º curso universitario para integrar el tratamiento ondulatorio y el tratamiento geométrico de la imagen óptica de forma coherente. En el se muestra que los estudiantes interpretan fenómenos ondulatorios como la difracción usando trazados típicos de la óptica geométrica, lo que viola su dominio de validez.

(2) Desde el punto de vista de la enseñanza por investigación, la actividad científica está regida por unos criterios de aceptación de los modelos y de las teorías científicas. El marco de validez de la óptica geométrica y, por tanto, las limitaciones a la explicación de determinados fenómenos, viene determinado por la aproximación paraxial que permite asimilar las lentes o los espejos esféricos a sistemas estigmáticos o formadores de imágenes ópticas dentro de los límites de resolución del ojo humano. Cuando no es posible limitar los sistemas ópticos a la luz paraxial y a un solo tipo de luz, la aplicación de la ley de Snell o de las leyes de la reflexión no permite la convergencia de los haces de luz en un único punto, con lo que no se forman imágenes ópticas. Las aberraciones geométrica (esférica, coma,...) y cromática que aparecen marcan las limitaciones al aumento que se puede conseguir con determinados instrumentos ópticos.

El campo de validez de la óptica geométrica también viene limitado por la naturaleza ondulatoria de la luz: fenómenos como la difracción y la interferencia restringen el poder de resolución de los instrumentos ópticos. Por otro, en la interpretación de lo que vemos influye, además del proceso geométrico de la formación de la imagen óptica, el funcionamiento de la mente, lo que se

evidencia por la existencia de ilusiones ópticas (Hoffman, 1984), la propia sensación del color, etc.

(3) Pensamos, que la enseñanza habitual, de marcado carácter ahistórico y aproblemático (Gil 1993), no presta atención a las limitaciones de las teorías que aprenden los alumnos, por lo que esperamos que un porcentaje significativo de ellos desconozca el campo de aplicabilidad de la óptica geométrica y no considere que en la sensación de la visión participa en último término la mente (ilusiones ópticas, interpretación de lo que vemos, ...).

4.3.2 Diseño experimental para obtener evidencias de que la enseñanza habitual no contempla los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler y tiene un carácter marcadamente empirista y aproblemático”

Recordemos que se habían elaborado tres consecuencias de esta segunda derivación de la hipótesis:

- *H_{1.2.1}. Los profesores de Física y Química y los libros de texto presentan carencias que afectan a la comprensión de aspectos claves del modelo de visión de Kepler*
- *H_{1.2.2}. Los profesores de Física y Química y los libros de texto presentan la enseñanza habitual de la óptica geométrica de forma empirista y aproblemática.*
- *H_{1.2.3}. Las pruebas de selectividad son coherentes con el tipo de enseñanza a la que van dirigidas, es decir, evocan una visión de la enseñanza aproblemática y empirista, a la vez que no presta atención a los aspectos claves del modelo de visión de Kepler.*

a) Diseños elaborados para analizar la visión de los profesores

El diseño se ha centrado, en primer lugar, en obtener evidencias que apoyen nuestra percepción de que los profesores tienen, en general, carencias en la comprensión de la óptica geométrica que afectan a conceptos básicos del modelo de visión de Kepler y presentan la enseñanza de la óptica geométrica de forma aproblemática y empirista.

Presentamos varios cuestionarios que los profesores asistentes a diferentes cursos de formación cumplieron al comienzo del mismo. La muestra fue de un total de 64 profesores que asistieron a las siguientes actividades:

- Curso de formación organizado por el ICE de la Universidad de Alicante el año 2002 (25 profesores).
- Curso de formación organizado por el CEFIRE de Benidorm (Alicante) el año 2002 (11 profesores).
- Curso de formación organizado por el ICE de la Universidad de Alicante el año 2004 (28 profesores).

Pensamos que los profesores presentan obstáculos, fundamentalmente, en dos de los indicadores de comprensión que venimos señalando. En primer lugar, no

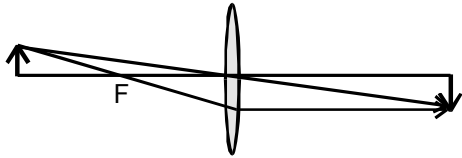
disponen de un esquema de representación geométrico e idealizado para la representación de la luz acorde con el que se emplea en el modelo de visión de Kepler, más concretamente, en los trazados gráficos no utilizan el concepto de haz divergente de luz. Por otro lado, y en parte como consecuencia de lo anterior, los profesores tendrán dificultades en la comprensión de la imagen óptica.

Se han diseñado tres instrumentos que designamos con los códigos **C1-p** , **C2-p** y **C3-p**. A continuación los presentamos junto con sus estadillos de valoración.

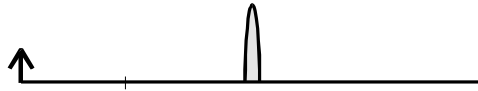
Cuestionario C1-p. Valoración a los trazados gráficos de construcción de la imagen óptica hechos por los profesores

En muchos libros se utiliza un dibujo como del margen para explicar la formación de imágenes. Suponiendo que cortamos la lente, dejando sólo la mitad superior, representa gráficamente cómo afectaría esto a la imagen (a). ¿Y si dejáramos la mitad inferior (b)? Explica tus esquemas.

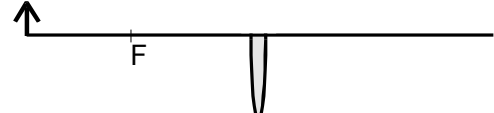
el



a)



b)



En esta actividad se muestra un trazado habitual de construcción de la imagen óptica con una lente convergente como los que se encuentran en la mayoría de los libros de texto de enseñanza secundaria y bachillerato. Esta construcción geométrica suele ser presentada como un proceso algorítmico en el que se enseña a trazar dos rayos característicos procedentes de un punto del objeto, que después de atravesar la lente acaban convergiendo en un punto imagen. Sin embargo, en las explicaciones no se suele avisar que estos dos rayos limitan un haz divergente de luz que pasa por la lente y que al converger en un punto y poner una pantalla a esa distancia, ese punto emitirá el mismo tipo de luz que el emitido por el objeto, por lo que al mirar hacia ella reconoceremos al punto objeto. Si no pusiéramos pantalla, la luz que ha convergido en ese punto

continúa divergiendo a partir de él y si alcanza el ojo de un observador puede formar una imagen en su retina y reconocer en él, de la misma forma que al mirar a la pantalla, al punto objeto.

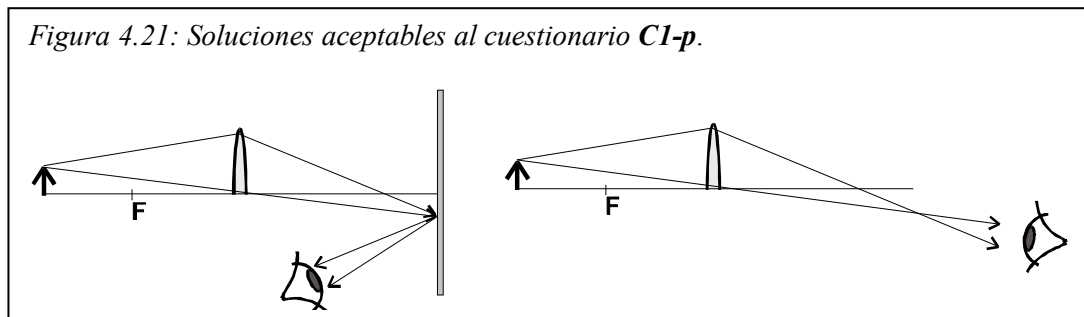
Dado que las explicaciones habituales de los libros de texto y manuales de Física sobre las representaciones gráficas de formación de la imagen óptica suelen ser casi únicamente de tipo algorítmico, es de esperar que en las respuestas de los profesores a esta cuestión se observe una gran distancia respecto de los conceptos implícitos en el modelo de visión de Kepler. Para valorar las respuestas utilizaremos el estadillo del cuadro 4.1.

Cuadro 4.1: Estadillo para valorar C1-p (valoración de los trazados gráficos de los profesores sobre construcción de la imagen óptica)

<p>Consideraremos a favor de nuestra hipótesis si:</p> <p>1. No utilizan en sus trazados el concepto de haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto, bien por que:</p> <ul style="list-style-type: none">• No saben realizar los trazados gráficos, o• No realizan ambos trazados correctamente, o• Realizan los trazados bien pero necesitan señalar el foco imagen F' <p>2. No expresan un concepto de imagen óptica coherente con el modelo de Kepler, por lo que:</p> <ul style="list-style-type: none">• No dibujan ni se refieren al ojo como parte integrante del esquema óptico de formación de la imagen.• Tratan gráficamente la imagen con el mismo tipo de representación gráfica que el objeto, incluso sin pantalla donde mirar para verla.
<p>No consideraremos la valoración a favor de nuestra hipótesis cuando:</p> <ul style="list-style-type: none">• Utilicen en sus trazados haces divergentes de luz emitidos por cada punto del objeto y• Dibujen o hagan referencia al ojo del observador.

En este estadillo conviene clarificar el sentido de alguno de sus ítems. Es posible que los trazados gráficos sean correctos sin utilizar el concepto de haces de luz. Según el modelo de Kepler, la luz emitida por un punto del objeto es un haz esférico, parte del cual es un haz cónico divergente que pasa por la lente y después de atravesarla se torna haz convergente hasta el punto imagen. Cuando se utiliza el concepto de haz de luz no es necesario señalar el punto focal imagen F' ya que se conoce el punto donde converge la luz y que su poder de

convergencia permanece inalterable al cortar media lente. Pensamos que cuando en los trazados se dibuja el punto F' , se está haciendo uso del algoritmo archirrepetido en los libros de texto según el cual: "todo rayo que pase por el foco objeto sale paralelo después de atravesar la lente y todo rayo llegue paralelo al eje óptico, pasa por el foco imagen después de atravesar la lente" y no del concepto de haz de luz ni de imagen óptica que se deriva del modelo de visión de Kepler. Los esquemas de la figura 4.21 son coherentes con el concepto de imagen óptica que del modelo de Kepler.

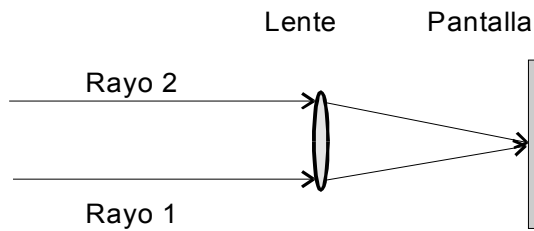


No obstante, y con ocasión de otro curso de formación en óptica geométrica se diseñaron otras cuestiones que junto a la cuestión anterior permitiera confirmar esas mismas sospechas respecto de la existencia de obstáculos por parte de los profesores en la comprensión del modelo de Kepler y, más concretamente, en dos de sus indicadores de comprensión: los trazados geométricos con el uso del concepto de haz de luz y el concepto de imagen óptica con su proceso de formación (cuestionarios **C2-p** y **C3-p**).

Cuestionario C2-p. Valoración cerrada sobre el concepto de haz de luz

En algunos libros de texto de ciencia elemental se suele explicar el funcionamiento de una lupa (constituida por una lente convergente) de la siguiente forma:

“Cuando las lentes convergentes están enfrentadas al Sol poseen la propiedad de concentrar sus rayos” y realizan esquemas como el siguiente:



Señala la respuesta que creas correcta y argumenta tu elección:

- Los rayos 1 y 2 representan el conjunto de todos los rayos procedentes del Sol.
- Los rayos 1 y 2 proceden de puntos extremos del disco solar.
- Los rayos 1 y 2 proceden de un punto central del Sol.
- No se puede saber de donde proceden esos rayos.
- Otra respuesta:

Este cuestionario permitirá profundizar en el pensamiento de los profesores sobre los trazados gráficos, centrándonos, exclusivamente, en el uso del concepto de haz de luz ya que no se hace referencia a la imagen óptica. Según los argumentos utilizados en el cuestionario anterior, esperamos que los profesores no reconozcan el haz de luz en los trazados gráficos sino que lo interpreten como rayos procedentes de puntos distintos, por lo que no admitirán que los rayos 1 y 2 del esquema procedan de un mismo punto del Sol y sean, por tanto, los que limitan el haz de luz que incide en la lente. En este caso, el haz divergente, es dibujado paralelo cuando está en las proximidades de la lente por proceder de un punto lejano. Cabe mencionar respecto de esta cuestión que la tercera opción, la opción correcta, está redactada de forma afirmativa y concisa de forma que no deje lugar a dudas.

Para valorar las respuestas de los profesores emplearemos el estadillo del cuadro 4.2:

Cuadro 4.2: Estadillo para valorar C2-p (para mostrar que los profesores no reconocen el haz de luz en los trazados gráficos)

Consideraremos la valoración a favor de nuestra hipótesis cuando:

- Den una respuesta distinta a que los rayos 1 y 2 proceden de un punto central del Sol.
- No se refieran en su argumentación al haz de luz procedente de un punto del Sol.

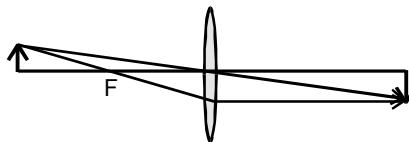
No consideraremos la valoración a favor de nuestra hipótesis cuando:

- Den la respuesta correcta y en sus argumentos se refieran al concepto de haz de luz.

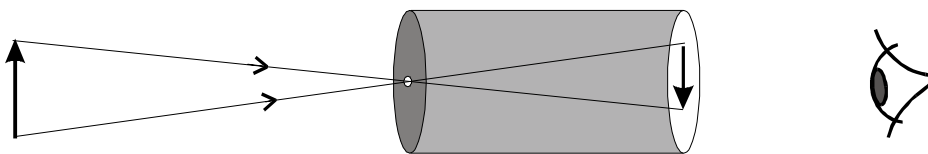
El tercer cuestionario **C3-p** está diseñado para contrastar nuestra sospecha de que los profesores asistentes a cursos de formación en óptica geométrica no han adquirido el concepto de imagen óptica que se deriva del modelo de visión de Kepler. Abordamos esta cuestión presentando el concepto de imagen óptica de dos formas claramente diferentes animándoles a que argumenten a favor de una u otra opción y clarifiquen su significado.

Cuestionario C3-p. Valoración abierta sobre el concepto de imagen óptica

En el tema de óptica de los textos de enseñanza secundaria se suele introducir el concepto de imagen óptica mediante dos dispositivos: la lente convergente y la cámara oscura.. En cada uno de estos casos suelen realizarse esquemas y explicaciones como los siguientes:



“La imagen se forma al otro lado de la lente, donde se juntan los dos rayos trazados desde el objeto”.



“Se puede ver la imagen de un objeto al mirar la pantalla traslúcida de una cámara oscura”.

Critica y corrige lo que consideres necesario de estos esquemas y/o explicaciones y clarifica lo que entiendes por imagen óptica y su formación.

Nosotros esperamos, de acuerdo con nuestra hipótesis, que las respuestas y argumentos utilizados en esta cuestión señalen que los profesores tienen un concepto de imagen óptica no compatible con el que se deriva del modelo de visión de Kepler. Para su valoración usaremos el estadillo del cuadro 4.3

Cuadro 4.3: Estadillo para valorar el cuestionario C3-p

<p>Consideraremos a favor de nuestra hipótesis cuando:</p> <ul style="list-style-type: none">• Admitan el segundo esquema gráfico como representativo de formación de imagen óptica.• Admitan ambos válidos para representar la imagen óptica.• Admitiendo el primer trazado no incluyan al ojo como parte del sistema óptico y razonen usando haces de luz.
<p>No consideraremos la valoración a favor de nuestra hipótesis cuando:</p> <ul style="list-style-type: none">• Admitan el primer trazado, incluyan al ojo del observador como parte del sistema óptico y razonen usando haces de luz.

Por otra parte, nuestro diseño en este apartado, debe realizarse, también, para mostrar evidencias de que muchos profesores no tienen una concepción problematizada de la enseñanza de la óptica geométrica ni contemplan la presencia de obstáculos conceptuales y epistemológicos, por lo es previsible que:

- Los profesores, cuando analizan libros de texto habituales, no reconozcan las carencias de una enseñanza aproblemática.
- Los profesores propongan una estructura de enseñanza aproblemática y con una secuencia empirista que no tiene en cuenta los hallazgos de la investigación educativa ni el proceso histórico seguido hasta alcanzar el modelo de visión de Kepler.

Se han diseñado dos cuestionarios que codificamos como **C4-p** y **C5-p**, el primero para analizar la enseñanza habitual de una unidad didáctica de óptica y el segundo para proponer una posible estructura para esa unidad didáctica. En la primera parte los profesores dispusieron del texto de la unidad didáctica de óptica contenida en el libro de 4º de ESO de Física y Química, de Cañas, A., et al. (1995) de la editorial SM (Madrid).

Cuestionario C4-p. Valoración abierta sobre la estructura de una unidad didáctica habitual de óptica geométrica

El documento adjunto es una unidad didáctica sobre “La luz” de un libro de 4º de ESO. Te pedimos que analices los siguientes aspectos de la misma, expresando razonadamente tu **acuerdo** o **desacuerdo** con la forma en que se presentan, **identificando posibles errores**, etc...

- a. La forma de empezar el tema.
- b. La elección y el orden de los distintos apartados.
- c. La representación de la luz en los gráficos.
- d. Las explicaciones y dibujos sobre la formación de imágenes (centra tus comentarios en la imagen formada con una lente convergente).
- e. Las explicaciones sobre el color.

Aunque el texto de la unidad didáctica se puede consultar en el anexo 2, comentaremos algunas peculiaridades del mismo que puedan ayudarnos a entender los ítems seleccionados en el estadillo de valoración: en primer lugar, aunque inicialmente en el texto aparecen una breve reseña histórica y algunas cuestiones sobre ideas previas de los alumnos, a lo largo de la unidad didáctica no se vuelve a hacer referencia a ellas, ni la unidad didáctica está orientada a resolver esas posibles dificultades. Tampoco existe un índice explícito que permita establecer el orden lógico de los conceptos que se introducen.

Además, en el texto analizado, se definen explícitamente rayo y haz de luz en unos términos que no son compatibles con el modelo de visión de Kepler:

Rayo: "*línea de luz más estrecha que se puede obtener*" (pag. 134).

Haz de luz: "*conjunto de rayos que se dirigen en la misma o aproximadamente la misma dirección*" (pag. 134).

Por lo que respecta a los trazados gráficos, es de señalar que el texto apuesta claramente por lo que Chauvet et al., (1999) han denominado rayo materializado: los esquemas gráficos de formación de la imagen son fotos de las estelas difusoras de un haz de luz láser, acompañados de dibujos de flechitas para representar el objeto y la imagen, sin explicitar pantalla ni ojo de algún observador. El concepto de imagen óptica no está explicado, y únicamente se cita el algoritmo que permite localizar el punto imagen.

En las explicaciones del color no se indica, en ningún momento, que se trata de una sensación relacionada con la respuesta de los fotorreceptores al tipo de luz que incide en el ojo del observador, más bien asimila cada color a un tipo de luz. Frases como las siguientes lo ponen de manifiesto y no podemos pensar que se trata de una forma de hablar habitual, dado que en ningún momento hace aclaraciones sobre la forma de expresarse:

- *"La suma de colores del espectro produce de nuevo luz blanca"* (pag. 135).
- *"Un filtro verde, por ejemplo, colocado en el camino de los rayos de luz que atraviesan el prisma, absorbe los otros colores de la luz blanca que lo atraviesa"* (pag. 135)

Según las expectativas antes señaladas, para valorar este cuestionario utilizaremos el estadillo del cuadro 4.4.

Cuadro 4.4: Estadillo de valoración del cuestionario C4-p

Consideraremos a favor de nuestra hipótesis si:

1. No señalan la estructura apromblemática y empirista de la unidad didáctica, por lo que no hacen referencias a:

- La ausencia de problema estructurante
- La ausencia de actividades para mostrar el interés del estudio que se va a realizar
- La ausencia de un índice como estrategia
- Al planteamiento de la propagación, reflexión y refracción de la luz como leyes empíricas sin relación con la visión.

2. No señalan la ausencia de atención a los obstáculos que pueden impedir la comprensión de los conceptos, por lo que:

- No indican deficiencias en las explicaciones de los conceptos (objetos como fuentes luminosas, rayo y haz de luz, ...)
- No hacen referencias al tratamiento gráfico de la luz (la no visibilidad de la luz, la representación de los rayos como halos visibles,...)
- No señalan las deficiencias en las explicaciones y gráficos de la imagen óptica (tratamiento exclusivamente algorítmico, representación gráfica sin pantalla y/o sin ojo del observador,...)
- No señalan las dificultades de comprensión del color y los obstáculos detectados por la investigación didáctica a esta sensación

No consideraremos la valoración a favor de nuestra hipótesis si:

1. Indican que la estructura de la unidad didáctica es apromblemática (sin problema estructurante, ni actividades para mostrar su interés, ni índice como estrategia...)

2. Llamam la atención de la necesidad de tener en cuenta los obstáculos para la comprensión y de las deficiencias en su presentación

Después del análisis de algún libro de texto habitual y realizada una reflexión crítica de la forma en cómo se organiza la enseñanza, en un nuevo cuestionario, se les pide que propongan una forma razonada de secuenciar el tema y que expliciten qué forma sería la mejor para comenzar. El cuestionario **C5-p**, que presentamos a continuación, tratará de evidenciar, de la misma forma que con el cuestionario anterior, que la visión de los profesores que asisten a cursos de formación en óptica geométrica no tienen una concepción problematizada de la enseñanza de este tema.

Cuestionario C5-p. Valoración abierta sobre la forma en que estructurarían una unidad didáctica de óptica geométrica

Tras el análisis anterior –que, entre otras cosas, habrá servido para recordar- te presentamos, **desordenados**, una lista de tópicos que suelen formar parte de un tema sobre la “luz y la visión”. Te pedimos que propongas una forma de comenzar el tema y una posible secuenciación de apartados a tratar que creas que sería adecuada, justificando por qué piensas así. Puedes añadir o quitar apartados, pero justifica por qué.

- f.** Formación de imágenes en lentes delgadas
- g.** Reflexión
- h.** Modelo de visión
- i.** Color
- j.** Refracción
- k.** Funcionamiento óptico del ojo humano
- l.** Propagación rectilínea de la luz
- m.** Naturaleza de la luz

Comenzaría: ...

El orden de apartados sería:

La secuencia seguida en el tema de óptica por la mayoría de los manuales universitarios de Física, según ha estudiado Perales (1987), es de una gran jerarquía conceptual: Naturaleza de la luz, Principio de Huygens, Propagación rectilínea, Óptica geométrica, Principio de Fermat, Reflexión, Refracción, Espejos, Prisma óptico, Dispersión, Sistema óptico y Lentes. Por ello, es de esperar que los profesores, sin una concepción problematizada de la óptica, propongan secuencias similares a esta, sin prestar atención al planteamiento previo de un problema estructurante de interés ni al desarrollo histórico de los conceptos.

El estadillo de valoración de este cuestionario se muestra en el cuadro 4.5

Cuadro 4.5: Estadillo de valoración del cuestionario C5-pa

<p>Consideraremos a favor de nuestra hipótesis si:</p> <p>1. No proponen al comenzar el tema:</p> <ul style="list-style-type: none">• Plantear un problema estructurante.• Realizar referencias o actividades para mostrar el interés del estudio, a la evolución histórica de los conceptos, a aplicaciones tecnológicas,...• Seguir un índice como estrategia. <p>2. Proponen una secuenciación jerarquizada-empirista de los conceptos</p>
<p>No consideraremos la valoración a favor de nuestra hipótesis si:</p> <p>1. Proponen comenzar el tema con el planteamiento de un problema estructurante de interés y un índice como estrategia para avanzar en su solución</p> <p>2. Proponen una secuencia problematizada</p> <ul style="list-style-type: none">• En la que se contemplen los obstáculos para la comprensión de la óptica geométrica (modelos de visión alternativos, dificultades para aceptar las fuentes secundarias de luz, la complejidad del concepto de imagen,...).• En la que el orden de avance lo impone el orden epistemológico de los problemas que es necesario resolver (la visión directa de los objetos, la reflexión y la refracción como hipótesis para explicar la visión indirecta,...).

b) Diseño elaborado para analizar la enseñanza en los libros de texto habituales

Si deseamos validar que la enseñanza habitual presenta carencias que afectan a la comprensión de cómo vemos, una derivación de esta hipótesis es, lógicamente, que estas carencias deben encontrarse en los libros de texto. El análisis de libros de texto se hace obligado si se tiene en cuenta su uso generalizado en la enseñanza y su notable influencia en lo que ocurre en las aulas (Bullejos 1983; Del Carmen y Jiménez 1997). Pero este análisis deberá estar guiado, no sólo por las carencias conceptuales o metodológicas que puedan presentar, sino por las carencias, según la lógica de la enseñanza problematizada, de la propia estructura de las unidades didácticas en donde se presenta la óptica geométrica. Son escasas las investigaciones didácticas que contengan análisis específicos de óptica geométrica en las cuales apoyar nuestro diseño o con las cuales comparar nuestros resultados. Comentamos, no obstante,

algunas de ellas antes de presentar el diseño experimental que hemos elaborado con la intención de enmarcar esta investigación dentro de la panorámica general y en el contexto del currículo de la ESO.

Chauvet et al., (1999) después de analizar cinco libros de texto de grado 8 (catorce años) de los más usados en Francia para estudiar la correspondencia entre las intenciones didácticas de los nuevos currículos y el tratamiento dado en esos textos señalan:

- Los dibujos y esquemas que se presentan abundan en la idea de "rayo materializado": conos de sombra oscuros, "rayos" dibujados como estelas amarillas,...
- Sólo en dos de los cinco libros hay un capítulo sobre la visión, lo que sugiere algunas reservas sobre la adopción de las intenciones del nuevo currículo francés.
- Las imágenes son presentadas como si pudieran ser vistas de la misma forma que lo son los objetos ordinarios (dibujadas sin una pantalla difusora que envíe luz al ojo o sin dibujar un ojo en la dirección de propagación de la luz).
- El color, que es presentado en las instrucciones oficiales como un soporte a la introducción de la reflexión difusa, en los libros de texto adquiere importancia por sí mismo. En algunos textos se incluye, además, un conjunto de tópicos clásicos: espectro luminoso, filtros,...

En general, globalmente, se detecta una acumulación "*de lo nuevo sobre lo viejo*" ya que las cadenas de conceptos clásicos se mantienen, pero además se adoptan unas nuevas. Esta conclusión es convergente con la obtenida a partir de entrevistas y cuestionarios a profesores (Hirn y Viento, 2000), que confirman la resonancia entre la tendencia que muestran los libros de texto y la que muestran los profesores en cada uno de los siguientes tópicos: fuentes de luz, propagación rectilínea, visión y principio de formación de imágenes usando lentes convergentes delgadas.

En lo que respecta al currículo de óptica contenido en la nueva ley de educación española, LOGSE, el "Decreto de Enseñanzas Mínimas (1007/1991)" para Educación Secundaria contempla estas enseñanzas dentro del núcleo "La Energía" (cuadro 4.6).

Cuadro 4.6: La óptica en el decreto de enseñanzas mínimas en la ESO (LOGSE, 1991)

<p>Conceptos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Propagación de energía sin transporte de masa. Movimiento ondulatorio. Luz y sonido. <p>Procedimientos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Planificación y realización de experiencias sencillas dirigidas a analizar la descomposición de la luz blanca, a explorar los efectos de las mezclas de colores, así como la reflexión y la refracción. - Identificación de fenómenos de propagación de la luz y el sonido del entorno.
--

Con posterioridad, con el desarrollo de la LOCE se hicieron ciertas modificaciones legales que, sobre todo, especificaron los cursos de ESO donde debían ser tratados estos aspectos, así en el DECRET 39/2002, de 5 de març del DOGV. del Govern Valencià, se establece el nuevo currículum de la ESO (cuadro 4.7).

Cuadro 4.7: La óptica en el decreto de enseñanzas mínimas (LOCE, 2002)

2º ESO Ciencias de la Naturaleza	4º ESO. Física y Química
<p>Bloque3. La energía que percibimos Propagación de la luz y el sonido. Diferencias entre ellos. Otros tipos de ondas. El calor: energía en tránsito. Efectos. Calor y temperatura. Los termómetros. Propagación del calor. Aislantes y conductores. Percepción de la luz y del sonido: el ojo y la oreja. Percepción del calor: la piel.</p>	<p>Bloque 3. La energía de las ondas: luz y sonido. Concepto de onda. Tipos y características de las ondas. Transferencia de energía sin transporte de masa. La luz y el sonido. Propiedades de su propagación. Espectro lumínico.</p>
<p>Criterio de evaluación 19: Explicar fenómenos sencillos referidos a la transmisión de la luz y el sonido, analizando sus características, así como las estructuras y el funcionamiento de los órganos que los detectan. Se trata de evaluar si el alumnado puede aplicar los conocimientos del comportamiento de la luz y el sonido para explicar fenómenos naturales como las fases de la Luna, las imágenes que se forman en los vidrios y en el agua, el eco, la reverberación, etc. y de reproducir alguno de ellos. Ha de conocer, asimismo, el funcionamiento de los órganos de los sentidos relacionados con estas formas de energía.</p>	<p>Criterio de evaluación 11: Explicar fenómenos sencillos referidos a la transmisión de la luz y el sonido y reproducir alguno de ellos teniendo en cuenta las leyes de su transmisión y las condiciones que se requieren para su percepción. Con este criterio se pretende valorar si el alumnado puede aplicar los conocimientos del comportamiento de la luz y el sonido para explicar fenómenos naturales como las fases de la Luna, las imágenes que se forman en vidrios y en el agua, el eco, la reverberación, etc. y de reproducir algunos de ellos. Indicar las características de los sonidos para que sean audibles y describir su naturaleza.</p>

En opinión de Perales (1994) la luz queda enmarcada junto con el sonido dentro del contexto de la energía y, en concreto, dentro de su propagación sin transporte de masa. Los contenidos curriculares se extienden a la naturaleza "cromática" de la luz. Según este autor, las experiencias de la reflexión y refracción, deberían ser ampliadas, especialmente en el significado de la refracción y del funcionamiento de las lentes, pudiendo aprovechar la ocasión para formalizar conceptos tales como emisor primario y secundario, rayo o imagen. También cita que, debiera incluirse la visión y el ojo humano como etapa final de la propagación luminosa y su anatomía con relación a la detección de la luz.

Del currículum de la Enseñanza Secundaria sobre óptica se desprende, pues, una falta de concreción en lo que se refiere a los conceptos que debieran enseñarse y a su posible secuenciación. El hecho de estar enmarcado junto con el sonido en el contexto de la propagación de la energía sin transporte de masa, parece suponer que el legislador ha contemplado estos temas como ejemplificaciones del movimiento ondulatorio y no como temas con sentido en sí mismos, como ocurriría si el objetivo fuera explicar la visión y los fenómenos ópticos con ella asociados. Sin embargo, las dificultades para enfocar el estudio de este tema a partir de la naturaleza ondulatoria de la luz son muy grandes, mucho más, cuando según parece desprenderse del análisis histórico y epistemológico y de las opiniones de muchos investigadores (La Rosa et al. 1984, Guesne, 1989; Galili y Hazan, 2000a, 2000b; Andersson y Bach, 2004, etc.) el problema de la visión es anterior y mucho más cercano al interés de los estudiantes.

A partir de un análisis de 19 libros de texto (uno de BUP, uno de COU y el resto manuales universitarios), Perales (1987) estudia los conceptos básicos de óptica geométrica y la secuencia en que se presentan con la intención de establecer criterios útiles para el profesorado que afecten a su estructura curricular. El orden de tópicos predominante en la mayoría de los textos analizados es el que se muestra a continuación.

Si comparamos esta secuenciación que, "por consenso", constituye la estructura jerárquica de los conceptos de óptica geométrica, con la propuesta en el currículum de la ESO, no cabe duda que el legislador ha dado prioridad al criterio organizativo de tipo jerárquico de esta materia científica y no ha contemplado ni

los problemas que la investigación didáctica viene poniendo de relieve (modelos de visión alternativos, dificultades para aceptar las fuentes secundarias de luz, la complejidad del concepto de imagen,...) ni los problemas de orden epistemológico (la visión directa de los objetos, la reflexión y la refracción como hipótesis para explicar la visión indirecta,...) que venimos citando en este estudio.

Por nuestra parte, si lo que pretendemos es probar que la enseñanza habitual que se muestra en los libros de texto no está problematizada y presenta carencias que afectan a la comprensión de cómo vemos, el diseño operativo consistirá en probar que existen ausencias relevantes en los indicadores de lo que supone una adecuada comprensión del modelo

de visión de Kepler y en los indicadores de lo que supone una enseñanza problematizada de la luz y la visión que hemos recogida en la operativización de la hipótesis.

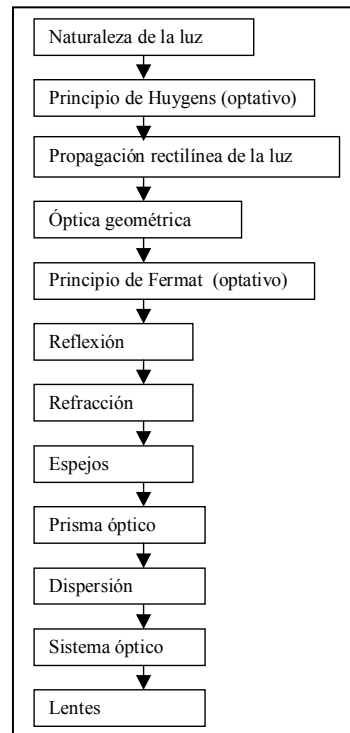
Sin pretender un análisis exhaustivo de todos los indicadores mencionados, hemos confeccionado una red de análisis que contiene:

a) Un primer apartado con algunos indicadores especialmente importantes de lo que supone una adecuada comprensión del modelo de visión de Kepler. En concreto, algunas consecuencias contrastables de carencias en:

- La concepción de la visión como proceso en el que llega luz al ojo.
- El esquema geométrico idealizado para representar la luz.
- El concepto de imagen y los trazados gráficos para su localización.

b) Un segundo apartado con los indicadores que hemos señalado que suponen una enseñanza problematizada de la luz y la visión en estos niveles de enseñanza. Esto es, si la enseñanza que se presenta en los libros de texto:

- Plantea el problema de "cómo vemos" como origen del estudio de la óptica geométrica.
- Introduce el modelo de visión por recepción de luz antes de abordar el estudio de los fenómenos ópticos: visión al mirar a un espejo, o a un objeto sumergido o las imágenes formadas por lentes,...



- Explicita alguna característica básica del esquema de representación geométrico; en concreto, si explica el significado de rayo y de haz de luz con el que se va a representar la propagación de la luz.
- Trata el modelo de ojo como instrumento óptico para introducir el concepto de imagen antes que la explicación de otros fenómenos ópticos (la visión al mirar a un espejo, al mirar a un objeto sumergido, etc.).
- Se considera la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción como hipótesis formuladas para explicar la visión.
- Plantea los límites de aplicación de la teoría geométrica a la visión.

La red de análisis que mostramos contiene 12 ítems, los números 4 y 5 se subdividen en tres cada uno de ellos, en los que hay que contestar Si o NO y, en algunos casos, cuando el texto no trate ese aspecto señalaremos una X.

Esta red de análisis ha sido aplicada a una muestra de 32 libros publicados de acuerdo con el currículo propuesto en la nueva ley de educación, LOGSE, entre los años 1994 y 2001. De ellos, 10 corresponden a libros del área de Ciencias de la Naturaleza para el primer ciclo de ESO (generalmente recomendados para el segundo curso de este ciclo), 9 corresponden a libros de Física y Química para el segundo ciclo de ESO (excepto uno de ellos, vienen recomendados para el 4º curso), 3 corresponden a libros de Técnicas de Laboratorio de Física y Química para el segundo ciclo de ESO y que contienen un tema de óptica geométrica, 1 corresponde a Física y Química de primer curso de bachillerato y 9 corresponden a Física de segundo curso de bachillerato. En el anexo 3 (pag. 391) se encuentra la relación de títulos, editoriales y autores de los libros consultados.

Cuestionario C6-L: Red de análisis de libros de texto

A) Indicadores de lo que supone una adecuada comprensión de “cómo vemos”	
Sobre la concepción de la visión como proceso en el que llega luz al ojo.	
1. ¿Trata los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones?	SÍ NO X
Sobre el esquema de representación geométrico idealizado de la luz	
2. ¿Señala expresamente que la luz no se ve?	SI NO
3. ¿Utiliza representaciones del rayo (halos coloreados, estelas sombreadas, estelas difusoras producto de iluminación con láser,...) que puedan dar lugar a interpretaciones erróneas sobre su significado?	SI NO X
Sobre el concepto de imagen óptica y su formación	
3. ¿Considera al ojo como instrumento formador de imágenes y, por tanto, forma parte del sistema óptico? Al mirar:	
- A un espejo plano.	SI NO X
- A un objeto sumergido en el agua.	SI NO X
- A la imagen formada por una lente convergente.	SI NO X
5. ¿Forma la imagen a partir de haces luz emitidos por cada punto objeto? En los casos de mirar:	
- A un espejo plano.	SI NO X
- A un objeto sumergido.	SI NO X
- A la imagen formada por una lente convergente.	SI NO X
6. ¿Asigna el color a una sensación unida a la imagen óptica y no a una característica exclusiva de la luz?	SI NO X
B) Indicadores de lo que supone una enseñanza problematizada	
7. ¿Plantea el problema de “cómo vemos” como origen de la teoría geométrica de la luz y la visión?	SI NO
8. ¿Establece la necesidad de que llegue luz al ojo para que se produzca la visión, antes de abordar el estudio de los fenómenos ópticos?	SI NO
9. ¿Explicita un sistema de representación geométrico idealizado de la luz?, al menos ¿explica el significado del rayo luminoso?	SI NO
10. ¿Elabora un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica?	SI NO
11. ¿Considera la propagación rectilínea, la reflexión o la refracción de la luz como hipótesis formuladas para explicar la visión?	SI NO
12. ¿Plantea los límites de aplicación de la teoría geométrica a la visión?	SI NO

Con la finalidad de contestar a cada uno de los ítems con la mayor precisión posible, a continuación clarificamos algunos aspectos de ellos y señalamos los criterios de valoración que vamos a utilizar.

1. ¿Trata los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones?

Una barrera que se debe clarificar para asegurarnos que el modelo de visión por recepción de luz ha sido comprendido y aceptado. Nos fijaremos en las explicaciones y diagramas que realicen los libros de texto sobre esta idea que suele ser tratada al comparar la reflexión difusa con la reflexión especular.

2. ¿Señala expresamente que la luz no se ve?

La luz es una entidad física en el espacio, no visible pero sabemos que los estudiantes la consideran visible y la identifican con la visión de las partículas de polvo cuando en una habitación oscurecida entra un haz de luz. Nos fijaremos si los libros de texto señalan expresamente esta característica de la luz para que pueda ser comprendido el sistema de representación de la luz utilizado y no entre en conflicto con ideas previas de los estudiantes.

3. ¿Utiliza representaciones del rayo (halos coloreados, estelas sombreadas, estelas difusoras producto de iluminación con láser,...) que puedan dar lugar a interpretaciones erróneas sobre su significado?

Como hemos dicho en el ítem anterior la luz no se ve, pero si en los esquemas que se realizan en los libros de texto se incluyen haces de luz coloreados como si fueran objetos visibles, haces de luz láser que iluminan superficies o que atraviesan espacios con partículas de polvo, etc..., para indicar la representación de la luz, se puede estar reforzando la idea alternativa de los estudiantes y alejándolos del esquema de representación geométrico e idealizado que debe ser utilizado en los esquemas y diagramas ópticos.

4. ¿Considera al ojo como instrumento formador de imágenes y, por tanto, forma parte del sistema óptico?

Como hemos comentado repetidamente, la imagen se forma en la retina del ojo por lo que no tiene sentido realizar esquemas para localizar la posición donde se ve la imagen sin representar en ese mismo esquema el ojo del observador. Buscaremos en los textos si los esquemas que realizan para representar la visión al mirar a un

espejo, a un objeto sumergido en el agua o a la imagen formada por una lente convergente, contienen un ojo al que le llega luz que proviene (o parece provenir) de la posición donde se localiza la imagen que se ve.

5. ¿Forma la imagen a partir de haces luz emitidos por cada punto objeto?

Lo aplicaremos en los casos de mirar a un espejo, a un objeto sumergido y a la imagen que se ve en una pantalla usando una lente convergente. Consideraremos el esquema correcto cuando en él se tracen, al menos, dos rayos desde un punto específico del objeto ya que, si no se especifica previamente, es difícil reconocer en ellos si se trata de un haz de luz.

6. ¿Asigna el color a una sensación unida a la imagen óptica y no a una característica de la luz?

Para tratar el carácter heterogéneo de la luz “blanca” en los textos se suele recurrir a explicar el fenómeno de la dispersión al atravesar un prisma. En lenguaje coloquial se suelen utilizar expresiones como: *luz azul, luz roja, luz monocromática,...*, sin embargo estas expresiones deben ser matizadas ya que, como sabemos, la luz no se ve y tampoco tiene color por lo que pueden reforzar las ideas intuitivas de los estudiantes si no son aclaradas o se cita que es una forma habitual de expresarse,.... Analizaremos los textos para buscar si se aclaran estas expresiones o se cita que el color es una sensación característica que acompaña a la imagen, pero que la luz no tiene color.

7. ¿Plantea el problema de “cómo vemos” como origen de la teoría geométrica de la luz y la visión?

Tratamos de averiguar si los textos introducen el tema de óptica geométrica con objeto de entender la visión, sin pretender por ello que se formule el problema expresamente ni que se justifique el contenido del tema como un intento de resolver este problema. Este es el primer ítem para valorar si las unidades didácticas de óptica geométrica de los libros de texto tienen una estructura problematizada o, por el contrario, si tienen una estructura empirista en donde se estudian las propiedades de la luz, incluso la formación de imágenes y, sólo al final del capítulo, es tratado el problema de cómo vemos al estudiar el ojo humano como un ejemplo más de instrumento óptico.

8. ¿Establece la necesidad de que llegue luz al ojo para que se produzca la visión, antes de abordar el estudio de los fenómenos ópticos?

La necesidad de alineamiento de los agujeros efectuados en cuerpos opacos para ver a través de ellos, la visión al mirar a un espejo, o a un objeto sumergido, etc. son fenómenos ópticos familiares que se intentan explicar en la mayoría de los libros de texto. La explicación que se hace de ellos necesita haber establecido, previamente, que la visión se produce al llegar luz al ojo procedente (directa o indirectamente) del objeto visto, en caso contrario podemos dejar inalterados en los estudiantes modelos de visión alternativos. Buscaremos en los textos analizados si se da o no esta explicación antes de abordar el comportamiento de la luz o los fenómenos ópticos asociados con él.

9. ¿Explicita un sistema de representación geométrico idealizado de la luz? O, al menos, ¿explica el significado del rayo luminoso?

En los libros de Física y Química es habitual realizar diagramas explicativos del texto escrito. En el caso de la óptica geométrica, la representación de la luz se hace desde el inicio mismo de la unidad didáctica trazando rayos de luz. Buscaremos si existe una explicación correcta del significado del rayo de luz ya que un esquema de representación geométrico e idealizado de la luz necesita clarificar este concepto básico para no reforzar ideas intuitivas fuertemente arraigadas en el pensamiento de los estudiantes, como asimilar los rayos de luz a los halos que se ven alrededor de las fuentes primarias, o por la difusión de la luz en las partículas de polvo, etc.

10. ¿Elabora un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica?

El concepto de imagen está íntimamente unido al funcionamiento del ojo por lo que no tiene sentido hablar de imagen si no es por referencia a la visión. Según la teoría de Kepler la imagen es la figura que se forma en la retina del ojo y es de la que el observador obtiene la sensación de forma, tamaño, color, etc. El modelo más simplificado de ojo es un sistema formado por una lente de potencia variable y una pantalla en una posición fija y determinada. Buscaremos si en los libros de texto introducen el concepto de imagen por referencia al ojo humano como instrumento óptico, al menos, en su modelización más sencilla, como un sistema lente-pantalla.

11. ¿Considera la propagación rectilínea, la reflexión o la refracción de la luz como hipótesis formuladas para explicar la visión?

El análisis histórico y epistemológico de la luz y la visión ha revelado que la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción se introdujeron como hipótesis coherentes con la teoría de la visión que se estaba construyendo. La introducción de este comportamiento de la luz como consecuencia de una determinada concepción de la luz previamente establecida pondría de manifiesto una enseñanza de carácter empirista y ahistórico. Buscaremos en los libros de texto si introducen estos conceptos como consecuencias empíricas de la naturaleza de la luz o si lo hacen por referencia a la visión.

12. ¿Plantea los límites de aplicación de la teoría geométrica a la visión?

Sabemos que sólo cuando se tuvieron explicaciones suficientemente coherentes y universales a los fenómenos ópticos y se establecieron los límites de la validez de la óptica geométrica, los científicos plantearon el problema de la naturaleza de la luz como origen de sus investigaciones. Buscaremos si los libros de texto citan algunas de las limitaciones de la óptica geométrica (los haces paraxiales, las lentes delgadas, los límites al aumento que se puede conseguir en los instrumentos ópticos, etc.) o, por el contrario, presentan los resultados de la óptica geométrica con una validez absoluta, lo que revelaría una concepción de la enseñanza aproblemática y ahistórica.

c) Diseño para analizar el tipo de enseñanza que evocan los exámenes de selectividad

Si queremos probar que la enseñanza habitual no contempla los obstáculos detectados en el estudio histórico y epistemológico y tiene un carácter marcadamente empirista y aproblemático, un corolario de esta derivación sería que las actividades que se proponen en los exámenes de selectividad deben reflejar estas características. Es decir, pensamos que en los exámenes de selectividad no se solicita la clarificación de los conceptos básicos implicados en el modelo de visión de Kepler y reflejan una enseñanza aproblemática y empirista.

La importancia del análisis de esta evaluación externa radica en la gran influencia que tiene en el profesorado, de hecho, estas pruebas influyen sobre la enseñanza/aprendizaje antes de hacerlas. ¿Acaso el tipo de preguntas y respuestas que se demandan, el modo en cómo se obtienen y utilizan los resultados, etc., no influye en el comportamiento de alumnos y profesores? (Martínez Torregrosa y Verdú, 1999; Alonso et al. 1992a, 1996). Los profesores dan importancia y acaban enseñando lo que les van a exigir a sus alumnos en la prueba de selectividad.

Dado que esta evaluación externa es una prueba de constatación/calificación terminal, cobra gran importancia la intención de ser lo más "objetivo y aséptico" posible, de "medir" con precisión los logros de cada estudiante. Ello exige, claro está, reducir la evaluación a los aspectos más fácilmente medibles y evitar todo lo que pueda dar lugar a respuestas imprecisas (planteamientos cualitativos, relaciones CTSA, situaciones problemáticas abiertas, etc.). Los trabajos de Alonso, Gil y Martínez Torregrosa (1992a) así lo corroboran.

Partiendo de esta experiencia es fácil prever que las cuestiones de óptica geométrica de las pruebas de selectividad tendrán, también, estas características, con lo que es de esperar que en la mayoría de los casos se trate de problemas numéricos de manejo y aplicación de fórmulas, o de aplicación de algoritmos para localizar la posición de la imagen y escasamente se planteen cuestiones de clarificación de conceptos. Por otro lado, esa misma (¿falsa?) intención de hacer la prueba "objetiva y aséptica" hará que los conceptos sean tratados y presentados casi exclusivamente de forma operativa, sin prestar

atención al modelo de visión de Kepler ni a los obstáculos que venimos señalando para su comprensión.

Sin intención de ser exhaustivos, hemos elaborado una red de análisis para conocer el porcentaje de actividades de evaluación que demandan los distintos aspectos señalados anteriormente **C7-S**.

La muestra de exámenes de selectividad es de 63 actividades (entre cuestiones y problemas, pero dado que en algunos de ellos se demanda a los alumnos dos o más cuestiones, el número total de preguntas analizadas es de 111. Las actividades analizadas son de una muestra al azar de exámenes de selectividad aparecidos entre los años 1998 y 2003 en diferentes Comunidades Autónomas (véase anexo 4 en pag. 393).

Red de análisis C7-S. Estadillo para conocer el tipo de actividades de óptica y la demanda de aspectos del modelo de visión de Kepler en las pruebas de selectividad

<ul style="list-style-type: none">• Sobre el tipo de actividades
<ul style="list-style-type: none">• Actividades que solicitan respuestas a cuestiones numéricas y/o operativas.
<ul style="list-style-type: none">• Actividades que solicitan la aplicación de algoritmos de localización de imágenes.
<ul style="list-style-type: none">• Actividades cualitativas que demandan repetición memorística.
<ul style="list-style-type: none">• Actividades cualitativas de manejo significativo de los conceptos.
<ul style="list-style-type: none">• Sobre la demanda de aspectos fundamentales del modelo de visión de Kepler
<ul style="list-style-type: none">• Actividades que demandan explicaciones relacionadas con la visión de objetos.
<ul style="list-style-type: none">• Actividades que demandan clarificación de los conceptos implicados en el modelo de visión de Kepler (haz de luz, rayo, imagen óptica,...).
<ul style="list-style-type: none">• Actividades con redacción no compatible con el modelo de Kepler.

4.3.3 Visión general del diseño realizado para contrastar la primera hipótesis

Tabla 4.3: Esquema global de la contrastación de la primera hipótesis

Hipótesis 1^a: “Las metas parciales y los obstáculos identificados para la comprensión de cómo vemos de acuerdo con el modelo de visión de Kepler, son relevantes para la mejora didáctica”		
UNA ADECUADA COMPRENSIÓN DE CÓMO VEMOS SEGÚN EL MODELO DE KEPLER SUPONDRÍA:	CONSECUENCIAS CONTRASTABLES	INSTRUMENTOS
	SIN EMBARGO,....	
<p>Concebir la visión a partir de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo.</p> <p>Disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo.</p> <p>Conocer el concepto de imagen óptica del modelo de Kepler.</p> <p>Concebir el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferente de tres fotorreceptores retinianos.</p> <p>Conocer los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos.</p>	<p>Los alumnos tienen ideas y razonamientos sobre las metas parciales necesarias para comprender cómo vemos, similares a los obstáculos recogidos en el cuadro 3.4, que deben contemplarse si deseamos que se apropien del modelo de visión de Kepler. Lo que se pondría de manifiesto si:</p> <p>A. Dichos obstáculos existen en los estudiantes de ESO antes de la enseñanza.</p> <p>B. Esos obstáculos persisten en los estudiantes de diferentes niveles después de la instrucción habitual en óptica geométrica.</p> <p>La enseñanza habitual no contempla los obstáculos para comprender cómo vemos y tiene un carácter marcadamente empirista y aporoblemático, o que se pondría de manifiesto si:</p> <p>A. Los profesores de Física y Química... - Presentan carencias en la comprensión de aspectos clave del modelo de visión de Kepler. - No reconocen la ausencia de atención a los obstáculos para la comprensión de aspectos claves del modelo de visión de Kepler al analizar libros de texto habituales. - Proponen secuencias de enseñanza con estructura aporoblemática y empirista.</p> <p>B Los libros de texto habituales... - Reflejan ausencia de atención a los obstáculos para comprender cómo vemos. - Presentan una enseñanza aporoblemática y empirista.</p> <p>C. Los exámenes de selectividad... - No solicitan la clarificación de aspectos clave del modelo de visión de Kepler. - La mayoría de las actividades son de tipo memorístico, numérico o algorítmico.</p>	<p>Ca-1</p> <p>Ca-2,Ca-3</p> <p>C1-p,C2-p y C3-p</p> <p>C4-p</p> <p>C5-p</p> <p>C6-L</p> <p>C6-L</p> <p>C7-S</p> <p>C7-S</p>

CAPÍTULO 5

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA PRIMERA HIPÓTESIS

En el capítulo anterior hemos fundamentado nuestra hipótesis y hemos presentado el diseño experimental para su contrastación. Las consecuencias contrastables hacen referencia, en primer lugar, a que los obstáculos conceptuales y epistemológicos que es necesario superar para comprender cómo vemos, existen en los alumnos antes de la enseñanza y persisten con la enseñanza habitual. En segundo lugar y como muestra de la relevancia didáctica de la planificación de la enseñanza que hemos elaborado, las consecuencias contrastables hacen referencia a que la enseñanza habitual no los contempla y presenta los contenidos de forma aproblemática y empirista lo que se manifestará en el análisis de libros de texto, la visión de los profesores y las características de los exámenes de selectividad.

Para contrastar nuestra hipótesis se han diseñado los siguientes instrumentos:

- Los cuestionarios **C1-a**, **C-2a** y **C-3a** con 11, 7 y 11 cuestiones respectivamente destinados a una muestra de 71 alumnos de ESO antes de la enseñanza, una muestra de 183 alumnos de ESO después de la enseñanza y otra de 59 alumnos de bachillerato después de la enseñanza.
- Los cuestionarios **C1-p**, **C2-p**, **C3-9**, **C4-p** y **C5-p** destinados a una muestra de 64 profesores asistentes a diferentes cursos de formación en óptica geométrica (aunque no todos los cuestionarios fueron pasados al total de profesores de la muestra).
- Una red de análisis de libros de texto de 12 ítems para una muestra de 32 libros de texto.
- Una red de análisis de exámenes de selectividad de 7 ítems para una muestra de 111 cuestiones de óptica geométrica correspondientes a 63 exámenes de distintas comunidades autónomas.

Presentamos los resultados obtenidos en la contrastación de la hipótesis en dos apartados:

- A) En primer lugar, los resultados de los porcentajes de los obstáculos para la comprensión de cómo vemos obtenidos con los estudiantes antes y después de la enseñanza habitual. Dado que nos interesa, sobre todo, obtener información de primera mano de las ideas y razonamientos de los estudiantes para el diseño de actividades concretas y el sistema de evaluación, en suma, para la elaboración de la estructura fina de la unidad didáctica, nos detendremos en analizar fundamentalmente el tipo de respuestas de los estudiantes antes de la enseñanza y su distribución en las distintas categorías más abundantes.
- B) En segundo lugar, los resultados del análisis de la enseñanza habitual obtenidos con profesores de Física y Química, libros de texto y exámenes de selectividad.

5.1 Resultados que muestran que los alumnos presentan obstáculos a la comprensión del modelo de visión de Kepler y que esos obstáculos persisten a la enseñanza habitual.

En las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 presentamos los porcentajes de obstáculos a cada una de las metas parciales para la comprensión del modelo de visión de Kepler, antes de la enseñanza y para las dos muestras de estudiantes después de la enseñanza habitual. Algunos de los obstáculos han sido puestos en evidencia en varias situaciones, por lo que presentamos, en esos casos, además, el porcentaje medio obtenido de todas ellas. Dado que en cada meta parcial hemos identificado varios obstáculos, también presentamos el valor medio de esos obstáculos. El uso de estos valores medios puede ser criticado por falta de rigor y de precisión, pero se justifican, no sólo por la facilidad del análisis de resultados que con posterioridad se haga, sino porque, como es sabido, las respuestas de los estudiantes están condicionadas por el tipo de situación que se les presente, entre otros muchos factores imposibles de controlar por la complejidad de un grupo-clase. Como se cita expresamente en *Scientific Inquiry in Education* (National Research Council, 2001), en el capítulo 4, al dar los rasgos característicos de la investigación educativa:

"...las teorías sobre fenómenos sociales (comportamiento humano, ideas, cultura,...) no están tan bien desarrolladas como las teorías de los fenómenos físicos y, a veces, están fuera del control directo de los investigadores, los resultados son siempre probabilísticos y tienden a ser más tentativos que en las ciencias físicas. En términos técnicos esto significa que los límites de error

asociados con las inferencias científicas tienden a ser más grandes en la investigación social y del comportamiento, ese "ruido" es debido a las dificultades en la precisión de la medida de los tipos de constructos y a la importancia de los factores contextuales..."

Tabla 5.1: Resultados sobre la existencia y persistencia de obstáculos para disponer de un modelo de visión en el que se relaciona la luz, el objeto y el ojo del observador

Porcentaje de alumnos que no disponen de un modelo (aunque no sea el de Kepler) de visión en el que se relaciona la luz, el objeto y el ojo del observador, ya que...	Antes de la enseñanza		Después de la enseñanza habitual			
	ESO n= 71 % Sd		ESO n=183 % Sd		BAC n= 59 % Sd	
A₁ . No consideran necesario que llegue luz al ojo procedente del objeto:						
- Para ver directamente	89	4	60	4	34	6
- Para ver en un espejo	92	3	83	3	36	6
- Para ver un objeto sumergido	92	3	---		47	6
- Por lo que creen que es posible ver en la oscuridad total	85	4	---		---	
Valor medio A₁	90	3	72	3	39	6
A₂ . No consideran a los objetos iluminados fuentes luminosas, por lo que:						
- No señalan que los objetos emitan luz al ser iluminados	92	3	78	3	53	6
- No citan objetos iluminados como ejemplos de fuentes luminosas	-----		76	3	-----	
Valor medio A₂	92	3	77	3	53	6
A₃ . No consideran la luz como una entidad física que viaja en el espacio, por lo que:						
- Creen que sólo existe luz en las fuentes luminosas o en sus proximidades	86	4	86	3	70	6
- Creen que la luz desaparece cuando se apaga la fuente luminosa	89	4	92	2	85	5
Valor medio A₃	88	4	89	2	78	5

Tabla 5.2 Resultados sobre la existencia y persistencia de obstáculos para disponer de un esquema básico de representación geométrica e idealizada de la propagación de la luz, potencialmente explicativo

<i>Porcentaje de alumnos que no disponen de un esquema de representación idealizada de la propagación de la luz potencialmente explicativo/ predictivo (aunque no lleguen a utilizar el modelo de Kepler), ya que...</i>	Antes de la enseñanza		Después de la enseñanza habitual			
	ESO n= 71 % Sd		ESO n=183 % Sd		BAC n= 59 % Sd	
B₁ . Creen que la propia luz es visible.	83	4	73	3	59	6
B₂ . No consideran las fuentes extensas de luz como conjuntos de emisores puntuales:						
- Al explicar la visión directa de un objeto	83	4	88	2	59	6
- Al representar la luz difundida por un objeto	96	2	94	2	88	4
- Al explicar la visión de un objeto en un espejo	87	4	94	2	47	6
- Al explicar la formación de la imagen en una pantalla	92	3	73	3	19	5
Valor medio B₂	90	3	87	2	53	6
B₃ . No representan haces de luz emitidos desde cada punto del objeto:						
- Al explicar la visión directa de un objeto	100	-	97	1	97	2
- Al explicar la visión de un objeto en un espejo	100	-	98	1	97	2
- Al explicar la visión de un objeto sumergido en agua	100	-	----		97	2
- Al explicar la formación de una imagen en una pantalla	100	-	99	1	93	3
- Al predecir la sombra y penumbra	94	3	----		76	6
Valor medio B₃	99	1	98	1	92	4

Tabla 5.3: Resultados sobre la existencia y persistencia de obstáculos para disponer del modelo de formación de imágenes de Kepler (el mínimo con suficiente entidad y capacidad explicativa y predictiva para ser enseñado en la etapa secundaria)

<i>Porcentaje de alumnos que no disponen de un modelo de formación de imágenes que sea funcional (el modelo de Kepler), ya que ...</i>	Antes de la enseñanza		Después de la enseñanza habitual			
	ESO n= 71		ESO n=183		BAC n= 59	
	%	Sd	%	Sd	%	Sd
C₁. Creen que la imagen se traslada “ya hecha” desde el objeto o que los rayos son portadores de cada uno de los puntos de la imagen, lo que se manifiesta en que:						
<ul style="list-style-type: none"> ▪ No realizan correctamente los esquemas de formación de la imagen que se ve: <ul style="list-style-type: none"> - Al mirar a un espejo - Al mirar hacia un objeto sumergido - Al mirar a una pantalla donde se ve la imagen formada por una lente convergente ▪ Consideran que la imagen que se ve en una pantalla: <ul style="list-style-type: none"> - Se mueve con la pantalla - Existe aunque se quite la lente - Se ve la mitad al tapar media lente. 	100	-	99	1	97	2
	100	-	----		95	3
	100	-	98	1	86	5
	97	2	95	2	78	5
	91	3	95	2	69	6
	90	4	80	3	73	6
Valor medio C₁	96	2	95	2	83	5
C₂. No consideran al ojo como un instrumento óptico formador de imágenes, por lo que:						
<ul style="list-style-type: none"> - No explican la percepción de la forma y el tamaño de los objetos que vemos a partir de la imagen retiniana - El ojo no participa como receptor de luz en los trazados gráficos de formación de la imagen en un sistema lente-pantalla 	-		97	1	53	6
	100	-	90	2	97	2
Valor medio C₂	100	-	94	2	75	6

Tabla 5.4: Resultados sobre la existencia y persistencia de obstáculos para disponer del modelo de formación de imágenes de Kepler (el mínimo con suficiente entidad y capacidad explicativa y predictiva para ser enseñado en la etapa secundaria)

<i>Porcentaje de alumnos que no conciben el color como una sensación que se obtiene a partir de la respuesta diferencial de tres fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente, ya que...</i>	Antes de la enseñanza		Después de la enseñanza habitual	
	ESO n= 71 % Sd	ESO n=183 % Sd	BAC n= 59 % Sd	
D₁ . No consideran el carácter heterogéneo de la luz “blanca”.	93	3	---	46 6
D₂ . No relacionan el color con una sensación elaborada a partir de la respuesta de los fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente.	100	-	---	92 4
<i>Porcentaje de alumnos que desconocen los límites de validez de la óptica geométrica para explicar cómo vemos, ya que...</i>				
E₁ . Desconocen el campo de aplicabilidad de la óptica geométrica	---	---	100	-
E₂ . No consideran que en la sensación de la visión participa en último término la mente (ilusiones ópticas, interpretación de lo que vemos, ...)	---	---	90	4

En los gráficos 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran los porcentajes medios de alumnos en las distintas muestras que no han superado obstáculos necesarios para la consecución de los cuatro primeros indicadores de comprensión.

Gráfico 5.1: Obstáculos para la adquisición de un modelo de visión en el que se relacione el objeto, la luz y el ojo

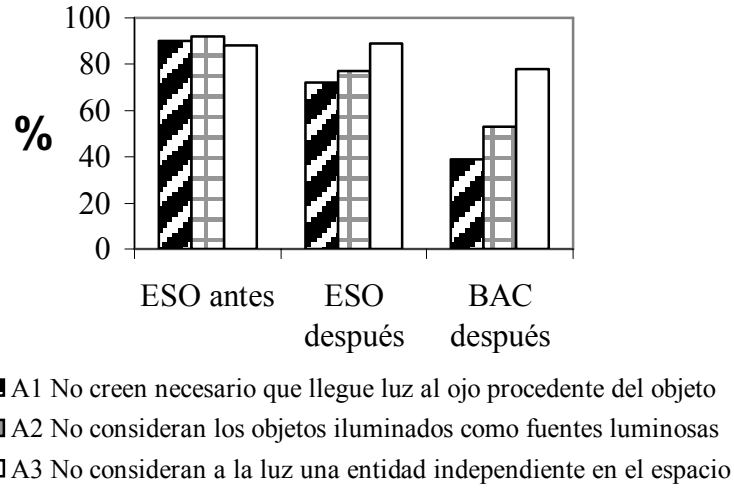


Gráfico 5.2: Obstáculos para la comprensión del esquema de representación geométrico idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo

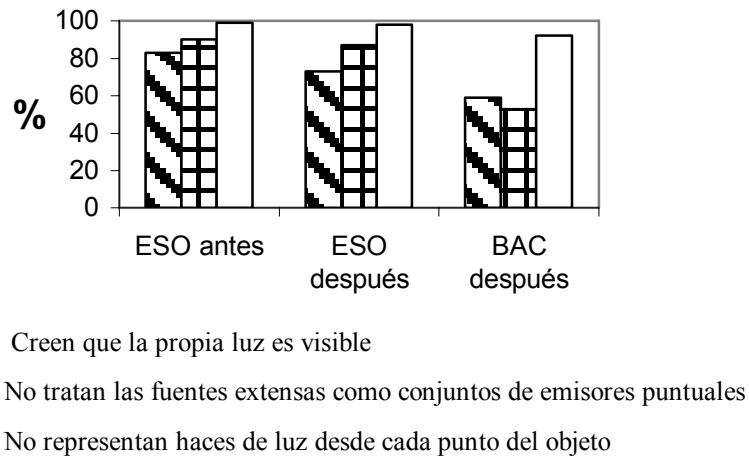


Gráfico 5.3: Obstáculos para la comprensión del modelo de formación de imágenes de Képler (mínimo funcional)

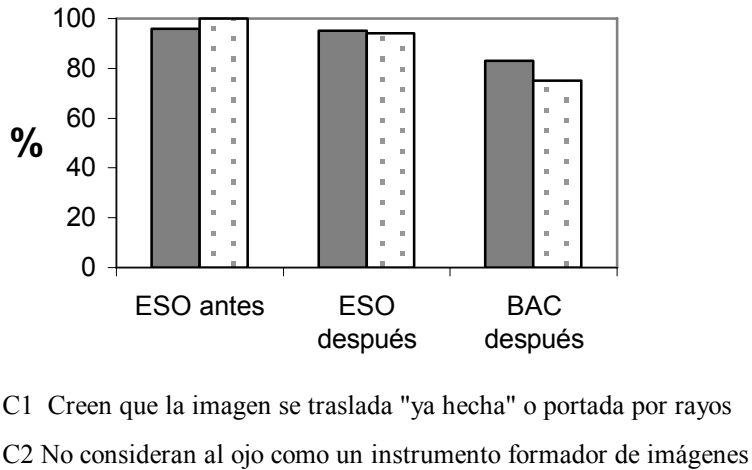
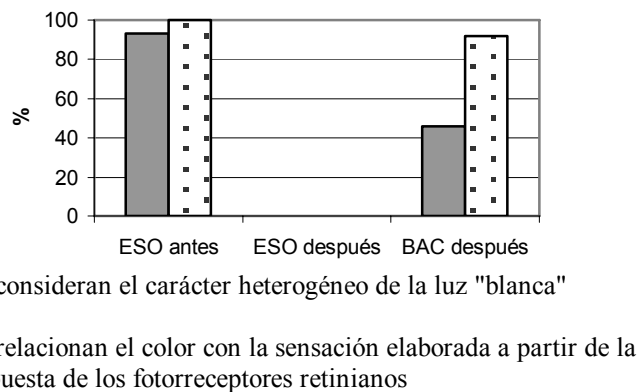


Gráfico 5.4: Obstáculos para la comprensión de la visión del color



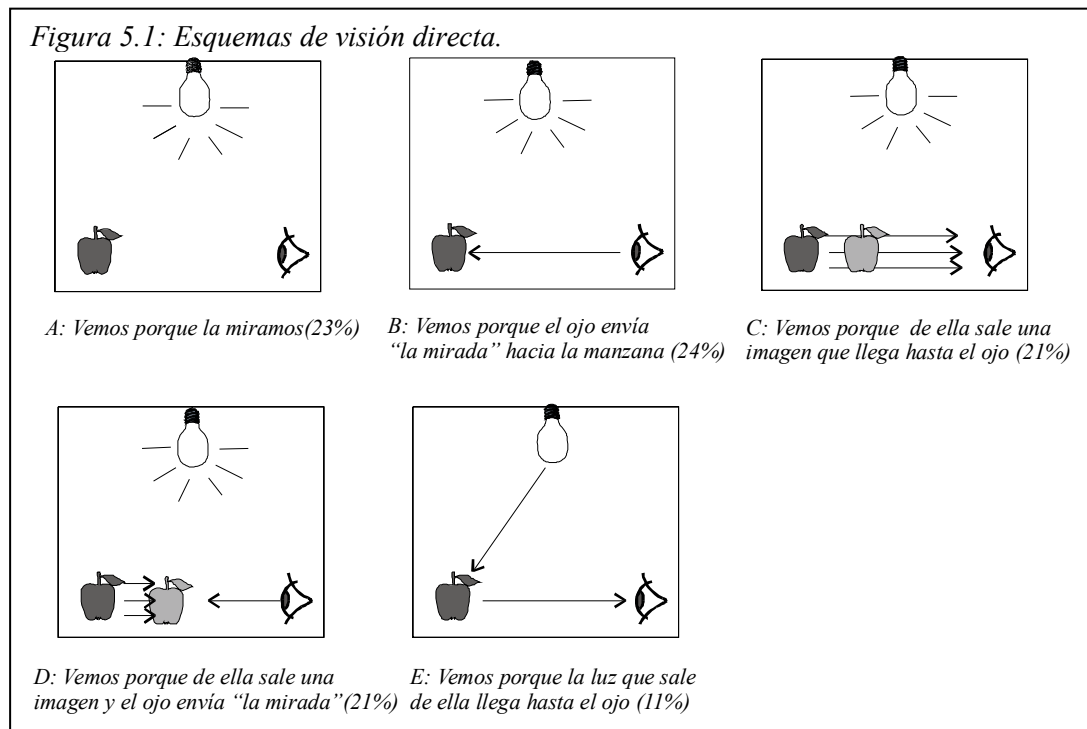
Dado que la intención de este estudio empírico es no sólo mostrar que las ideas y razonamientos de los estudiantes son obstáculos a la comprensión de cómo vemos sino, además, obtener evidencias del tipo de razonamientos que hacen los alumnos que puedan servir para diseñar actividades como contraejemplos, o para el diseño del sistema de evaluación, etc., vamos a exponer los resultados de los alumnos antes de la enseñanza agrupados en las distintas categorías mayoritarias aunque esto suponga más información que la estrictamente buscada para confirmar nuestra hipótesis.

Ideas y razonamientos de los estudiantes sobre el modelo de visión

En la tabla 5.5 mostramos los porcentajes de los diferentes modelos de visión directa deducidos de las respuestas de los alumnos de ESO antes de la enseñanza a la cuestión C-1 (pag. 106) del cuestionario **Ca-1**.

TABLA 5.5: MODELOS DE VISIÓN DIRECTA	(n=71)	%	(Sd)
A. Vemos porque la miramos.		23	(5)
B. Vemos porque el ojo envía “la mirada” hacia la manzana.		24	(5)
C. Vemos porque de ella sale una imagen (o una especie de reflejo) que llega hasta el ojo.		21	(5)
D. Vemos porque de ella sale una imagen y el ojo envía “la mirada”.		21	(5)
E. Vemos porque la luz que sale de ella llega hasta el ojo.		11	(4)

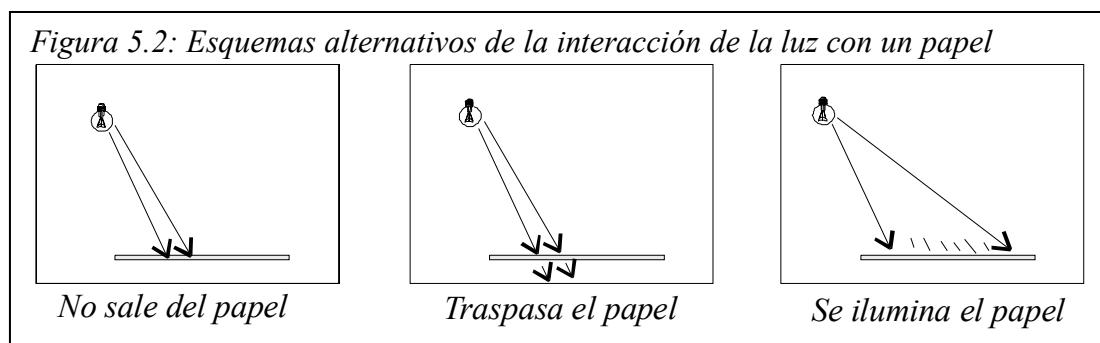
Las opciones contenidas en la tabla se corresponden con los esquemas de la figura 5.1



Sobre si los objetos iluminados emiten luz, los resultados obtenidos de la cuestión C-3 (pag. 113) con alumnos de ESO antes de la enseñanza se muestran en la tabla 5.6:

TABLA 5.6: COMPORTAMIENTO DE LA LUZ AL INCIDIR EN UN PAPEL	(n=71)	%	(Sd)
A. La luz no es difundida (es absorbida, traspasa, lo ilumina, le da color,...).		92	(3)
B. Refleja un solo rayo.		4	(2)
C. Refleja varios rayos en distintas direcciones.		1	(1)
D. No contestan.		3	(2)

Es de destacar que los porcentajes obtenidos en las distintas categorías son coherentes con los resultados encontrados en los modelos de visión directa alternativos, ya que el porcentaje de alumnos que admite que el papel iluminado emite luz (5 %), es del mismo orden que el porcentaje que admite que para ver un objeto se recibe luz en el ojo procedente de él (11%). Los esquemas que realizan mayoritariamente los alumnos para representar la interacción de la luz con el papel son similares a los que mostramos en la figura 5.2



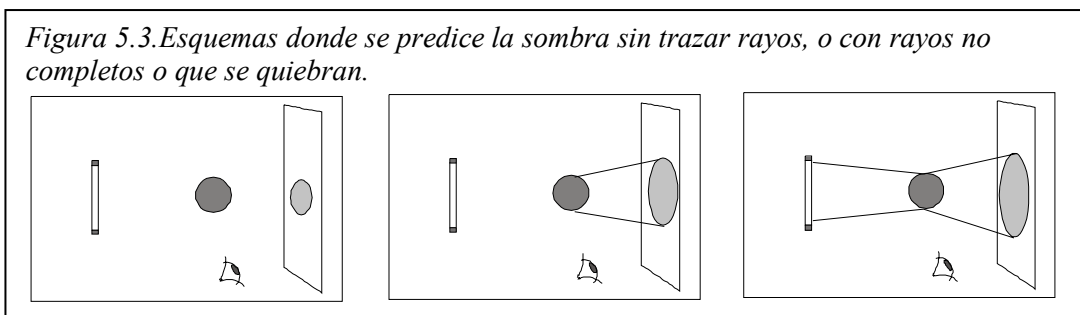
La misma coherencia se encuentra en las repuestas de la C-4 (pag.115): Los alumnos mayoritariamente (86 %) opinan que la luz sólo se encuentra en las zonas próximas a las fuentes primarias (los faros) o a los objetos fuertemente iluminados y una vez que se apaguen los faros, piensan que la luz desaparece (89 %), dejando traslucir una concepción estática de la luz al admitir que está pegada a las fuentes o a los objetos fuertemente iluminados y no como una entidad independiente que viaja en el espacio. Este razonamiento se muestra muy persistente ya que en los estudiantes de 2º curso de bachillerato, después de la instrucción, el porcentaje de alumnos que tiene una concepción estática de la luz es del 85 %.

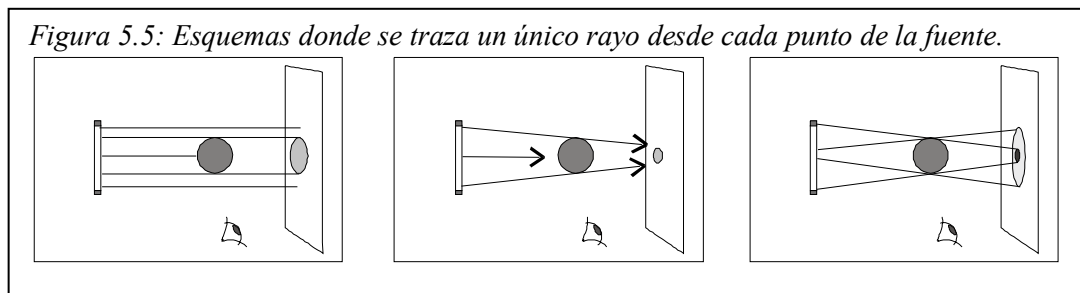
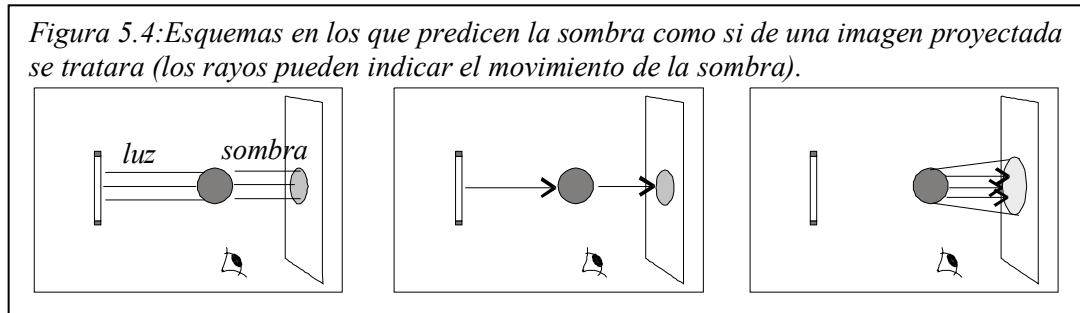
Ideas y razonamientos de los estudiantes sobre la representación geométrica e idealizada de la luz.

Hemos visto que los porcentajes de alumnos que consideran la luz visible, antes de la enseñanza es del 83 % y que este porcentaje sólo desciende hasta el 59 % en alumnos de 2º curso de bachillerato después de la instrucción, lo que muestra que las barreras que se oponen a la idealización necesaria para representar la luz y realizar los trazados ópticos, todavía no han sido superadas después de la enseñanza habitual.

Sobre los trazados gráficos que realizan usualmente los estudiantes, presentamos algunos de los esquemas más repetidos cuando afrontan la predicción de sombras y penumbras formadas en una pantalla al iluminar un objeto opaco con una fuente extensa (C-6, pag.119). Los porcentajes de las distintas categorías de los alumnos de 3º de ESO antes de la enseñanza, se encuentran en la tabla 5.3 y los esquemas típicos en las figuras 5.3, 5.4 y 5.5. Para interpretar los esquemas de los estudiantes y poder agruparlos en las distintas categorías, con posterioridad a la cumplimentación del cuestionario, se realizaron entrevistas personales a un tercio de la muestra aproximadamente.

TABLA 5.7: PREDICCIÓN DE SOMBRAS Y TRATAMIENTO GEOMÉTRICO DE LA LUZ (n=71)	%	(Sd)
A. Predice la sombra sin trazar, o con rayos no completos o que se quiebran.	33	(6)
B. Predice la sombra como una imagen proyectada.	20	(5)
C. Traza un único rayo desde cada punto.	35	(6)
D. Realiza un trazado correcto.	4	(2)
E. Otras respuestas.	8	(3)
La fuente extensa no es considerada como un conjunto de fuentes puntuales emisoras de luz en todas las direcciones.	96	(2)
La sombra predicha no se justifica del trazado.	66	(6)





Ideas y razonamientos de los alumnos sobre la formación de imágenes.

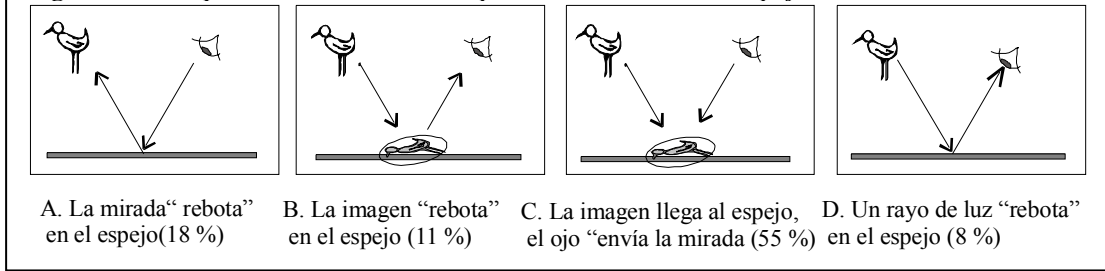
Sobre las ideas de los estudiantes en los casos de visión indirecta como la que se da al mirar a un espejo, las repuestas de los alumnos de ESO antes de la enseñanza a la cuestión C-7 (pag.122), en las distintas categorías de interés, se muestran en la tabla 5.8.

TABLA 5.8: MODELOS DE VISIÓN ALTERNATIVOS AL VER LA IMAGEN EN UN ESPEJO (n=71)	%	(Sd)
A. El ojo envía “la mirada” que rebota en el espejo y llega al pájaro.	18	(5)
B. Una imagen del pájaro llega al espejo, “rebota” y llega hasta el ojo.	11	(4)
C. Una imagen del pájaro llega hasta el espejo y se queda en él. El ojo “envía la mirada” a esa imagen en el espejo.	55	(6)
D. Un rayo de luz que sale de cada punto del pájaro “rebota” en el espejo y llega hasta el ojo.	8	(3)
E. Otras respuestas.	7	(3)

Es de destacar que sólo 2 alumnos de ESO antes de la enseñanza (3 % de la muestra) señalan la posición de la imagen detrás del espejo.

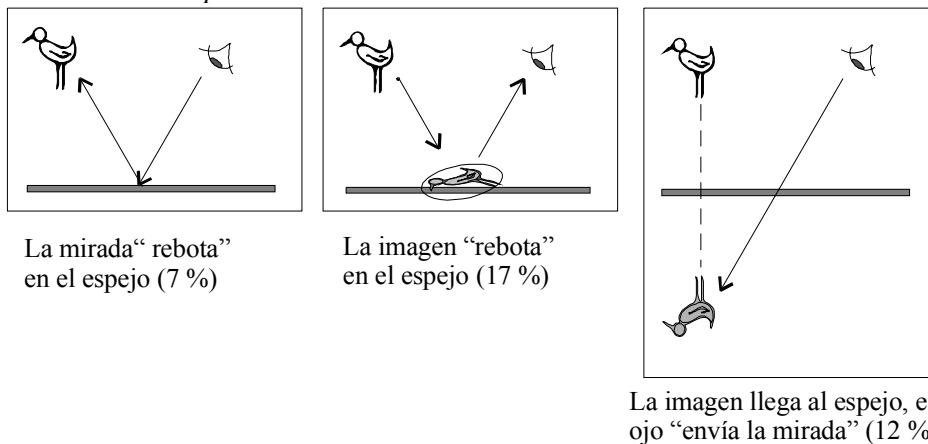
Los esquemas usuales de las opciones mayoritarias contenidas en la tabla se muestran en la figura 5.6.

Figura 5.6: Esquemas habituales al explicar la visión en un espejo antes de la enseñanza.

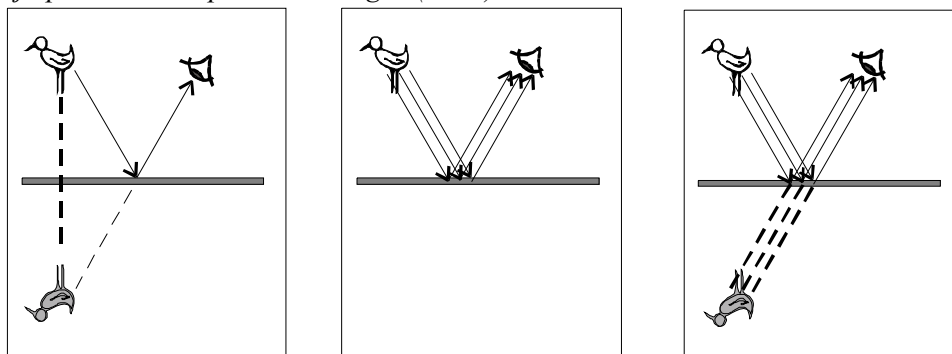


Estos esquemas son prácticamente iguales a los que realizan los alumnos de ESO después de la enseñanza habitual, sin embargo, sí hay alguna variación en los alumnos de 2º de bachillerato después de la enseñanza habitual como se muestra en la figura 5.7

Figura 5.7: a) Esquemas habituales después de la enseñanza habitual en los que el ojo no es considerado receptor de luz.



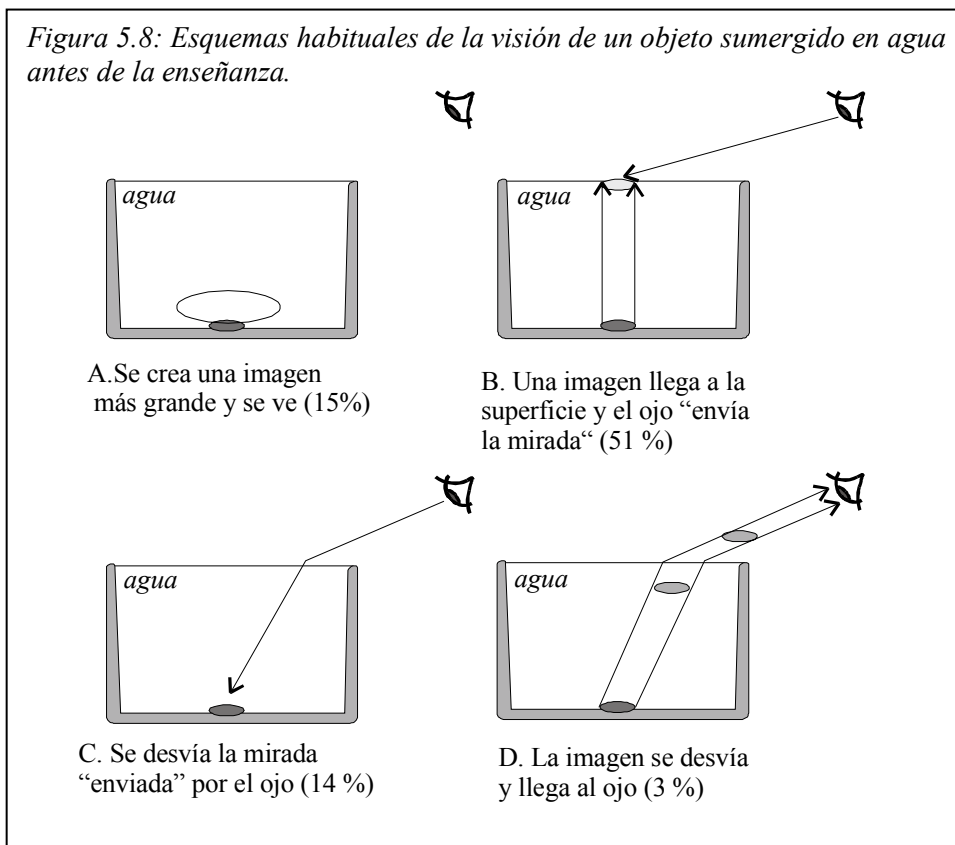
b) Esquemas habituales después de la enseñanza habitual en los que los rayos que llegan al ojo parecen transportar la imagen (54 %).



Sobre la visión de un objeto sumergido en el agua, las respuestas de los alumnos de ESO antes de la enseñanza a la cuestión C-8 (pag.128) se muestran en la tabla 5.9.

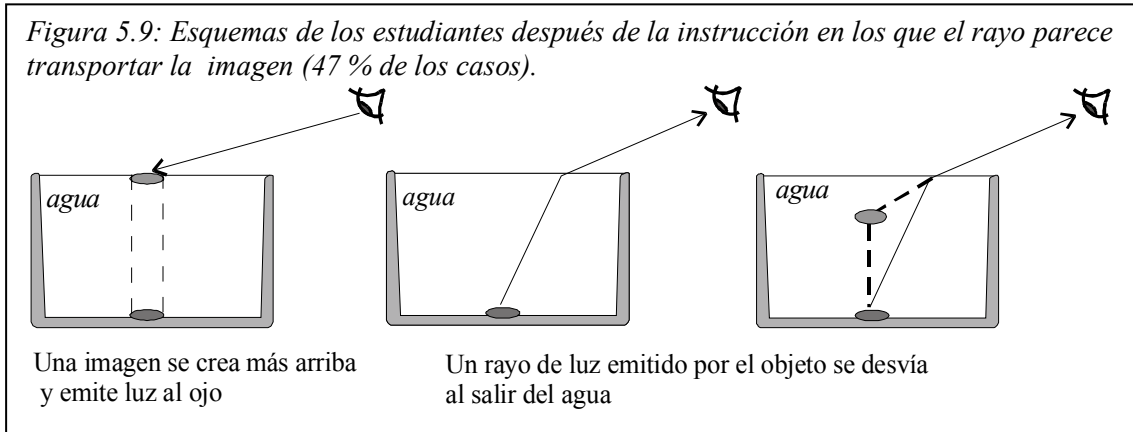
TABLA 5.9: MODELOS DE VISIÓN AL VER LA IMAGEN DE UN OBJETO SUMERGIDO EN AGUA (n=71)	%	(Sd)
A. Se crea una imagen en otro lugar y se ve	15	(4)
B. Se crea una imagen en otro lugar y el ojo “envía la mirada”	51	(6)
C. La “mirada” se desvía hasta alcanzar el objeto	14	(4)
D. Una imagen emanada del objeto se desvía al salir del agua hasta llegar al ojo	3	(2)
E. Otras respuestas	8	(3)
F. Sin respuestas	8	(3)

Algunos de los esquemas que realizan los alumnos en las distintas categorías son los que representamos en la figura 5.8:



Esquemas como los anteriores siguen gozando con el 31 % de aceptación entre los alumnos de bachillerato después de la instrucción habitual, sin embargo, aparecen otros esquemas, con un 47 % de aceptación, en los que los rayos parecen transportar la imagen que se ve, de forma similar a los esquemas

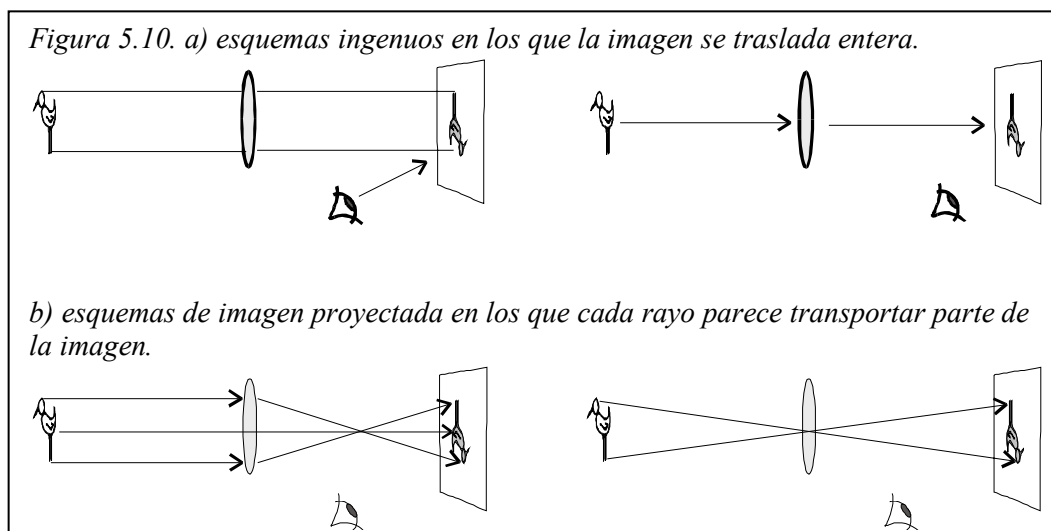
realizados para explicar la visión en un espejo. En la figura 5.9 recogemos las representaciones habituales de esta concepción alternativa mayoritaria.



Sobre la formación de la imagen en una pantalla, las ideas de los alumnos antes y después de la enseñanza a la cuestión C-9 (pag. 130) pueden agruparse en las mismas categorías con diferencias claras en el grado de aceptación (tabla 5.10).

TABLA 5.10: FORMACIÓN DE LA IMAGEN Y TRATAMIENTO GEOMÉTRICO (n=71)	Antes de la enseñanza (ESO)		Después de la enseñanza (Bac)	
	%	(Sd)	%	(Sd)
A. Esquema ingenuo (la imagen entera atraviesa la lente donde se invierte, las líneas trazadas representan el movimiento de la imagen)	72	(5)	7	(3)
B. Esquema de imagen proyectada (la imagen se forma a partir de rayos únicos trazados desde cada punto del objeto)	8	(3)	54	(6)
C. Otras respuestas	20	(5)	23	(5)
D. Esquema correcto	-		15	(5)

Mostramos los trazados de los esquemas alternativos habituales en la figura 5.10.



Hay que señalar que únicamente el 15 % de los estudiantes de 2º de bachillerato, después de la enseñanza habitual en óptica geométrica, realiza un trazado gráfico correcto, aunque, en la mayoría de los casos, han incluido en el esquema los focos y el eje principal, que no estaban señalados, y en los que han necesitado apoyarse. Aún más, algunas explicaciones revelan la repetición del algoritmo de construcción de imágenes típico: “*rayo que pasa por el foco, sale paralelo; rayo que entra paralelo, sale por el foco imagen...*” y, por tanto, que el concepto de imagen que se deriva del modelo de visión de Kepler no ha sido aprendido. Por otro lado, el ojo que aparece en el esquema mirando la pantalla, no participa en los trazados de rayos (97 %), incluso a veces lo hace para “enviar la mirada”. Estas apreciaciones se ven reforzadas por la opinión de los estudiantes, tanto antes como después de la enseñanza habitual, ante algunos cambios en ese sistema óptico, ya que piensan mayoritariamente que la imagen sigue existiendo aun cuando se aleje la pantalla o se quite la lente y que se reducirá a la mitad al tapar media lente.

Ideas y razonamientos de los estudiantes sobre la concepción del color

Sobre las explicaciones del color con que vemos los cuerpos que dan los estudiantes en la cuestión C-10 (pag.136), las ideas alternativas de éstos también muestran una evolución al ser comparadas las que poseen antes de la enseñanza con las de los alumnos de bachillerato después de la enseñanza habitual. En la tabla 5.11 se muestra dicha evolución.

TABLA 5.11: IDEAS SOBRE COMO SE CONCIBE EL COLOR (n=71)	Antes de la enseñanza (ESO)		Después de la enseñanza (Bac)	
	%	(Sd)	%	(Sd)
A. Una propiedad que depende de la constitución del objeto.	56	(6)	24	(6)
B. Una propiedad relacionada con el tipo de luz emitida por él.	10	(4)	54	(6)
C. Una propiedad del objeto relacionada con la luz que lo ilumina.	8	(3)	--	
D. Una facultad del ojo, simplemente.	15	(5)	2	(2)
E. Otras respuestas o sin respuesta.	11	(4)	12	(4)
F. Una sensación que se elabora a partir del tipo de luz.	--		8	(4)

Los alumnos, antes de la enseñanza, manifiestan mayoritariamente una concepción en la que el color depende de la constitución material del objeto. Algunos ejemplos de este tipo de repuestas son:

- *"El color de un objeto es debido a que lo han pintado así"*
- *"La luz del Sol ilumina al "boli" rojo y se ve rojo porque se ha hecho así"*

Los alumnos de bachillerato después de la instrucción hacen mayoritariamente uso de la concepción heterogénea de la luz en algunas de sus explicaciones, aunque claramente asimilan cada color con un tipo de luz. Respuestas como las siguientes así lo reflejan:

- *"Vemos el color porque cada uno tiene una frecuencia. El objeto absorbe todas las (frecuencias) de la luz excepto la del color que es la que refleja y que es la que el ojo capta".*
- *"Los objetos tienen la capacidad de absorber colores, absorber luz. Según su capacidad de reflexión, los colores de la luz blanca (todos los del arco iris) que no absorbe son los que vemos, que al estar mezclados dan lugar al color que vemos del objeto".*

Las ideas expresadas anteriormente con coherentes con las repuestas obtenidas en la cuestión C-11 (pag. 138), en la que se plantea la función que realiza un filtro coloreado interpuesto a la luz de una linterna.

Sobre las ideas de los alumnos acerca de la función que realiza un filtro coloreado y si admiten el carácter heterogéneo de la luz "blanca", las respuestas de los alumnos en las distintas categorías de interés se muestran en la tabla 5.12:

TABLA 5.12: FUNCIÓN QUE REALIZA UN FILTRO DE COLOR (n=71)	Antes de la enseñanza (ESO)		Después de la enseñanza (Bac)	
	%	(Sd)	%	(Sd)
A. Modificar el color de la luz (cambiando o añadiendo color).	66	(6)	20	(5)
B. Absorber "colores", rayos u ondas.	7	(3)	54	(6)
C. Disminuir la intensidad de la luz.	4	(2)	3	(2)
D. Emitir una imagen de ese color.	6	(3)	5	(3)
E. Otras respuestas.	10	(4)	7	(3)
F. Sin respuesta.	7	(3)	10	(4)

Al comparar las dos tablas últimas se puede apreciar que antes de la enseñanza los estudiantes piensan mayoritariamente que el color es una propiedad exclusiva del material de que está constituido el cuerpo y que el filtro de color, consecuentemente, modifica el color de la luz que pasa por él (que también tiene color). Mientras que la mayoría de los estudiantes de bachillerato, después de la enseñanza habitual asignan el color a cada tipo de luz y, en consecuencia, opinan que la función del filtro es la de absorber algunos tipos de luz (absorber colores, rayos u ondas).

Así, mientras que los estudiantes antes de la enseñanza manifiestan opiniones como las siguientes:

- "La luz cambia de color porque el filtro es azul y entonces la luz se vuelve azul"
- "El filtro le añade esa tonalidad a la luz que antes era blanca"

Los estudiantes de bachillerato después de la instrucción manifiestan estas otras opiniones:

- *"Sólo vemos una mancha azul porque el resto de los colores han sido absorbidos por el filtro".*
- *"El papel que realiza el filtro es el de absorber todas las longitudes de onda que sean diferentes a la del color azul. Debido a esto el filtro sólo dejará pasar la longitud de onda del color azul".*

Resumen de las ideas y razonamientos de los alumnos

Los resultados obtenidos no dejan lugar a duda sobre la relevancia de las metas propuestas y de los obstáculos que hemos previsto. Dichos resultados permiten afirmar que:

- Respecto a disponer de un modelo (correcto o no) que, al menos, relacione la luz, el objeto y el ojo:
 - La inmensa mayoría (el 90 %) de los estudiantes, entre 13 y 15 años, antes de la enseñanza, no cree que la visión se produzca por recepción de luz en el ojo, sino que la describen a partir de modelos de visión activos (en los que el ojo emite "la mirada"), de modelos de emanación de imágenes o de modelos mixtos. Como consecuencia, los alumnos admiten que se puede ver en la oscuridad, que los objetos que vemos no emiten luz (para ellos, sólo existe luz en las fuentes primarias o secundarias o en sus alrededores y cuando se apaga la fuente, la luz deja de existir). El porcentaje de existencia de estos obstáculos sólo disminuye hasta el 80 % aproximadamente, después de la enseñanza en este nivel. La creencia de que podemos ver un objeto sin que nos llegue luz emitida por el mismo a nuestros ojos, se encuentra aún presente en el 39 % de los alumnos de 2º de bachillerato después de la enseñanza. No obstante el porcentaje empeora (aumenta) cuando se consideran cuestiones no prototípicas de un tema de óptica (como aquéllas que representan visión directa o a través de un espejo): el obstáculo A₂ (tabla 5.1, pag. 169) está presente en el 53 % de los alumnos de Bachillerato y en torno a las tres cuartas partes creen que la luz sólo está alrededor de objetos o zonas iluminadas, o que desaparece cuando se apaga la fuente luminosa (*"si no la vemos, no está"*).

- Respecto a disponer de un esquema idealizado de representación geométrica de la luz, potencialmente explicativo:
 - El 83 % de los alumnos de ESO antes de la enseñanza, el 73 % después de ella, y el 59 % de los alumnos de 2º de bachillerato creen que la propia luz se ve. Esto explica, posiblemente, que no consideren que llega luz a nuestros ojos cuando vemos un objeto "*ya que no ven la luz, ven el objeto*". Como se ve en B₂ (tabla 5.2, pag. 170) la práctica totalidad de los alumnos de ESO y más de la mitad de los de bachillerato después de la enseñanza sobre el tema, no consideran las fuentes extensas de luz como conjuntos de puntos luminosos que emiten en todas las direcciones –aspecto crucial para la adquisición de un modelo funcional de la formación de imágenes- .
 - La disponibilidad de un modelo cuyas consecuencias geométricas permitan explicar o predecir fenómenos ópticos es nula en los alumnos de ESO y prácticamente nula en los de 2º de Bachillerato después de la enseñanza de la óptica (tan sólo un 7 y un 24 %, respectivamente, representan haces de luz emitidos desde cada punto de un objeto cuando explican la formación de una imagen en una pantalla o para predecir la formación de sombras y penumbras). Este dato es revelador de que la idealización de los objetos que vemos, como sistemas de infinitas fuentes puntuales que emiten haces de luz que se propagan en todas direcciones, es algo difícil de conseguir y un aspecto crucial al que se deberá prestar mucha atención.
- Respecto a la disponibilidad de un modelo de formación de imágenes que sea funcional (el modelo de Kepler):
 - La práctica totalidad de los alumnos de ESO, cuando se enfrentan a explicar fenómenos de visión indirecta (espejos, líquidos,...) o la formación de imágenes mediante lentes convergentes en una pantalla, creen que una imagen emana "*ya hecha*" de los objetos o es portada por los rayos de luz (concepciones griegas y de Alhazen). Coherentemente con esto, más del 90 % de los estudiantes opina que la imagen seguiría existiendo al alejar la pantalla o, incluso, al quitar la lente y que si se tapa media lente sólo veríamos media imagen (dando a entender que el obstáculo que se ha interpuesto ante la lente ha impedido que pase la otra mitad, la respuesta lógica si se piensa que

la imagen se traslada entera o que cada rayo individual transporta un trocito de imagen, similar al modelo de Alhazen). El ojo no es considerado parte del dispositivo lente-pantalla y se piensa que la imagen que se ve en la pantalla tiene existencia independiente de la presencia del observador por lo que prácticamente nunca aparece el ojo en los dibujos que realizan al contestar las cuestiones. Muchas de las consecuencias que se derivan de la hipotética presencia de esos obstáculos conceptuales y epistemológicos en los estudiantes, las hemos encontrado en, aproximadamente, un 90% de los alumnos de ESO y son convergentes con los resultados de otras investigaciones, lo que refuerza la confianza en nuestros datos. Estos datos también pueden interpretarse desde el punto de vista de la tendencia del razonamiento espontáneo a materializar los conceptos de la física, lo que Bachelard (1938) ya denominó "obstáculo substancialista". Así, la imagen óptica tiene las propiedades de un objeto que se propaga y se "pega" a la pantalla cuando la encuentra, o el rayo que, como los objetos que se ven, también puede verse en ciertas condiciones.

- Los resultados de los alumnos de 2º de Bachillerato que ya han dado el tema de óptica, se muestran en el tabla 5.3 (pag.171), confirman que dichos obstáculos son persistentes a la enseñanza habitual: podemos afirmar que dichos resultados apoyan la idea de que más del 80 % siguen creyendo que la imagen se traslada ya hecha desde el objeto o que cada rayo individual es portador de un trozo de imagen. En la práctica totalidad de los casos no dibujan el ojo para explicar lo que vemos en el sistema lente-pantalla.
- Por último, respecto a la concepción del color como una sensación elaborada por el cerebro según la respuesta de los fotorreceptores retinianos a los diferentes tipos de luz, hemos de señalar que:
 - Las ideas de los estudiantes sobre el color antes de la enseñanza están influenciadas por la concepción de la visión que se tenga y sobre el carácter homogéneo o heterogéneo de la luz. Dado que para ellos la luz es de carácter homogéneo, cuando atraviesa un filtro coloreado piensan que se "tiñe" con ese color y que el color con que ven los

objetos es, para la gran mayoría, una propiedad del material de que está hecho el objeto que ven.

- En los alumnos de bachillerato después de la instrucción habitual, se modifican en parte estas ideas (véase tabla 5.4, pag. 172) ya que se asume que la luz es de carácter heterogéneo (56 %) y se admite en una amplio porcentaje que es necesario que llegue luz al ojo para poder ver, por lo que el color es atribuido a una propiedad de la luz. En ambos casos, se desconoce la existencia de fotorreceptores cuya respuesta es diferente según el tipo de luz que incide sobre ellos y que es la iniciadora de la sensación del color con que vemos los objetos.

Los datos revelan, pues, carencias absolutas en los indicadores de comprensión del concepto de la imagen óptica y apoyan la relevancia de los obstáculos previstos a partir de nuestro estudio sobre la evolución de las ideas. Podemos afirmar que los alumnos de 2º de Bachillerato no disponen de un modelo funcional adecuado sobre cómo vemos los objetos, lo que pone en cuestión la enseñanza habitual de la óptica geométrica. Este cuestionamiento de este tipo de enseñanza de la óptica deberá ser confirmado por el análisis de textos y por las respuestas de los profesores a cuestiones sobre la visión lo cual analizaremos en el siguiente apartado.

Para que los estudiantes superen estos obstáculos y sustituyan este tipo de razonamiento espontáneo, el diseño de la secuencia de actividades sobre la luz y la visión y del programa de evaluación correspondiente, deberán contemplar la existencia de dichos obstáculos y las consecuencias experimentales que hemos contrastado en este estudio empírico. La unidad didáctica organizada en torno al problema de *cómo vemos* deberá, pues, contener ocasiones reiteradas para reflexionar sobre ellos y aportar razones convincentes para conseguir la comprensión y uso funcional del modelo de Kepler.

5.2 Resultados que muestran que la enseñanza habitual no contempla los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler y tiene un carácter marcadamente empirista y apromblemático

En el diseño experimental para contrastar esta derivación de la hipótesis, habíamos elaborado instrumentos para obtener evidencias que la apoyen referidos a profesores, a libros de texto y a exámenes de selectividad. Presentamos a continuación los resultados obtenidos en cada uno ellos.

a) Resultados obtenidos con profesores

Mostramos en primer lugar los resultados obtenidos en los cuestionarios **C1-p** (pag. 143), **C2-p** (pag. 146) y **C3-p** (pag. 147) diseñados para obtener evidencias de que los profesores también presentan obstáculos a la comprensión de algunos aspectos básicos del modelo de visión de Kepler. Concretamente, para probar que los conceptos de haz de luz y de imagen óptica que sostienen los profesores no son consistentes con dicho modelo (tablas 5.13, 5.14 y 5.15).

Tabla 5.13: Resultados correspondientes al instrumento C1-p. Valoración a los trazados gráficos de construcción de la imagen óptica

Al “representar gráficamente la formación de la imagen óptica cuando se ha cortado media lente”, los profesores:	Curso 2001-02 n = 36	
	%	Sd
1. No utilizan en sus trazados el concepto de haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto, por lo que:	100	-
• No saben realizar los trazados gráficos.	25	7
• No realizan ambos trazados correctamente.	25	7
• Realizan los trazados bien pero necesitan señalar el foco imagen F' .	50	8
2. No expresan un concepto de imagen óptica coherente con el modelo de Kepler, por lo que:	100	0
• No dibujan ni se refieren al ojo como parte integrante del esquema óptico de formación de la imagen.	94	4
• Tratan gráficamente la imagen con el mismo tipo de representación gráfica que el objeto, incluso sin pantalla donde mirar para verla.	100	-
3. Realizan trazados gráficos conformes al modelo de Kepler, ya que:	0	-
• Utilizan en sus trazados haces divergentes de luz emitidos por cada punto del objeto.	0	-
• Dibujan o hacen referencia al ojo del observador.	6	4

Estos resultados confirmaban “abrumadoramente” nuestras sospechas. No obstante, en cursos de formación de profesores realizados en años siguientes, modificamos las cuestiones aquí planteadas para asegurarnos de la validez de estas conclusiones. Los resultados de estas nuevas cuestiones se presentan a continuación.

Tabla 5.14: Resultados correspondientes al instrumento C2.p. Valoración sobre el concepto de haz de luz

En un trazado gráfico donde se representa un haz de luz plano “ <i>procedente del Sol que incide en una lente convergente</i> ”, los profesores:	Curso 2004-05 n = 28	
	%	Sd
<ul style="list-style-type: none"> No piensan que los rayos dibujados proceden de un solo punto del Sol. 	100	-
<ul style="list-style-type: none"> No se refieren en su argumentación al haz de luz procedente de un punto del Sol. 	100	-
<ul style="list-style-type: none"> Dan una respuesta correcta y en sus argumentos se refieran al concepto de haz de luz. 	0	-

Tabla 5.15: Resultados correspondientes al instrumento C3-p. Valoración abierta sobre el concepto de imagen óptica

Cuando se les pide que “ <i>clarifiquen el concepto de imagen óptica</i> ”, los profesores:	Curso 2004-05 n = 28	
	%	Sd
1. No disponen de un concepto de imagen óptica acorde con el modelo de visión de Kepler, ya que:	100	0
<ul style="list-style-type: none"> Admiten dos trazados gráficos diferentes como válidos para representar la imagen óptica. 	54	9
<ul style="list-style-type: none"> Admiten el trazado realizado en la lente convergente sin incluir al ojo como parte del sistema óptico ni razonar usando haces de luz. 	18	7
<ul style="list-style-type: none"> Dan otras respuestas no compatibles con el modelo de Kepler. 	28	8
2. Disponen de un concepto de imagen óptica acorde con el modelo de visión de Kepler, ya que:	0	-
<ul style="list-style-type: none"> Admiten el trazado realizado en la lente convergente incluyendo al ojo del observador como parte del sistema óptico. 	7	5
<ul style="list-style-type: none"> Razonan usando haces de luz. 	0	-

En las siguientes tablas 5.16 y 5.17 se presentan los resultados obtenidos con profesores cuando se enfrentan a valorar una unidad didáctica de un texto

habitual (**C4-p**, pag.149 y anexo 2 en página 379) y cuando proponen razonadamente una secuencia de enseñanza (**C5-p**, pag 151).

Tabla 5.16: Resultados correspondientes al instrumento C4-p. Valoración abierta sobre la estructura de una unidad didáctica habitual de óptica geométrica

Al solicitar que analicen algunos aspectos de la estructura de un tema de óptica de un libro de texto habitual <i>“te pedimos que expresas razonadamente tu acuerdo o desacuerdo con la forma en que se presentan, identificando posibles errores, etc.”</i> Los profesores:	Curso 2004-05	
	%	Sd
1. No señalan la estructura apromblemática y empirista de la unidad didáctica analizada, por lo que no hacen referencias a:	92¹	5
• La ausencia de problema estructurante.	92	5
• La ausencia de actividades para mostrar el interés del estudio que se va a realizar.	58	8
• La ausencia de un índice como estrategia.	92	5
• Al planteamiento de la propagación, reflexión y refracción de la luz como leyes empíricas sin relación con la visión.	97	3
2. No señalan la ausencia de atención a los obstáculos que pueden impedir la comprensión de los conceptos, por lo que:	94¹	4
• No indican deficiencias en las explicaciones de los conceptos (objetos como fuentes luminosas, rayo y haz de luz, ..).	83	6
• No hacen referencias al tratamiento gráfico de la luz (la no visibilidad de la luz, la representación de los rayos como halos visibles,...).	92	5
• No señalan las dificultades de la imagen óptica (refiriéndose al tratamiento exclusivamente algorítmico, a su representación gráfica sin pantalla y/o sin ojo del observador,...).	75	7
• No señalan las dificultades de comprensión del color y los obstáculos detectados por la investigación didáctica a esta sensación.	92	5
3. Indican que la estructura de la unidad didáctica es apromblemática (sin problema estructurante, ni actividades para mostrar su interés, ni índice como estrategia...).	8	5
4. Llaman la atención de la necesidad de tener en cuenta los obstáculos para la comprensión y de las deficiencias en su presentación.	6	4

¹Estos porcentajes globales se han obtenido contabilizando los cuestionarios en los que no se señalan, al menos, dos de los ítems incluidos en la valoración de cada categoría.

Tabla 5.17: Resultados correspondientes al instrumento C5-p. Valoración de la estructura de unidad didáctica propuesta por profesores

<i>A la hora de “proponer una forma de comenzar el tema y una posible secuenciación de apartados a tratar adecuada y justificadamente”, los profesores:</i>	Cursos 2001-02 y 2004-05	
	n = 64	
	%	Sd
1. No proponen comenzar el tema de forma problematizada, ya que:		
• No plantean un problema estructurante.	95	3
• No realizan referencias o actividades para mostrar el interés del estudio o a la evolución histórica de los conceptos, a aplicaciones tecnológicas,...	87	4
• No proponen un índice como estrategia según una lógica problematizada.	100	-
2. Proponen una secuenciación jerarquizada-empirista de los conceptos .	89	4
3. Proponen comenzar el tema con el planteamiento de un problema estructurante de interés y un índice como estrategia para avanzar en su solución.	0	-
4. Proponen una secuencia problematizada, en la que al menos:	0	-
• Se contemplen los obstáculos para la comprensión de la óptica geométrica (modelos de visión alternativos, dificultades para aceptar las fuentes secundarias de luz, la complejidad del concepto de imagen,...) .	13	4
• El orden de avance lo impone el orden epistemológico de los problemas que es necesario resolver (la visión directa de los objetos, la reflexión y la refracción como hipótesis para explicar la visión indirecta,...).	9	4

Los resultados obtenidos con profesores no parecen dejar lugar a dudas y confirman las consecuencias que se derivaron de nuestra hipótesis:

- En primer lugar, los profesores presentan carencias que afectan a la comprensión del modelo de visión de Kepler; concretamente hemos constatado carencias en el concepto de imagen óptica y en los trazados para su formación. El uso de haces de luz en los trazados gráficos y el concepto de imagen óptica, que ya constatamos que son obstáculos para los alumnos de bachillerato después de la enseñanza, se muestra que también lo son para los profesores en ejercicio.

- En segundo lugar, al analizar una unidad didáctica habitual de óptica geométrica, no reconocen la ausencia de atención a los obstáculos más importantes que venimos señalando en nuestro estudio, ni ven inconveniente su

estructura apromblemática, es decir, no señalan la ausencia de problema estructurante, ni índice como estrategia, ni la necesidad de incluir actividades donde se muestre el interés por su estudio,...

- Por último, cuando, tras el análisis crítico de los libros habituales, proponen una secuencia de enseñanza para la óptica geométrica en la ESO, su estructura es de carácter marcadamente apromblemático donde el orden de los tópicos viene impuesto por la jerarquía de los conceptos, comenzando por la naturaleza de la luz y terminando con el ojo humano como instrumento óptico, y las leyes de propagación de la luz, de la reflexión y de la refracción son presentadas como si fueran hallazgos empíricos sin relación con la visión.

b) Resultados obtenidos en el análisis de libros de texto

Los resultados han sido obtenidos en el análisis de una muestra de 32 libros de texto publicados de acuerdo con el currículo propuesto en la ley de educación (LOGSE) entre los años 1994 y 2001. De ellos, 10 son libros del área de Ciencias de la Naturaleza de 2º de ESO, 8 son de Física y Química de 3º de ESO, 1 de Física y Química de 4º de ESO, 3 son de Técnicas de laboratorio de Física y Química para el segundo ciclo de ESO que contienen un tema de óptica geométrica, 1 es de Física y Química de 1º de bachillerato y 9 son de Física de 2º curso de bachillerato. En el anexo 3 (página 391) presentamos la relación de títulos, autores y editoriales de los libros analizados.

Como comentamos en el diseño de la red de análisis de libros de texto, el decreto de enseñanzas mínimas de la ESO del estado español incluía el tema de óptica geométrica dentro del núcleo de contenidos de la Energía y en relación con el movimiento ondulatorio. De los libros de texto de la ESO consultados, en 14 de ellos la óptica está integrada en el mismo tema con el estudio de las ondas. En los libros de bachillerato, la óptica geométrica constituye un tema independiente, aunque precedido del estudio de las ondas y, a veces, de nociones de óptica física.

Expondremos los resultados, de acuerdo con la red de análisis **C6-L** (pag. 158) en dos tablas: la tabla 5.18a, que hace referencia a los resultados de algunos indicadores de lo que supone una adecuada comprensión de cómo vemos y la tabla 5.18b, que incluye algunos de los indicadores de lo que supone una

enseñanza problematizada de la luz y la visión. Después de cada tabla incluiremos algunos comentarios con frases y diagramas extraídos de los textos analizados para clarificar el significado de los resultados.

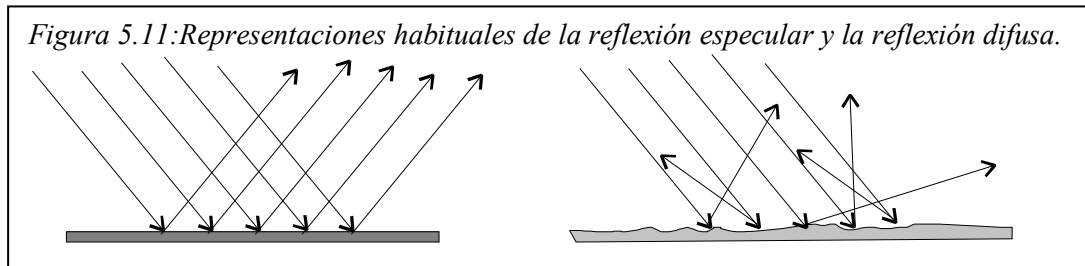
Acompañando a cada ítem mostramos el porcentaje de textos de la muestra cuyo análisis es favorable al enunciado (%), la desviación estándar (Sd) y, en su caso, el porcentaje de libros de texto que no tratan ese aspecto (X).

Tabla 5.18a: Resultados de la red de análisis de libros de texto sobre algunos indicadores de lo que supone una adecuada comprensión de “cómo vemos”

	n = 32	%	(Sd)	X ²
Sobre la concepción de la visión como proceso en el que llega luz al ojo, los libros de texto analizados:				
1. Tratan los objetos iluminados como conjuntos de puntos emisores de luz en todas las direcciones.		22	(7)	-
Sobre el esquema de representación geométrico idealizado de la luz, Los libros de texto analizados:				
2. Señalan expresamente que la luz no se ve.		9	(5)	-
3. Nunca utilizan representaciones del rayo (halos coloreados, estelas sombreadas, estelas difusoras producto de iluminación con láser,...) que puedan dar lugar a interpretaciones erróneas sobre su significado.		22	(7)	-
Sobre el concepto de imagen óptica y su formación, los libros de texto analizados:				
4. Consideran al ojo como instrumento formador de imágenes y que, por tanto, forma parte del sistema óptico al mirar:				
- A un espejo plano.		59	(9)	38
- A un objeto sumergido en el agua.		47	(9)	41
- A la imagen formada por una lente convergente.		0	-	4
5. Forman la imagen a partir de haces luz emitidos por cada punto objeto en los casos de mirar:				
- A un espejo plano.		38	(9)	34
- A un objeto sumergido.		22	(7)	50
- A la imagen formada por una lente convergente.		60	(9)	34
6. Asignan el color a una sensación unida a la imagen óptica y no a una característica de la luz.		9	(5)	38

² Incluimos en esta columna debajo de X los porcentajes de los libros de muestra que no tratan algún aspecto particular si es el caso. El % que aparece se refiere al total de los libros de la muestra.

El primer ítem de esta tabla está referido al tratamiento que realizan los libros de texto en los diagramas en donde explican la reflexión de la luz en las superficies especulares enfrentándola con la difusión en las otras superficies. La representación que más se repite en los libros de texto se muestra en la figura 5.11.



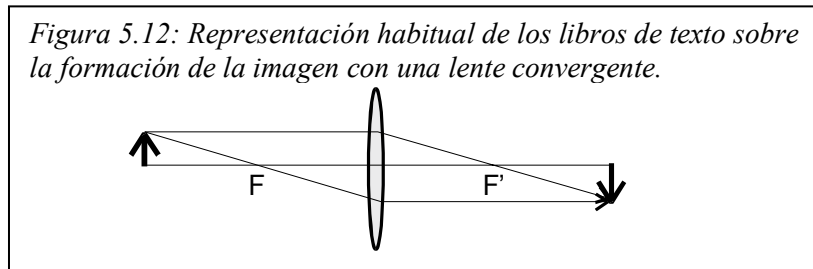
Como se observa en la figura anterior no se representan haces de luz, desde cada punto de la superficie difusora se representa un único rayo, lo que parece estar más de acuerdo con el modelo de Alhazen que con el modelo de Kepler. Por otro lado, al representar la luz incidente con un haz plano, han incluido varios rayos paralelos cuando, con la representación de Kepler, sólo son necesarios dos que indican los límites del haz de luz. No obstante, no se entiende por qué en todos los gráficos de los libros de texto intentan mostrar la luz incidente con ese "supuesto" haz paralelo.

El segundo ítem en donde se expone que sólo el 9 % de los libros de texto señalan que la luz no se ve, es necesario indicar que un 25 % de ellos indica expresamente lo contrario ¡que la luz se ve! y suelen poner como ejemplo de tal afirmación, "los haces de luz que vemos cuando entra luz solar por una rendija de una ventana en una habitación oscurecida".

Muchos de los libros de texto no explican expresamente que la luz no se ve, pero la mayoría (un 78 %) utiliza halos coloreados, estelas sombreadas, estelas difusoras producto de iluminación con láser, etc. para representar la trayectoria de la luz con lo que, implícitamente, pueden dar lugar a interpretaciones erróneas sobre el significado del rayo y sobre si la propia luz es visible, apartando a los alumnos del esquema de representación geométrica idealizado necesario para explicar los fenómenos ópticos.

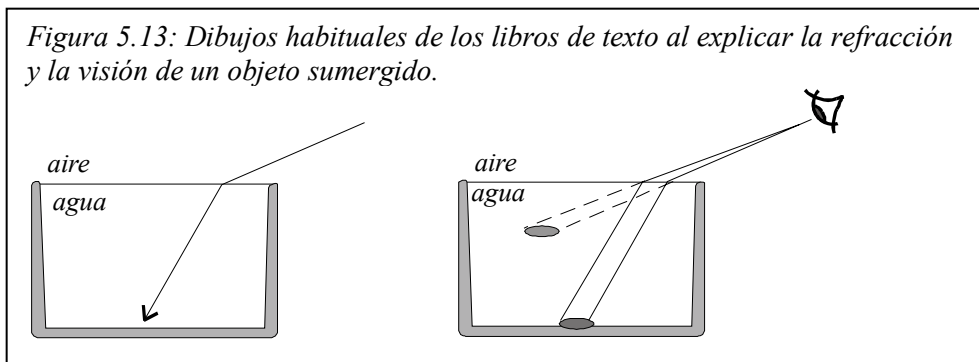
Respecto del concepto de imagen y su formación, la mayoría de los libros de texto incluyen un ojo en los diagramas que explican la visión al mirar a un espejo

o a un objeto sumergido en el agua, o sea, en los casos de imágenes virtuales, sin embargo, ninguno dibuja un ojo cuando la imagen se forma con una lente convergente, como si esa imagen existiera independientemente de la presencia de observador. En estos casos, incluso no se incluye la pantalla y la imagen tiene el mismo tratamiento gráfico que el objeto, como si de un objeto más se tratara. El diagrama habitual que incluye la práctica totalidad de libros de texto se representa en la figura 5.12



Respecto a la forma en cómo se explica la visión en un espejo o a un objeto sumergido, una tercera parte de los libros analizados realiza diagramas en los que con un único rayo localizan una imagen virtual detrás del espejo o sobre la vertical al objeto sumergido, de manera similar a como se explicaría con el modelo de Alhazen.

A veces se presenta el fenómeno de la refracción como el cambio de dirección de un rayo luminoso cuando pasa del aire al agua y en el diagrama de al lado se representa a una persona que mira a un objeto sumergido, con lo que, además de los errores del esquema de la visión realizado, pueden inducir a potenciar las concepciones alternativas en las que no es necesario que llegue luz al ojo para ver. Los dibujos de la figura 5.13 son similares en su forma de presentación a los del libro de primer ciclo de ESO de la Editorial Ecir (proyecto GAIA 12-16) de los autores Aureli Caamaño y otros, de 1998:



Por último, en la terminología que se usa en la mayoría de los libros de texto se asigna el color a una propiedad de la luz, sin que en algún momento se especifique que se trata de una forma de hablar habitual o algo similar. Mostramos a continuación algunos ejemplos de frases extraídas de los libros de texto analizados:

Del texto de Antón et al.(1994) De Ciencias de la Naturaleza de 3º de ESO de la editorial Editex:

"Al lanzar un rayo de luz blanca sobre un prisma nos encontramos que a la salida del prisma no tenemos luz blanca, sino que el rayo se ha extendido y aparece en su lugar distintos colores, del rojo al violeta. Esto nos indica que la luz blanca está compuesta de "luces" de diferentes colores. ... El color que más se desvía es el violeta y el que menos el rojo.

Del texto de García et al. (1995) de Física y Química de 4º de ESO de la editorial McGraw-Hill:

"La luz blanca es realmente un mezcla de luces de diferentes colores: rojo, anaranjado,..... La luz roja se propaga con mayor velocidad, por lo que es menos desviada; el haz de luz violeta es el más desviado porque tiene la menor velocidad."

Tabla 5.18b: Resultados de la red de análisis de libros de texto sobre algunos indicadores de lo que supone una enseñanza problematizada de la luz y la visión

<i>Los libros de texto analizados:</i>	n= 32	%	Sd
1. Plantean el problema de "cómo vemos" como origen de la teoría geométrica de la luz y la visión.		13	(6)
2. Establecen la necesidad de que llegue luz al ojo para que se produzca la visión, antes de abordar el estudio de los fenómenos ópticos.		22	(7)
3. Explicitan un sistema de representación geométrico idealizado de la luz o, al menos, explican el significado del rayo luminoso.		47	(9)
4. Elaboran un modelo simplificado de ojo (lente-pantalla) para introducir el concepto de imagen óptica.		3	(3)
5. Consideran la propagación rectilínea, la reflexión o la refracción de la luz como hipótesis formuladas para explicar la visión.		19	(7)
6. Plantean los límites de aplicación de la teoría geométrica a la visión.		28	(8)

Estos resultados del análisis de los libros de texto parecen indicar una estructura de las unidades didácticas sobre la luz y la visión no problematizada y de marcado carácter empírico y ahistórico. En los libros de bachillerato y de segundo ciclo de ESO, en términos generales, la enseñanza de la óptica geométrica se aborda después de haber tratado el movimiento ondulatorio y la naturaleza de la luz, por lo que el tema de óptica geométrica se convierte en una constatación de una determinada concepción de la naturaleza de la luz estudiada anteriormente, más que como un capítulo para explicar la visión y los fenómenos ópticos con ella asociados. Así son presentados, por ejemplo, la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción de la luz, por lo que la visión en los espejos o de los objetos sumergidos son una consecuencia de este comportamiento y no al revés, como ocurrió históricamente, en donde este comportamiento de la luz fue establecido hipotéticamente para explicar la visión y por la coherencia interna de una teoría que explicara cómo vemos.

En conjunto, pues, el análisis de libros de texto muestra que la enseñanza habitual presenta algunas carencias en los indicadores de lo que supone una adecuada comprensión de la teoría de Kepler a cómo vemos y las unidades didácticas en las que se presentan los conceptos de la óptica geométrica no tienen una estructura problematizada.

Resultados obtenidos en el análisis de los exámenes de selectividad

En la tabla 5.19 presentamos los resultados de la red de análisis (C7-S, pag. 164) diseñada para obtener evidencias de que los exámenes de selectividad evocan una enseñanza apromblemática y empirista coherente con la enseñanza habitual que reflejan libros de texto y profesores.

Tabla 5.19. Resultados de la red de análisis C7-S Sobre el tipo de actividades de óptica y la demanda de aspectos del modelo de visión de Kepler en las pruebas de selectividad

Sobre el tipo de actividades, porcentaje que:	n = 111	
	%	Sd
• Solicitan respuestas a cuestiones numéricas y/o operativas.	54	5
• Solicitan la aplicación de algoritmos de localización de imágenes.	19	4
• Demandan repetición memorística.	18	4
• Son de manejo significativo de los conceptos.	9	3
Sobre el modelo de visión de Kepler, porcentaje de actividades que:		
• Demandan explicaciones relacionadas con la visión de objetos.	9	3
• Demandan clarificación de los conceptos implicados en el modelo de visión de Kepler (Haz de luz, rayo, imagen óptica,...).	1	1
• Tienen una redacción no compatible con el modelo de Kepler.	18	4

Las 111 preguntas analizadas corresponden a una muestra al azar de 63 actividades (entre cuestiones y problemas) aparecidas en los exámenes de selectividad LOGSE entre los años 1998 y 2003 en diferentes distritos universitarios. La no coincidencia de estos números es debida a que en algunas de las actividades se demanda a los alumnos la respuesta a dos o más cuestiones. La muestra analizada fue extraída de la base de datos de www.sm.com .

Como se observa en la tabla anterior, los exámenes de selectividad solicitan a los alumnos, fundamentalmente, que resuelvan problemas de aplicación y manejo de fórmulas, de algoritmos para la localización de la imagen y sus características o de repetición memorística de cuestiones teóricas. Escasamente (un 9 %) se plantean actividades con aspectos de manejo significativo de los conceptos. Estos

resultados son coherentes con los obtenidos en otros trabajos que analizan el tipo de actividades de evaluación en la enseñanza habitual en donde se da poca importancia a los aspectos conceptuales, metodológicos, de relaciones entre ciencia, técnica y sociedad y de autorregulación (Alonso et al., 1992a).

Por otra parte, el tipo de cuestiones de óptica geométrica que se plantea en los exámenes de selectividad está escasamente relacionado con la visión. Se podría deducir de estos planteamientos que los examinadores entienden la óptica geométrica como una ciencia separada de la visión en donde la imagen, que normalmente se solicita localizar o conocer sus características, fuera un concepto independiente del ojo del observador. Únicamente en un 9 % de las cuestiones analizadas existe relación con la visión y en un solo caso se hace referencia a la clarificación de algún concepto relacionado con el modelo de visión de Kepler.

Quizás lo más llamativo de este análisis es la terminología que se utiliza en la redacción de las cuestiones y problemas de selectividad, que en muchos casos no es compatible con los conceptos implicados en el modelo de visión de Kepler y en otros pueden reforzar los obstáculos para su comprensión que la investigación didáctica ha puesto de manifiesto. Algunos ejemplos de estos son:

- Cuando se solicita que se efectúe una determinada construcción geométrica o se determine las características de la imagen en un espejo esférico o en una lente, se plantea el enunciado con la expresión: "*Un objeto luminoso que se encuentra...*" (cuestión nº 4 de junio de 2002 y problema nº 2 de junio de 1988 del distrito universitario de Madrid). Lo que puede inducir a pensar que sólo las fuentes primarias son fuentes de luz y no se pudiera obtener la imagen de cualquier objeto iluminado, cuestión esta que hemos estudiado como un obstáculo para la comprensión de los conceptos básicos de la óptica geométrica.

- Con frecuencia aparece el término "rayo de luz" con un significado no compatible con el modelo de Kepler. En general hemos encontrado 3 acepciones incompatibles:

- El rayo como sinónimo a una pequeña cantidad de luz. Así se demanda la aplicación de la ley de Snell para la refracción "*a un estrecho haz de luz que incide sobre un cristal con un ángulo,...*" (cuestión C de junio de 1999 en el distrito universitario de La Rioja). En muchas otras ocasiones cuando en los enunciados se cita el rayo de luz, se acompaña de la propiedad de

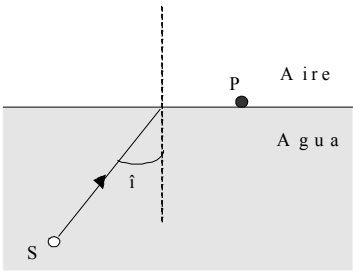
"...incidir en...", "...viajar por...", "...se propaga en...", "...recorre...", etc. Todas estas expresiones utilizadas para la luz, son aplicadas indistintamente al rayo de luz, como si este fuera una pequeña porción de la misma.

- A veces se confunde el tratamiento geométrico con el tratamiento ondulatorio, así suelen utilizar expresiones como "un rayo monocromático", o "rayos infrarrojos", etc. (Cuestión C de septiembre de 2003 del distrito universitario de Cantabria,).
- Al rayo de luz se le asigna propiedades de los objetos, así se utilizan expresiones como "rayo rojo y rayo azul" (Cuestión de junio de 2001 del distrito universitario de Castilla la Mancha). Con frecuencia, también se utilizan expresiones similares para referirse a un tipo u otro de luz, que podemos entender que son formas derivadas de la economía del lenguaje, pero asignar estas mismas propiedades a los rayos, entidades sin existencia real, no hace sino reforzar otros obstáculos que la investigación didáctica ha puesto de manifiesto.

Por último, no queremos dejar de reflejar aquí la cuestión de junio de 1999 de la Comunidad Valenciana, cuyo texto y esquema reproducimos:

¿Con qué ángulo, \hat{i} , con respecto a la vertical, debe mirar un submarinista, S, que está bajo el agua, para ver un pequeño objeto, P, que está sobre su superficie?

Datos: V de la luz en el agua = $2,3 \cdot 10^8$ m/s
 V de la luz en el aire = $3 \cdot 10^8$ m/s



Como se puede observar, en el esquema está dibujada la línea de mirada y no el rayo de luz, ya que éste, para explicar la visión, no emerge del ojo sino del objeto, P, que es visto. Por otro lado si P está en contacto con el agua y está iluminado, emite luz en todas las direcciones, por lo que llega luz hasta el ojo del submarinista cualquiera que sea su posición. Pensamos que estos errores son causados por la presentación que hacen los textos habituales de las leyes de la óptica geométrica (reflexión y refracción), desconectadas de los fenómenos de la visión y como meras consecuencias de determinada concepción de la naturaleza de la luz.

Podemos concluir, pues, que en las actividades de óptica que se proponen en los exámenes de selectividad no se solicita la clarificación de los conceptos básicos implicados en el modelo de visión de Kepler, cuando no se refuerzan, así como revelan una evaluación que influye en que la enseñanza sea de carácter marcadamente aproblemático y empirista.

Los resultados obtenidos con los tres grupos de instrumentos, los referidos a profesores, libros de texto y exámenes de selectividad, permiten contrastar la segunda derivación de la hipótesis, es decir, que la enseñanza habitual no presta atención a los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler, además de tener un marcado carácter aproblemático y empirista.

- En primer lugar, tanto los profesores como los libros de texto habituales presentan carencias a la comprensión de los conceptos fundamentales del modelo de visión de Kepler: prácticamente la totalidad de profesores desconoce el concepto de imagen óptica según este modelo, no realiza los trazados gráficos a partir del concepto de haz de luz, ni reconoce las carencias en el tratamiento de los conceptos al analizar los libros de texto habituales. De la misma manera, el análisis de los libros de texto refleja similares carencias en las explicaciones a los conceptos fundamentales cuando no explicaciones incompatibles con el modelo que permite explicar cómo vemos.

- Por otro lado, profesores y libros de texto presentan la enseñanza de forma aproblemática y empirista ya que ni los unos ni los otros plantean la ausencia de: problema estructurante para organizar la enseñanza de la óptica geométrica, un índice como estrategia o una secuencia de apartados que responda a una lógica problematizada y unas actividades iniciales para mostrar el interés y/o relevancia del estudio que se va a realizar. Por el contrario la secuencia de enseñanza habitual, en ambos casos, se presenta con un orden jerárquico de los conceptos alejado de una posible problematización de los mismos y el comportamiento de la luz (su propagación rectilínea, la reflexión y la refracción) se presenta, en la práctica totalidad de los casos, de forma alejada de la visión y no como hipótesis formuladas para explicar los fenómenos ópticos.

- Por último los resultados obtenidos al analizar los exámenes de selectividad también evocan una visión de la enseñanza aproblemática y empirista y no

prestan atención a los conceptos claves del modelo de visión de Kepler, lo que es coherente con el tipo de enseñanza habitual al que van dirigidas. Hemos detectado que la mayoría de las cuestiones son de repetición de algoritmos, numéricas o simplemente memorísticas. Escasamente se plantean cuestiones en las que se demanden explicaciones relacionadas con la visión o con los conceptos fundamentales del modelo de visión de Kepler, si acaso, con frecuencia, las cuestiones se plantean de forma incompatible con este modelo.

El análisis de los resultados de la enseñanza habitual muestra un alto grado de coherencia, que explicaría la persistencia de los obstáculos identificados para comprender cómo vemos de acuerdo con el modelo de visión de Kepler en los alumnos después de recibir dicha enseñanza. Esta coherencia es lo que nos hace pensar que las modificaciones en la enseñanza de la óptica serán difíciles y precisarán de medidas de formación del profesorado y cambios en los currículos oficiales que se orienten hacia la comprensión de los conceptos claves del modelo de visión de Kepler que, hasta ahora, no se contemplan.

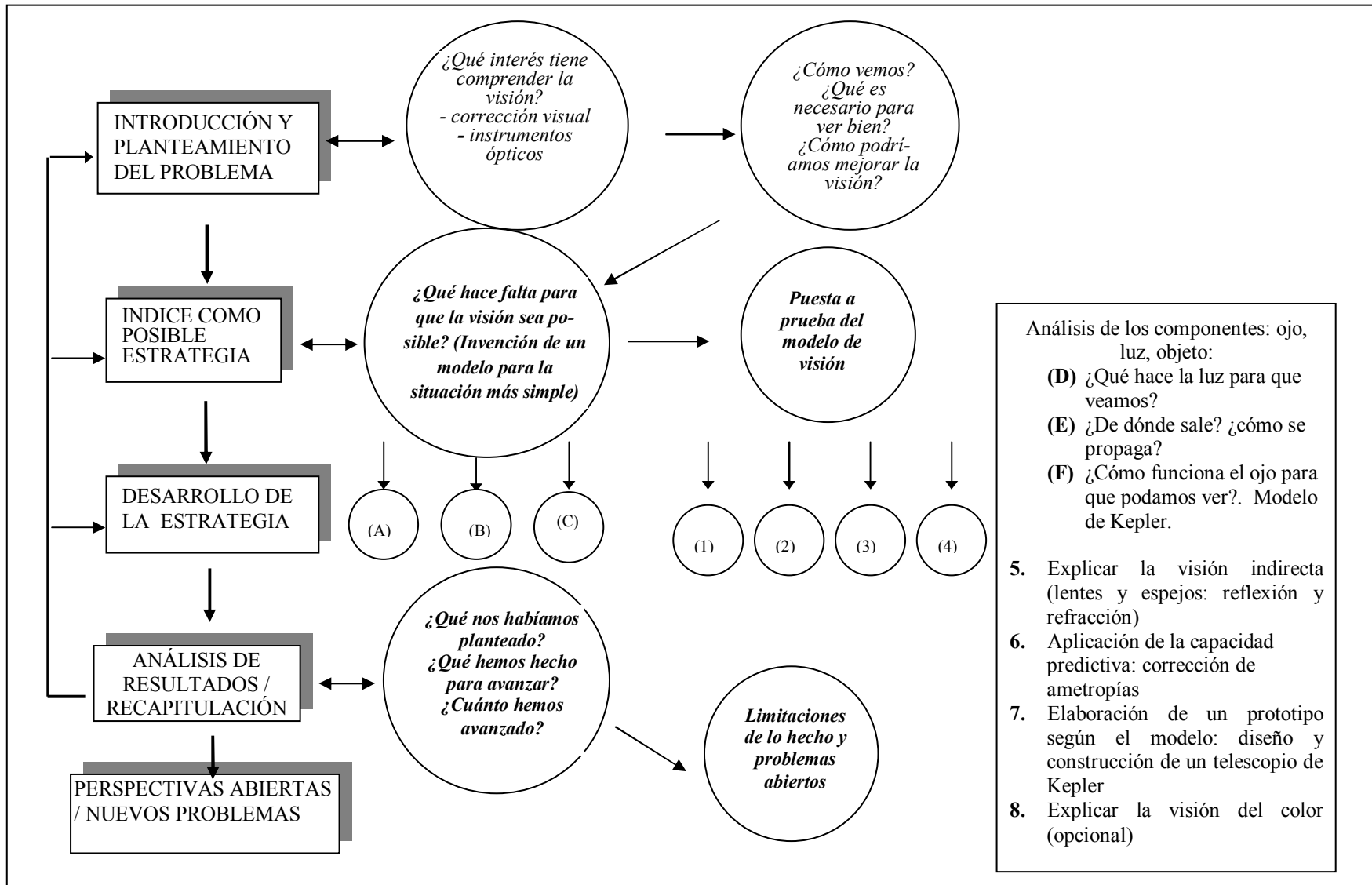
CAPÍTULO 6

PROPUESTA DE UNA SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA ABORDAR EL PROBLEMA DE "¿CÓMO VEMOS? ¿CÓMO PODEMOS VER MEJOR?" BASADA EN EL ESTUDIO REALIZADO

Con toda la información que hemos obtenido del estudio empírico para probar la relevancia de los obstáculos identificados para la comprensión de cómo vemos, estamos en una posición idónea para elaborar la estructura "fina" del tema, es decir, una secuencia de actividades detallada para abordar el problema ¿cómo vemos?, ¿cómo podemos ver mejor? según la planificación propuesta que esquematizamos gráficamente en la página siguiente y que podrá servir de ayuda para la lectura del programa-guía de actividades que proponemos a continuación.

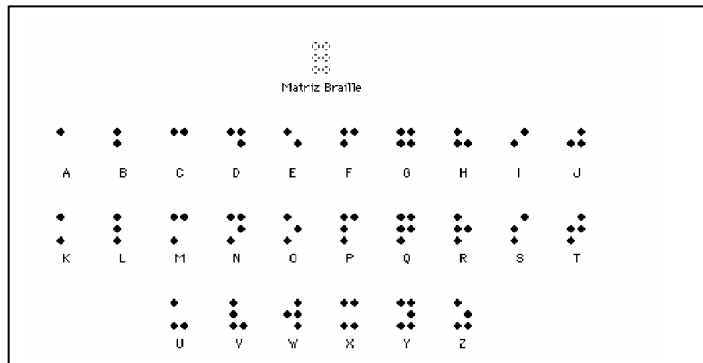
En la secuencia de actividades que presentamos para alumnos de E.S.O. hay párrafos que son comentarios o entradillas a las actividades de los alumnos y, también, comentarios para profesores en los que se justifica la actividad, se dan recomendaciones sobre la actuación del profesor o se proponen alternativas. En algunas actividades de carácter práctico se adjunta, además, una ficha para ser completada en la realización del trabajo de laboratorio, bien entendido que la ficha que ponemos a disposición de los profesores que sigan este programa-guía nunca deberá evitar el rico trabajo de formulación de hipótesis y de diseño experimental. Otras actividades integradas en este programa-guía forman parte del itinerario de evaluación y serán comentadas oportunamente. De estas últimas, las propuestas como recapitulación serán inicialmente corregidas y devueltas a los alumnos acompañadas de la "recapitulación del profesor", que incluimos, también, en este programa-guía comentado.

Gráfico 3.1: Estructura problematizada del tema: "¿Cómo vemos? ¿cómo podemos ver mejor?"



LUZ Y VISIÓN: ¿CÓMO VEMOS? ¿CÓMO PODEMOS VER MEJOR?

La importancia del problema que abordamos en este tema es fácilmente reconocible ya que a través de la visión obtenemos la mayor parte de la información con que conocemos e interpretamos nuestro entorno. A través de la visión percibimos, de las cosas que vemos, el tamaño, la forma, el color, el brillo, la textura, la proximidad o lejanía, etc.



Podemos valorar, aún más, la trascendencia de la visión en

nuestras vidas si imaginamos las limitaciones que tienen las personas ciegas. Estas personas desarrollan otras capacidades para suplir, en parte, dichas limitaciones: aumento de la capacidad de percibir sonidos y sensaciones táctiles, mejora del sentido de la orientación, etc. Para la lectura y escritura utilizan el método Braille, un sistema basado en el reconocimiento por el tacto de agujeros realizados en un papel y un código de puntos para su interpretación.

A.1 Agujereando la tapa de cartón de tu libreta con un punzón (puede servirte la aguja de un compás) y siguiendo el código Braille, escribe tu nombre y reconócelo tocando con las yemas de los dedos.

La comprensión de cómo vemos las cosas que nos rodean ha sido uno de los problemas que más ha interesado a los científicos de todas las épocas y los avances producidos han permitido mejorar multitud de deficiencias en la visión y desarrollar aplicaciones tecnológicas que mejoran esta capacidad humana

A.2 Citad innovaciones y aplicaciones tecnológicas desarrolladas a lo largo de la historia sobre la visión y que hayan supuesto una mejora en la calidad de vida o un avance en el desarrollo científico.

A la vez, la comprensión de cómo vemos y el desarrollo de las aplicaciones tecnológicas que hemos citado, obligó a los científicos a considerar la luz como “algo” que puede ser objeto de estudio por parte de la Física y a conocer cómo se propaga y cómo se comporta cuando interacciona con los dispositivos ópticos: el ojo, las lentes, los espejos,...

A.3 Plantead cuestiones que deberíamos abordar para profundizar en la comprensión de cómo vemos, de forma que podamos diseñar una estrategia para su estudio.

Así pues, el ÍNDICE que a modo de estrategia seguiremos para avanzar en el problema de **¿cómo vemos? ¿cómo podemos ver mejor?** será:

1. ¿Qué es necesario para ver bien los objetos? Elaboración de un modelo que explique la visión directa.
 - 1.1. ¿Qué relación existe entre el objeto que es visto, la luz y el ojo?
 - 1.2. ¿Cómo funciona el ojo humano?
2. Puesta a prueba del modelo de visión en situaciones de visión indirecta.
 - 2.1. ¿Cómo vemos al mirar a un espejo plano?
 - 2.2. ¿Cómo vemos los objetos sumergidos en líquidos transparentes?
 - 2.3. ¿Cómo vemos al mirar a través de lentes?
3. Aplicaciones tecnológicas del modelo de visión.
 - 3.1. ¿Cómo se corrigen las anomalías visuales?
 - 3.2. ¿Cómo funciona un telescopio? (opcional)
4. Conclusiones y problemas abiertos
5. Actividades complementarias: ¿Cómo explicar el color con que vemos los objetos?

Comentarios A.1, A.2 y A.3:

La finalidad de las dos actividades iniciales es mostrar el interés que tiene el estudio del tema. Pensamos que este enfoque es motivador para los estudiantes ya que no puede pasarles inadvertida la dificultad que tiene reconocer su nombre con el tacto. Pero no sólo eso, a la vez puede ser una llamada a la comprensión y solidaridad con las personas con anomalías visuales, no necesariamente severas, pensemos que algunos adolescentes con problemas menores de visión tienen problemas en sus relaciones con los demás y se

sienten muy afectados por ello. Por otro lado, son tantas las aplicaciones tecnológicas para mejorar la visión y corregir las anomalías visuales que pensamos que los estudiantes enmarcarán el estudio que nos ocupa en un campo más grande y de enorme interés práctico. El profesor puede completar las aportaciones de los estudiantes con información sobre:

- a) Las gafas, cuyo uso se conoce desde el siglo XIII (sus primeros diseños se conocen por cuadros de retratos de monjes que datan de 1352) y cuya construcción, a partir de pruebas de ensayo y error, es anterior a la comprensión en profundidad de la visión humana.
- b) Los avances en la astronomía, a partir de siglo XVI gracias a la invención del telescopio.
- c) Los avances en biología y medicina con la invención del microscopio, etc.

Respecto de la A.3, sabemos que a los estudiantes les resulta de enorme dificultad plantear cuestiones en un tema que comienzan y del que tienen conocimientos e ideas confusas. No obstante, el profesor deberá “animar” a los grupos de trabajo a que escriban sus preguntas aunque no parezcan bien formuladas y sólo manifiesten ideas incipientes sobre el tema. Se les puede sugerir: “Si fuéramos un equipo científico que desea comprender cómo vemos, ¿por dónde podríamos empezar?, ¿qué preguntas nos plantearíamos primero? ¿cómo probar nuestras conjeturas?,...”. Con posterioridad a sus aportaciones, se puede realizar una puesta en común del trabajo de toda la clase, donde las cuestiones planteadas por los alumnos se pueden agrupar en los siguientes problemas generales que organizan el índice del tema:

- Cuestiones que pueden englobarse en: ¿Qué es necesario para ver bien los objetos? Avanzar en la respuesta a preguntas de este tipo supondrá elaborar un modelo de visión que explique la visión directa de los objetos en el que se clarifique la función y el comportamiento del ojo, del objeto que es visto y de la luz.
- Cuestiones que pueden englobarse en: ¿Cómo vemos al mirar a un espejo, o al mirar a un objeto sumergido en el agua, o al mirar a través de las lentes,..?, es decir, cómo explicamos la visión indirecta. Avanzar en una respuesta a este tipo de preguntas supondrá poner a prueba el modelo de visión directa de los objetos, en una multitud de situaciones de visión.
- Cuestiones que pueden englobarse en: ¿Cómo mejorar la visión? En donde se incluirían preguntas tales como ¿qué lentes son necesarias para corregir las anomalías visuales? o ¿cómo funciona una cámara fotográfica o un telescopio?, etc. Avanzar respuestas a estas cuestiones pondría de manifiesto la capacidad tecnológica y de aplicación práctica del modelo teórico de visión elaborado.

- Otras cuestiones relativas a la visión del color: ¿Cómo vemos los colores? Lo que requerirá un refinamiento del modelo de visión y un estudio en profundidad de la luz con que se iluminan los objetos que vemos de distintos colores.

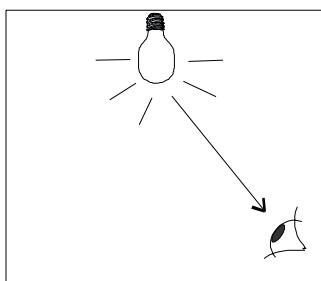
1. ¿QUÉ ES NECESARIO PARA VER BIEN LOS OBJETOS? ELABORACIÓN DE UN MODELO DE VISIÓN DIRECTA.

Como hemos comentado anteriormente comenzaremos con la situación más sencilla: cuando vemos un objeto al mirarlo directamente, clarificando la relación entre el ojo, la luz y el objeto que vemos.

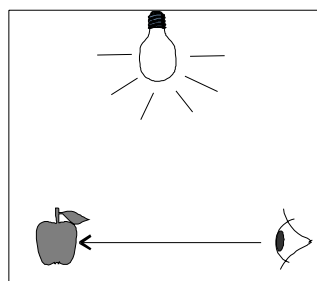
1.1 ¿Qué relación existe entre el objeto que es visto, la luz y el ojo?

A.4 ¿Qué hace falta para que podamos ver un objeto? Explicad la función que realiza el ojo, la luz y el objeto visto.

A.4(opcional) Una persona ha realizado las siguientes explicaciones sobre cómo ve al mirar a una bombilla encendida y a una manzana en el interior de una habitación iluminada.



“Veo la bombilla porque envía luz al ojo”

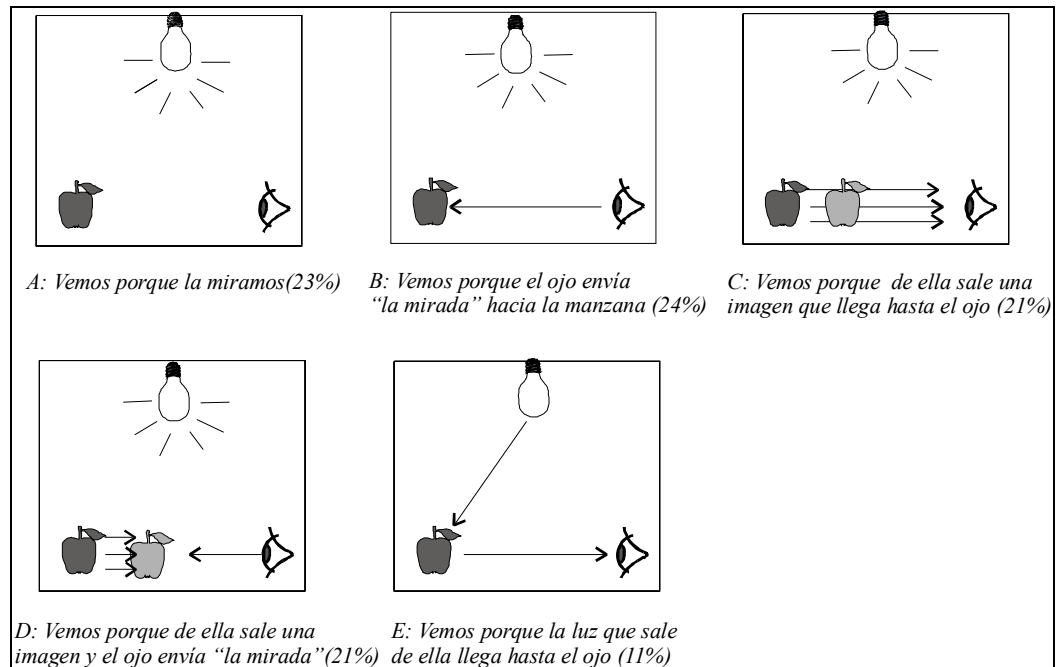


“Veo la manzana porque la miro”

Comentad si estáis de acuerdo con esas explicaciones y proponed, en su caso, otras mejores. Plantead también las dudas que os surjan.

Comentarios A.4: El objetivo de esta actividad es iniciar la reflexión sobre qué es necesario para ver un objeto y la función que realizan el objeto, la luz y el ojo, así como plantear de forma explícita los interrogantes que habrá que resolver para avanzar en el problema planteado de una forma, lógica y razonada. Recordemos que numerosas investigaciones han constatado que, en un elevado porcentaje, los estudiantes de estas edades suelen interpretar la visión como un proceso en el que no es necesario que llegue luz al ojo del observador procedente del objeto. En nuestro propio estudio empírico (véase

tabla 5.5, pag.175) hemos encontrado esquemas como los siguientes en alumnos de ESO antes de la enseñanza:



El análisis y discusión de las explicaciones dadas por los alumnos a cómo vemos los objetos en esta situación, permite plantear en el aula algunos interrogantes:

1. Se admite que al ver la bombilla llega luz al ojo procedente de ella, pero, ¿es necesario que llegue luz al ojo procedente de los objetos que vemos como la manzana? Esta cuestión deberá ser recogida por el profesor aunque sea planteada de forma minoritaria por los alumnos cuando expresan que la luz de la bombilla "rebota" en la manzana.
2. ¿Sale "algo" del ojo al ver los objetos? Y también ¿qué significan las flechas dibujadas en esos esquemas?
3. ¿La bombilla encendida emite luz que se propaga en líneas rectas (rayos) en todas las direcciones? ¿Podemos aceptar esta idea y su representación sin contrastación experimental y sin un análisis en profundidad de su significado?
4. A veces se piensa que la luz de la bombilla "rebota" en la manzana y llega al ojo, pero si es así ¿por qué vemos la manzana y no la bombilla como ocurre en un espejo?, ¿sale una imagen de la manzana con la luz? o también ¿qué hace la luz en el ojo para que veamos bien la manzana?

Estos interrogantes permiten cuestionar algunas ideas de "sentido común" sobre el proceso de la visión. Es conveniente resaltar que existen multitud de ejemplos en el proceso de construcción de la ciencia en los que los científicos hacen

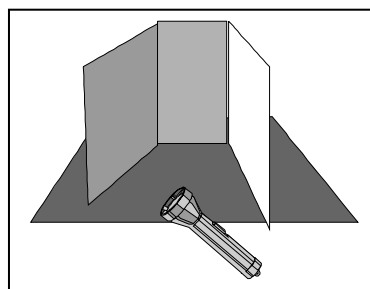
explícitas las hipótesis contenidas en sus razonamientos y someten a pruebas rigurosas esas ideas que pueden parecer de "sentido común" (Chalmers, 1984). Debemos, pues, reflexionar y someter a contrastación experimental las consecuencias lógicas que se derivan de estas ideas (National Research Council, 2001).

Ante las dos opciones que plantea la actividad, si los alumnos aceptan que llegue luz al ojo procedente de la bombilla encendida y, sin embargo, se muestran reticentes a aceptar que del objeto iluminado salga luz que llegue al ojo para ser visto, entonces poseen dos explicaciones de la visión según el tipo de objeto que es visto, aspecto éste característico de la epistemología espontánea (Hewson, 1990). El profesor, llegado este punto, debe hacer explícita una de las características esenciales de la epistemología científica como es la búsqueda intencionada de explicaciones unitarias o universales a los fenómenos naturales (Martínez Torregrosa et al., 1993; Chalmers, 1992). Así pues, siguiendo esta intención, que reiteradamente ha producido éxitos en el proceso de construcción de la ciencia, nos llevará a preguntarnos si los objetos que vemos emiten luz, como la bombilla, y por eso los vemos. Con esa intención está prevista la experiencia que se propone realizar en la actividad siguiente. El resto de interrogantes se abordarán en actividades sucesivas.

A.5 Citad observaciones habituales que puedan sugerir que los objetos que son iluminados emiten, a su vez, luz. Diseñad experiencias sencillas realizables en el aula para contrastar esta hipótesis anotando e interpretando las observaciones.

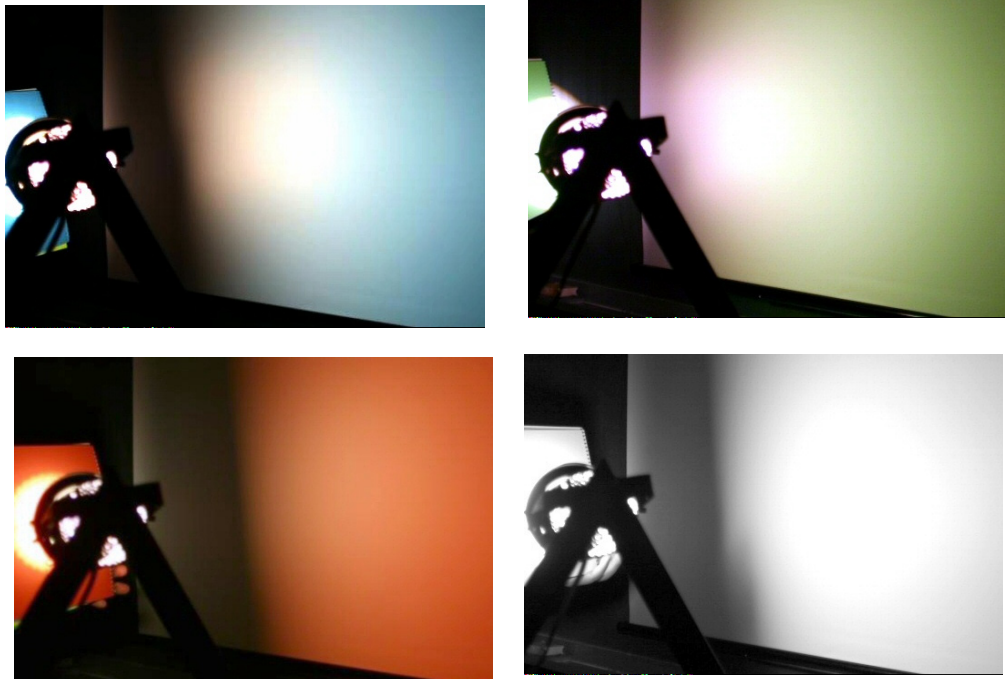
A.6 Explicad cómo es posible que una habitación se ilumine un día nublado cuando se abre una ventana orientada al norte.

Comentarios A.5 y A.6: A partir de las propuestas de los alumnos podemos sugerir la realización de la experiencia que se muestra en la figura del margen en la que con una linterna y un grupo de cartulinas, así dispuestas, podemos observar que la cartulina blanca se ilumina con el tono del color de la cartulina que apunta la linterna.



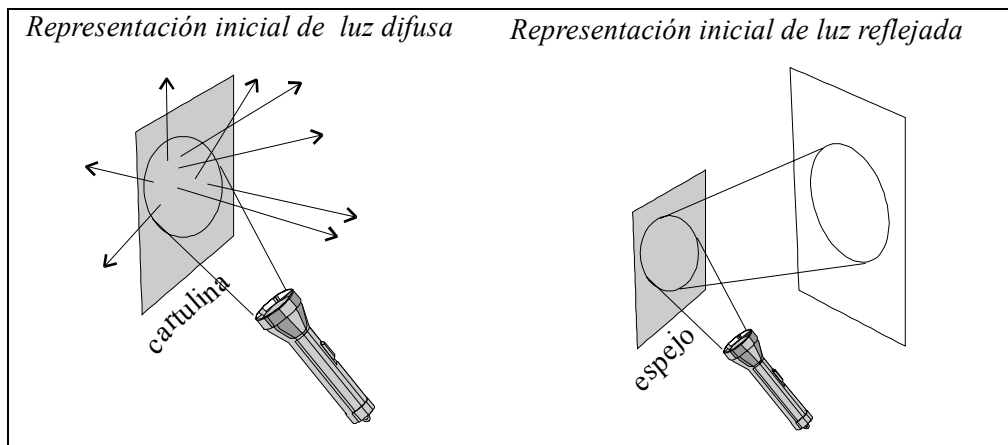
Esta experiencia ha sido descrita por Viennot y Chauvet (1997) con la intención de "convencer" a los alumnos de que una pantalla iluminada (si no es perfectamente negra) difunde algo de luz. La estrategia propuesta es, pues, permitir a los alumnos observar que la pantalla blanca enfrentada a una roja se colorea con un tono rojo cuando la primera recibe luz "blanca" de la linterna. Si

la cambiamos por otra verde, el color de la segunda se vuelve verde y este efecto se intensifica por la percepción al contraste sucesivo. Cuando se enfrenta a la luz de la linterna una cartulina negra o un objeto negro rugoso, sin brillos, apenas podemos apreciar iluminación en la pantalla, mientras que cuando la cartulina es blanca, la pantalla recibe la iluminación máxima. Fotografías como las siguientes muestran estas experiencias.



Dada la tendencia común a interpretar el área iluminada en la pantalla en términos de un impacto de luz, de la situación cabe esperar que se facilite la introducción de la luz difundida por los objetos iluminados y puedan ser considerados como fuentes secundarias de luz. La observación de la pantalla blanca iluminada por la luz difundida suele ser expresada en el lenguaje de los alumnos con frases como: *“la luz de la linterna ha rebotado en la cartulina de color y ha llegado a la otra”*. Debemos llamar la atención, entonces, que el tono de color que observamos no es el de la luz de la linterna, sino el de la cartulina donde impacta su luz, que en el caso de la cartulina negra no recibe ningún tipo de luz y, en el caso de la cartulina blanca, la pantalla recibe máxima iluminación sin modificar el tono de color con que se ve la pantalla. Por otro lado, para diferenciar la luz difundida de la luz reflejada, podemos sustituir la cartulina por un espejo plano y señalar que la luz difundida alcanza a toda la cartulina blanca, con más o menos intensidad, por lo que la luz emitida por los objetos iluminados no tiene una sola dirección de propagación. Sin embargo, la luz reflejada en el espejo sólo ilumina la cartulina blanca en una zona circular perfectamente delimitada de la misma, por lo que la idea que suele ser expresada como “rebote” está más en concordancia con el fenómeno observado en la reflexión

especular y no con el de la reflexión difusa. Estas precisiones serán, por el momento, suficientes para el objetivo perseguido y los esquemas aceptables por ahora serán los de la figura siguiente, aunque los aspectos de la visión del color y de la reflexión especular serán objeto de estudio en actividades posteriores.



La utilización de procesos cognitivos de inducción simple como éstos, puede llevar a la idea errónea o incompleta del proceso de construcción de la ciencia utilizado, pero en la unidad didáctica existe otra variedad de actividades y de situaciones con un estatus epistemológico diferente para compensar este posible efecto negativo. Por otra parte no es posible que los estudiantes puedan alcanzar una concepción completa de la ciencia, desde el punto de vista epistemológico, en un curso de iniciación a la Física como este.

Cabe resaltar que este tipo de razonamiento coincide con el usado por Alhazen (Iizuka, 1983) en contra del fuego visual defendido por algunos filósofos griegos cuando argumentaba "... el grado de oscuridad y color de un objeto cambia en concordancia con la iluminación, y si los rayos visuales fueran los responsables de la visión, entonces la visión no debería estar influida por condiciones externas".

A partir del análisis realizado en las actividades anteriores debemos concluir (y los estudiantes anotarán esta conclusión en sus cuadernos de trabajo basándose en las observaciones realizadas) que podemos clasificar los cuerpos que vemos en:

- fuentes luminosas primarias, cuando se produce en ellos mismos la luz que emiten (bombillas, estrellas, hogueras, pantallas de televisión,...), y
- fuentes luminosas secundarias, si la luz sale de ellos sólo si están siendo iluminados.

La A.6 está propuesta con el objetivo de poner a prueba las conclusiones obtenidas en la actividad anterior y considerar a la atmósfera como fuente

luminosa secundaria. El profesor puede plantear otras cuestiones para apreciar el papel difusor de la atmósfera como ¿qué ocurriría si el aula estuviera en la Luna y la luz del Sol no incidiera directamente sobre las ventanas?, o ¿por qué la sombra de los astronautas al andar sobre la Luna es totalmente negra y la de una persona sobre la Tierra no?

Así, pues, no sólo las fuentes primarias emiten luz que llega al ojo para ser vistas sino que también los objetos que vemos (como la manzana de A.4 que debe ser considerada como fuente secundaria de luz). Pero, ¿el ojo emite algo con la mirada para ver los objetos? Esta es la segunda idea de sentido común que debemos probar. Esta hipótesis fue defendida por algunos filósofos de la cultura griega y está apoyada, entre otras razones, en el hecho de que para ver algún objeto, el ojo debe dirigir la mirada hacia él y enfocarlo para ver nítidamente, o sea, realizar un esfuerzo que procede del interior del ojo. Sin embargo, esta idea fue contestada por muchos otros pensadores en base a experiencias cotidianas.

A.7 Si la visión fuera debida a que miramos, simplemente, o a que cuando miramos “algo” sale del ojo ¿por qué no vemos cuando estamos en la oscuridad total?

A.7.1 Muchas personas opinan que los ojos de los gatos, de los búhos y de algunos otros animales emiten “algo” y por eso pueden ver en la oscuridad. Y que, incluso, esa es la razón por la que podemos ver sus ojos en las noches oscuras. Argumentad a favor o en contra de estas ideas.

Comentarios A.7 y A.7.1: En las actividades precedentes hemos realizado experiencias y dado argumentos en contra de uno de los obstáculos más fuertemente arraigados, cual es el no considerar a los objetos que vemos fuentes luminosas (véase tabla 5.2 en la página 170), sin embargo es necesario “convencerles” de que del ojo no sale nada cuando vemos un objeto. Pensemos que la flecha que en algún porcentaje los alumnos dibujan saliendo del ojo, quiere representar el esfuerzo de dirigir la mirada y enfocar el objeto y no tiene el mismo significado que las flechas que han dibujar para representar la luz emitida por las fuentes primarias y secundarias. En estas actividades se tendrá oportunidad de reflexionar sobre qué significa oscuridad **total** y desmontar algunos mitos según los cuales algunos animales que pueden ver en la noche lo hacen sin que llegue luz a sus ojos. El profesor puede, además, proponerles que escriban frases del lenguaje coloquial en las que parezca que algo sale del ojo, Por ejemplo: “Hay miradas que matan”, “iéchale una mirada a esto!”. También hay películas muy conocidas cuyos héroes (Superman) emiten “rayos láser” por los ojos capaces de fundir metales. Incluso es una idea recogida en la mitología

griega: ...“Al capturar a la Medusa, Perseo empleó su escudo como espejo para desviar su mirada cuyo poder dejaba petrificado”.

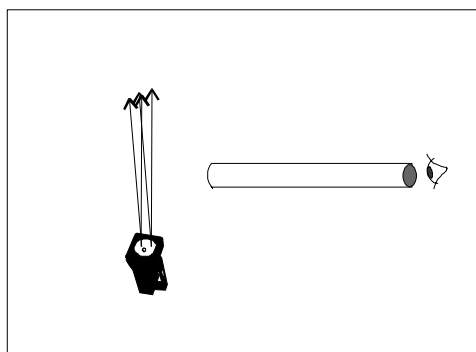
A partir de este momento, como consecuencia de estas reflexiones, siempre que dibujemos flechas entenderemos con ello que estamos representando la luz emitida por los objetos, y para indicar que el observador está mirando, bastará con que el ojo esté dibujado encarado hacia el objeto.

Otro aspecto importante que es necesario tratar antes de estudiar qué es necesario para ver bien y, con ello, el comportamiento óptico del ojo humano, es el tratamiento geométrico de la luz.

La tercera idea de sentido común sobre la que debemos reflexionar es que las fuentes luminosas (primarias y secundarias), los cuerpos que vemos, emiten luz que se propaga en líneas rectas (rayos) en todas las direcciones. Lo que nos lleva a clarificar el concepto de rayo que usamos y a probar dos consecuencias:

- a) si es realmente recto el camino seguido por la luz en el aire (y en el vacío), y
- b) si la propagación es instantánea o, por el contrario, la luz es una entidad que viaja a través del espacio con una rapidez limitada.

A.8 Cuando miramos a través de un tubo, como indica el esquema, hacia la luz que emite una linterna sólo vemos la pared de enfrente. Sin embargo, si en las proximidades de la linterna echamos el humo de un papel recién apagado o un poco de polvo de tiza, podemos ver unas “estelas” de luz.



Realizad la experiencia y contestad las cuestiones:

- ¿se ve la luz?
- ¿qué es lo que vemos realmente?
- ¿qué representan los rayos de luz?

Comentarios A.8: Dado que la estrategia que hemos diseñado para construir un modelo de visión pasa por la necesidad de disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado para luz, las actividades diseñadas intentan huir de aquellas experiencias, como las que aparecen en la mayoría de los libros de texto, de “materialización” del rayo de luz (Chauvet et al., 1999, Hirn y Viennot 2000). Nos estamos refiriendo a aquellas experiencias en las que debido a la difusión de las partículas de polvo se hace “visible” un haz de luz

láser, o aquellas otras en las que el haz de luz de una fuente luminosa se hace pasar por una rendija e ilumina una estrecha porción de la mesa. Recordemos que tenemos evidencias suficientes para pensar que los alumnos creen que la propia luz es visible y que creen que el rayo de luz es la zona donde vemos las partículas de polvo gracias a la difusión de la luz que entra por la rendija de una ventana y no un concepto ideal que únicamente representa los límites del haz de luz emitido por cada fuente puntual. Recientemente se ha considerado que el "rayo materializado" es un detalle "crítico" que es necesario considerar con precaución en la práctica educativa y que los profesores descuidan frecuentemente sus riesgos y efectos adversos (Viennot et al. 2004). Para Saltiel y Kaminsky (cuyas ideas se recogen en el trabajo de Viennot citado anteriormente) la comprensión de la visibilidad del "rayo materializado" implica la aceptación y clarificación de tres premisas que no se pueden obviar:

- a) existen partículas difusoras en la región del espacio donde se "visualiza el rayo".
- b) las partículas difunden luz hacia atrás en una alargada región del espacio.
- c) parte de la luz difundida por las partículas entra en el ojo del observador.

Nuestros resultados son coincidentes con las objeciones mostradas por la investigación de la práctica educativa sobre el "rayo materializado" ya que permiten confirmar que los alumnos piensan que los rayos o la propia luz es visible (véase tabla 5.2 en la página 170).

En A.8, se presenta una experiencia sencilla que se puede realizar en clase con una linterna o un proyector de diapositivas y un folio enrollado formando un tubo por el que mirar. Con ella tratamos de llamar la atención sobre los rayos de luz que dibujamos, los cuales únicamente son líneas ideales de cada una de las direcciones de propagación de la luz, que no son visibles y que lo que vemos al mirar por el tubo son las partículas de polvo que al estar iluminadas envían luz hasta el ojo. No obstante, las dibujamos como líneas rectas, lo que, de acuerdo con la estrategia seguida, deberá ser sometido a contrastación experimental y para eso las actividades siguientes.

A.9 Citad fenómenos habituales que puedan interpretarse como consecuencia de la propagación rectilínea de la luz.

Hemos aceptado que las fuentes primarias y secundarias (los objetos iluminados) emiten luz en todas las direcciones y hemos interpretado algunos fenómenos como consecuencia de su propagación rectilínea, pero la forma en como se representa la propagación de la luz puede ser más o menos compleja, por lo que analizaremos en

primer lugar el caso más sencillo, el de una fuente puntual, y, posteriormente, estudiaremos la propagación de la luz en fuentes extensas, de tamaño apreciable.

A.10 Iluminando un cuerpo opaco con una fuente luminosa puntual podemos ver una sombra sobre una pantalla situada detrás de él, ¿qué forma tendrá la sombra? ¿qué tamaño tendrá? Diseñad y realizad una experiencia para probar vuestras hipótesis.

Comentarios A.9 y A.10:

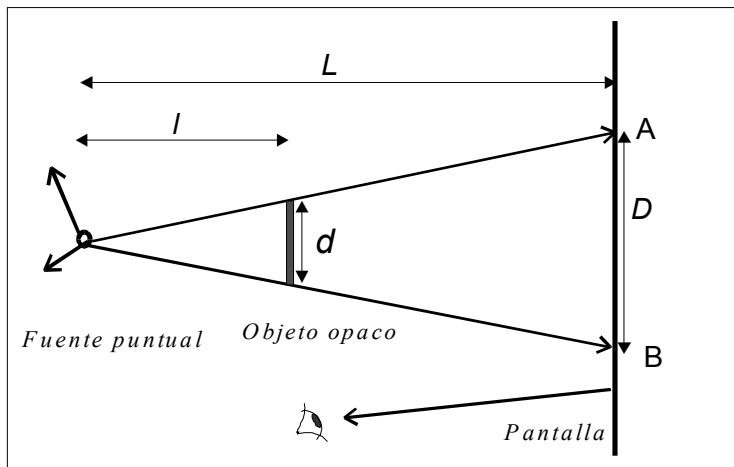
Es posible que los fenómenos citados en A.9 todos sean derivados de experiencias realizadas con linternas, proyectores o punteros de luz láser, en ese caso el profesor deberá informar que estos dispositivos tienen lentes que dirigen la luz en unas direcciones preferenciales, por lo que se recomendará que propongan otros fenómenos realizados con fuentes luminosas, sin dispositivos especiales, cuya luz se propague en todas las direcciones. De entre los fenómenos citados remarcaremos la formación de sombras que será objeto de estudio en la actividad siguiente. También llamamos la atención sobre la necesidad de estudiar el fenómeno de la forma más simple posible, por lo que usaremos en principio fuentes luminosas puntuales con las que iluminar el cuerpo opaco. Recordemos que los estudiantes, en algunas situaciones, pueden predecir, por ejemplo, la forma y el tamaño de la sombra al iluminar un cuerpo opaco sin necesidad de recurrir a trazados geométricos de propagación de la luz (véase tabla 5.3 en la página 171).

La experiencia que se propone en A.10 se puede hacer oscureciendo el aula y utilizando materiales sencillos. Como fuente puntual podemos utilizar una pequeña lámpara de linterna (3 V, 0,3 A) con un portalámparas estándar conectado a una pila de 4,5 V (conocida como pila de petaca). Los bornes de la pila de petaca permiten hacer la conexión a algunos portalámparas, directamente, sin necesidad de cables ni conexiones engorrosas.

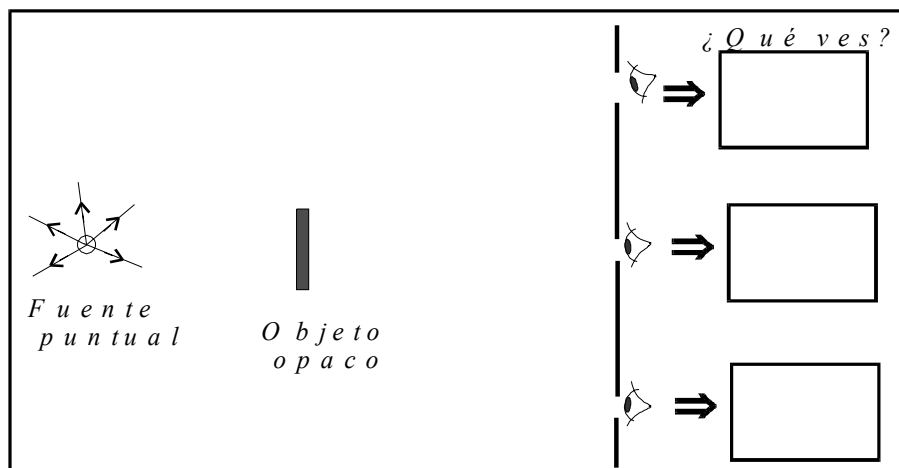
Los alumnos pueden probar que alejando o acercando la pantalla se obtienen tamaños de sombras mayores o menores. La forma de la sombra será la del perfil del objeto que se enfrenta a la fuente luminosa y si la luz se propaga en línea recta podremos verificar que los valores de las distancias del objeto y de la sombra a la fuente y los tamaños de ambos cumplen el teorema de Tales de los triángulos semejantes: $\frac{D}{d} = \frac{L}{l}$. Dado que existen cuatro magnitudes

interdependientes a variar, se les puede sugerir que comprueben esa relación dejando el objeto opaco y la fuente luminosa en una posición fija y variando, únicamente, la posición de la pantalla. De esta forma, los valores d y l son los

mismos en todos los casos y sólo se deberá medir, para cada posición de la pantalla, la anchura de la sombra, D , y la distancia de la pantalla a la fuente, L .



A.11 Suponed que en una habitación de paredes negras situamos el ojo en los distintos agujeros señalados de la pantalla, ¿qué se verá desde cada uno de ellos cuando la fuente puntual emita luz?



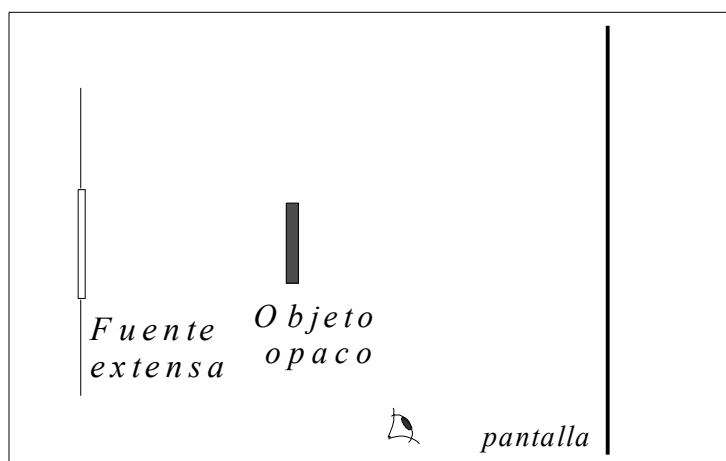
Comentarios A.11: Dada la resistencia de los alumnos a aceptar la visión como un fenómeno que se produce al incidir luz en el ojo procedente de una fuente luminosa (primaria o secundaria) y a pensar que la propia luz se ve, esta actividad permitirá poner a prueba los conocimientos elaborados en las actividades anteriores. Sería conveniente que se contestara individualmente, como si se tratara de una autoevaluación y, después, se discutiera en grupo. Es de esperar que tengamos que corregir, en algunos casos, razonando a partir de las experiencias realizadas, que desde el agujero central no se nada, no se ve el objeto opaco porque desde él no se envía luz hasta el ojo al no estar iluminada la parte enfrentada al observador. Desde los agujeros superior e inferior se ve la fuente pero no el rayo de luz y que, para predecir estos hechos, es necesario realizar trazados de rayos. Una vez corregida la actividad y analizados los

errores, los alumnos pueden tener ocasión de valorar el avance conseguido si realizan encuestas a compañeros de otras clases o a sus familiares, cuyas respuestas suelen coincidir con las de sentido común.

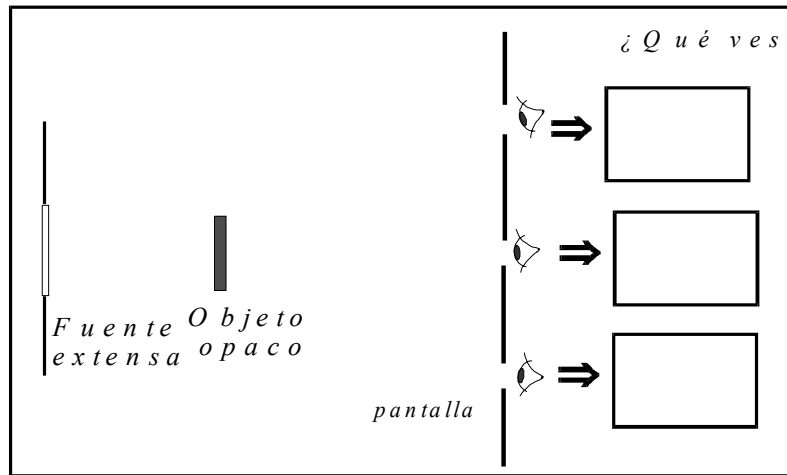
Una vez discutidos estos aspectos claves, podemos aprovechar esta actividad para introducir el concepto de haz divergente de luz. Es de esperar que las representaciones gráficas que hagan los alumnos consistan en un único rayo que pasa por el agujero por el que se ve la fuente. Si, como hemos avanzado, el rayo solo representa una de las direcciones de propagación de la luz, sería conveniente trazar dos rayos que pasen por los límites del agujero, por lo que habremos seleccionado un haz divergente de luz (cónico) que representa, mejor que un único rayo, la luz que entra por él.

Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones, las sombras son causadas por fuentes luminosas extensas, de un tamaño apreciable.

A.12 Si la fuente luminosa fuese un tubo fluorescente situado en la posición que señala el esquema, ¿cómo será la sombra que veremos en la pantalla? Trazad los rayos que creáis necesarios para justificar la respuesta y realizad la experiencia para confirmar las predicciones.

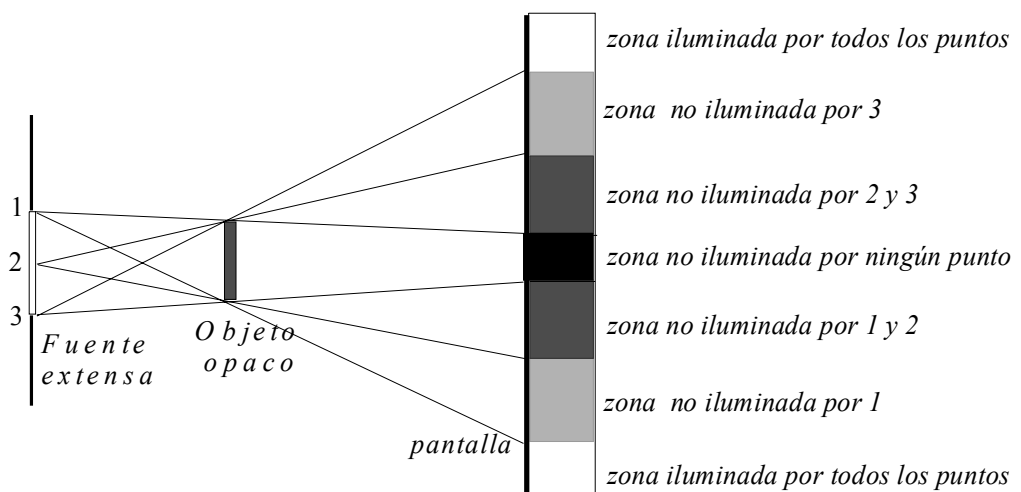


A.13 Suponed que en una habitación de paredes negras situamos el ojo en los distintos agujeros señalados de la pantalla, ¿qué se verá desde cada uno de ellos cuando la fuente extensa emita luz Realizad trazados gráficos para confirmar las predicciones

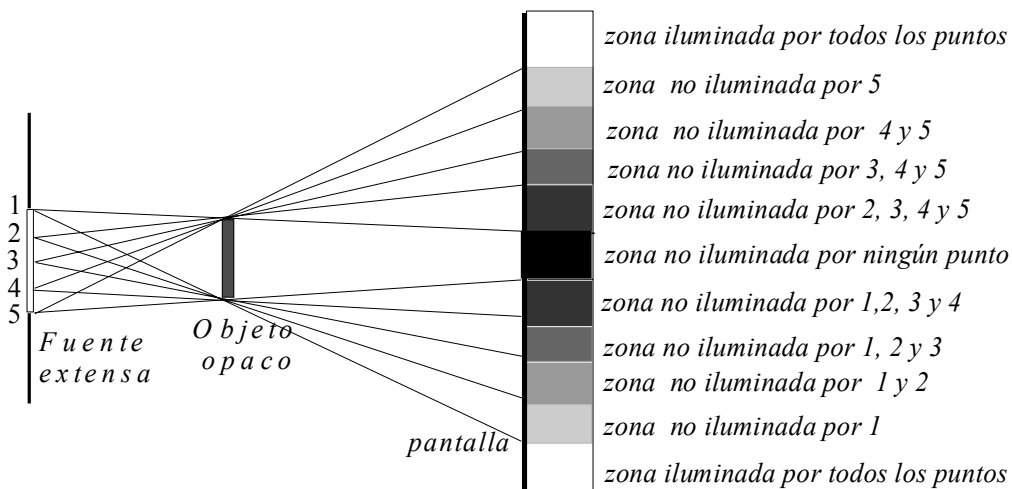


Comentarios A.12 y A.13: Cuando se utilizan fuentes extensas de luz, las predicciones que se hagan y los trazados gráficos necesitan de una hipótesis suplementaria, como es el considerar la fuente como conjuntos de fuentes puntuales. Nuestro estudio empírico ha mostrado que éste es otro obstáculo para la comprensión del modelo de visión de Kepler al que habrá que prestar atención. Si desde varios puntos de la fuente (es conveniente tomar los extremos) se trazan los haces de luz que el objeto opaco impide que lleguen a la pantalla, podremos formar áreas de sombra que se solapan. Para ayudar a comprender la formación de una penumbra continua podemos realizar trazados gráficos suponiendo que la fuente extensa está formada por conjuntos discretos de puntos (3, 5 puntos), e inferir, a partir de ellos, lo que se observará al considerar la fuente extensa como un conjunto ilimitado de puntos.

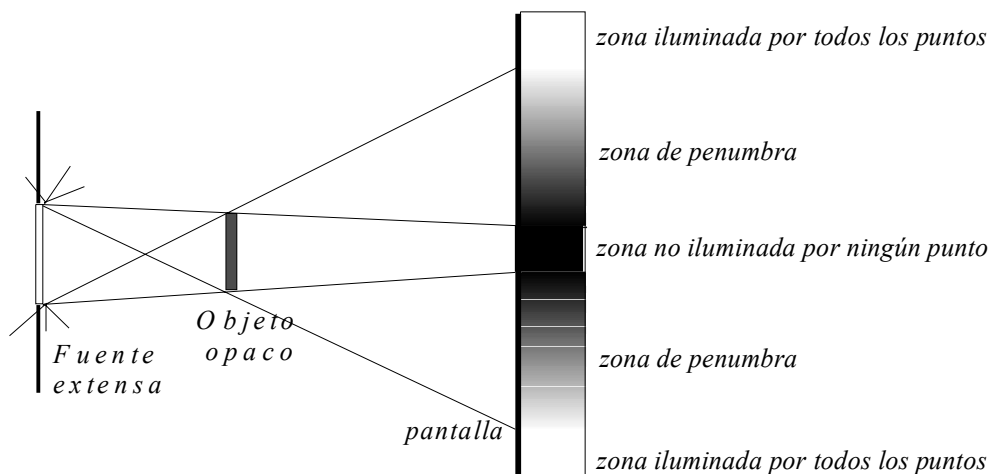
a) fuente extensa formada por tres puntos luminosos



b) fuente extensa formada por cinco puntos luminosos

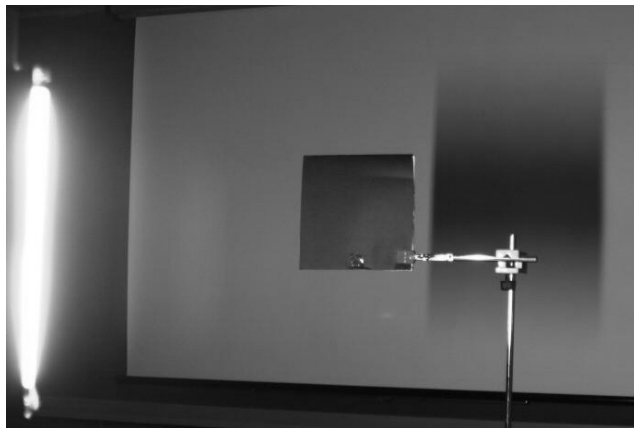
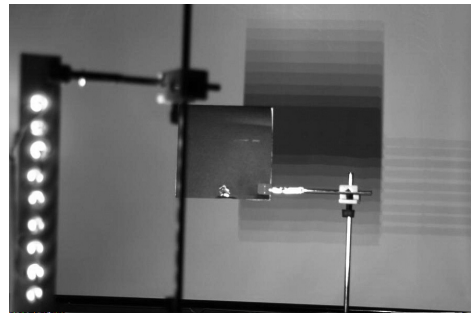
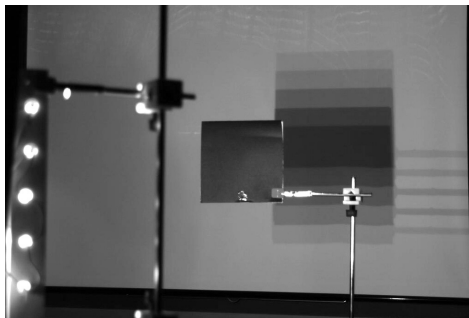
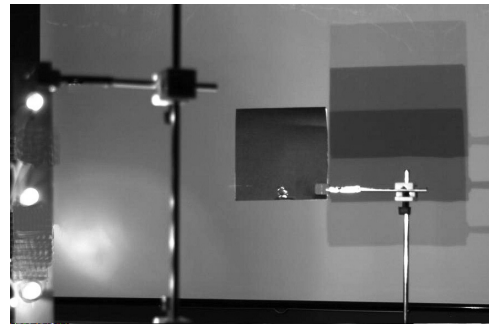
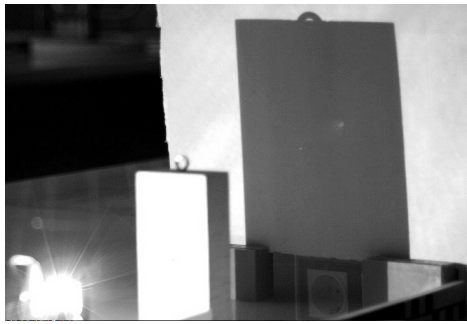


c) fuente extensa considerada como infinitos puntos luminosos



Tal y como está dispuesto el esquema, en la zona de la pantalla donde se solapan todas las áreas de sombra producidas por cada punto, la sombra será total y, en el resto, se formará un área de penumbra con mayor o menor grado de oscuridad ya que en esa área hay zonas que son sombra para algunos puntos de la fuente y no para otros. Para conocer la forma de determinar con precisión la intensidad luminosa de cada zona de la pantalla se puede consultar un reciente trabajo de Mihás y Andreadis (2005). No obstante, para este nivel de enseñanza, el profesor puede realizar experiencias para confirmar las predicciones con diferentes grupos de pequeñas lámparas (pueden usarse las bombillas enlazadas de los adornos navideños) y con tubos fluorescentes de unos 20 cm existentes en el mercado.

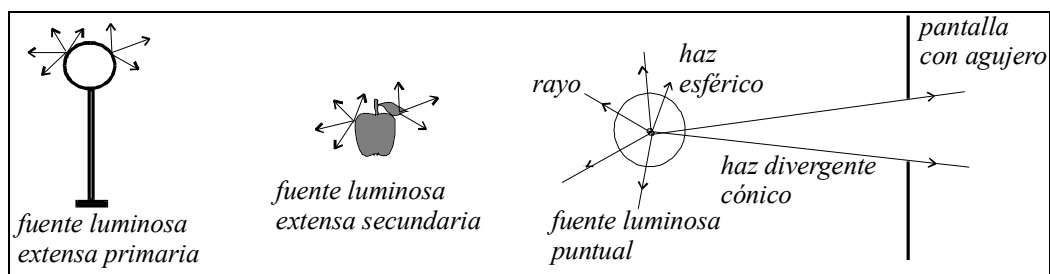
Fotografías de estas experiencias, que confirman las predicciones de los trazados gráficos anteriores, se muestran a continuación.



La A.13 tiene la misma intención que la A.11, ahora con una fuente extensa. Hemos probado en el capítulo 5 que los modelos de visión alternativos en este campo son persistentes y sobreviven a la enseñanza habitual, por lo que deberemos proponer actividades donde tengan ocasiones reiteradas de reflexionar sobre esas formas comunes de pensar para acabar aceptando el modelo de visión por recepción de luz en el ojo. Es posible que algunos alumnos todavía cometan errores y piensen que desde los agujeros extremos se ve penumbra en vez de parte de la fuente o que respondan que desde el agujero central se ve sombra, como si de un objeto oscuro se tratara, cuando desde él, con las distancias y tamaños del esquema, no se ve nada ya que no incide en el ojo ningún haz de luz desde ningún punto de la fuente. Sería conveniente, aquí

también, que se respondiera de forma individual y después se pusiera en común en grupo, lo que ayudaría a reflexionar sobre sus errores.

El profesor podrá concluir que, a partir de ahora, la representación de la luz emitida desde cada punto será la que Galili y Hazan (2000a) denominan modelo de "cactus" que aparece en el esquema de abajo. Y que dado que los rayos dibujados no tienen entidad real, ni representan ninguna parte de la luz que emite la fuente, tiene más sentido físico el concepto de **haz de luz**. Una fuente puntual emite un haz esférico de luz, pero la parte que pasa por un orificio en una pantalla será un haz cónico divergente. En este haz cónico divergente de luz, los rayos trazados sólo representan los límites del haz de luz.



Otra consecuencia de la hipótesis de propagación de la luz sobre la que hay que reflexionar es si su propagación es instantánea o la luz es una entidad que viaja a través del espacio con una rapidez muy grande aunque no infinita.

Galileo, en 1638, diseñó una experiencia basada en determinar el tiempo que tarda la luz que emite una hoguera en recorrer la distancia que separa dos colinas alejadas, pero visibles. Ni los relojes existentes en esa época, ni los aparatos de detección, eran tan precisos como para medir el tiempo que invierte la luz en recorrer distancias de ese orden. Cuando no se disponen de estos medios técnicos, es necesario recurrir a fenómenos en los que la luz recorra grandes distancias, como las que separan a los planetas. La primera determinación de la velocidad de la luz en el vacío es debida a Roëmer (1676) y se basó en la observación de los eclipses de los satélites de Júpiter. Actualmente se puede determinar, de forma directa, la velocidad de propagación de la luz en el vacío gracias a un espejo que los astronautas de una de las misiones Apolo situaron en la superficie lunar. Se realizan experiencias con luz láser en las que se mide el tiempo que tarda un pulso de luz emitido desde la Tierra en regresar, después de haberse reflejado en el espejo situado en la Luna. Estas experiencias son

tan precisas que han permitido conocer que, actualmente, la Luna se está alejando de la Tierra a razón de 3'5 cm cada año.

A.14 Un pulso de luz láser es emitido desde la Tierra en dirección al espejo situado en la superficie lunar, después de 2'56 segundos se detecta en la Tierra la luz reflejada en él. Sabiendo que la distancia de la Tierra a la Luna es de 384.000 km, determinad la velocidad de la luz en el vacío.

A.15 En una galaxia tan lejana que no se puede ver a simple vista colapsó una estrella y se formó una supernova que emitió una luz tan intensa que, mil años después, dicha supernova, pudo ser observada desde la Tierra durante varios días ¿dónde se encontraba la luz emitida durante los mil años que tardó en ser vista la supernova desde la Tierra? ¿a qué distancia ocurrió ese fenómeno?

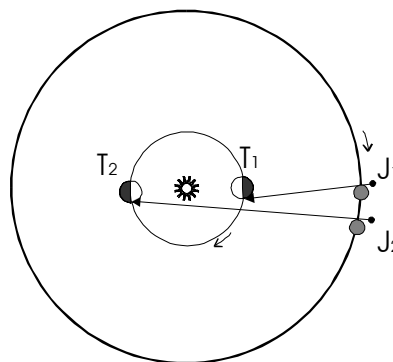
Comentarios A.14 y A.15: Se trata de actividades sencillas para determinar la velocidad de propagación de la luz en el vacío y para reflexionar sobre alguna consecuencia de ese valor tan elevado. En primer lugar, a efectos de la visión de los objetos ordinarios un valor tan elevado de la velocidad de la luz es equivalente a que su propagación sea prácticamente instantánea, pero deja de ser así cuando consideramos la visión de las estrellas o de las galaxias. En segundo lugar, aunque al llegar aquí ya se ha tenido oportunidad de tratar la representación de la luz, es conveniente recordar que la investigación didáctica, y nuestro propio estudio, ha puesto de manifiesto que los alumnos creen que únicamente hay luz en las fuentes o en sus proximidades, por lo que considerar que la luz puede viajar en el espacio cuando la fuente ha desaparecido y, todavía no ha llegado a nosotros para poder ver el fenómeno, introduce una reflexión sobre su consideración de entidad física separada de las fuentes y del ojo y que tiene existencia independiente en el espacio, lo que hace que pueda ser objeto de estudio en sí misma por parte de la Física. Si el profesor lo considera conveniente puede sugerirles la lectura del documento que se acompaña a continuación sobre el método usado por Roëmer para la determinación de la luz. La actividad A.16 es de simple manejo de los trazados de rayos aprendidos y se puede relacionar con aprendizajes básicos de astronomía.

Método de Roëmer para determinar la velocidad de propagación de la luz en el vacío.

La órbita del planeta Júpiter alrededor del Sol está situada a una distancia unas cinco veces mayor que la del planeta Tierra y con un período de poco menos de 12 años. Según estos datos la Tierra se encuentra, en algunos momentos, más cercana a Júpiter que en otros.

Con un telescopio de aficionado se pueden distinguir cuatro puntos brillantes en las proximidades del planeta que se ocultan detrás de él cada cierto tiempo. La condición de satélites es debida a Galileo quien avanzó que se trataba de “lunas” con giro alrededor del planeta. Se conocen con los nombres de Io, Europa, Ganímedes y Calisto y, aunque actualmente se conocen otros dieciséis satélites, éstos son los de mayor tamaño.

Cuando la Tierra está situada en su posición más próxima a Júpiter (T_1 y J_1), los eclipses de Ganímedes se suceden con cada 7'155 días (7 días, 3 h, 43 min. y 12 s). Después de 25 eclipses han transcurrido 178'875 días (casi, medio año), por lo que la Tierra se encuentra, aproximadamente, en la posición opuesta de su órbita, T_2 , mientras que Júpiter, que apenas se ha desplazado 15° , se encuentra en J_2 .



Si el eclipse observado cuando los planetas estaban en T_1 y J_1 se produce el día 1 a las 0 h, el eclipse número 25 de ese satélite se produciría 178'875 días después, cuando los planetas se encuentren en T_2 y J_2 . Sin embargo, desde la Tierra en esta posición, se observa un retraso de 16'6 minutos, es decir el eclipse que debía producirse a las 21 horas del día 178, ocurre, en realidad a las 21 h y 16'6 min. del día 178. ¿A qué podría ser debido ese retraso?

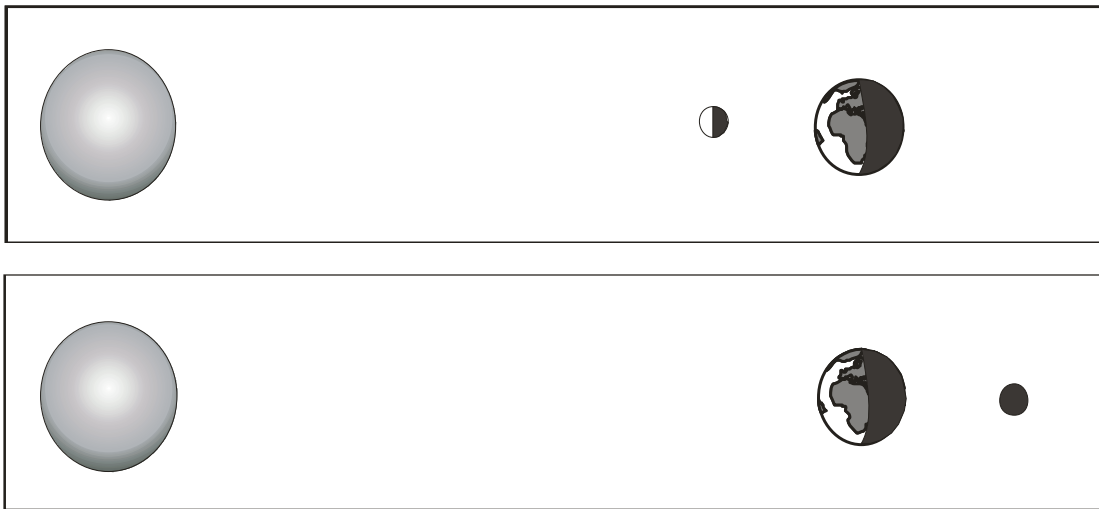
Roemer interpretó este retraso argumentando que la luz no se propaga instantáneamente y, por tanto, cuando se observa el eclipse desde T_1 el fenómeno se percibe con un retraso Δt y cuando se observa desde T_2 el retraso, $\Delta t'$, será tanto mayor cuanto mayor sea la separación entre los planetas. La distancia mayor, en este segundo caso, recorrida por la luz es aproximadamente el diámetro de la órbita terrestre, es decir, unos 300 millones de km ($3 \cdot 10^8$ km) y dado que desde T_2 el eclipse se observa 16'6 min. (1000 s) más tarde que desde T_1 , la velocidad de la luz se puede calcular:

$$c \cong \frac{3 \cdot 10^8 \text{ km}}{1000 \text{ s}} = 300.000 \frac{\text{Km}}{\text{s}}$$

En tiempos de Roëmer el valor del diámetro de la órbita de la Tierra era considerado algo menor que el actual, por lo que se obtuvo un valor para la velocidad de propagación de la luz en el vacío de unos 220.000 km/s que aunque es un valor aproximado dio una idea de su magnitud. Sin embargo, el resultado no fue aceptado por la comunidad científica hasta que cincuenta años después, Bradley, interpretó otros fenómenos astronómicos bajo el supuesto de la no propagación instantánea de la luz.

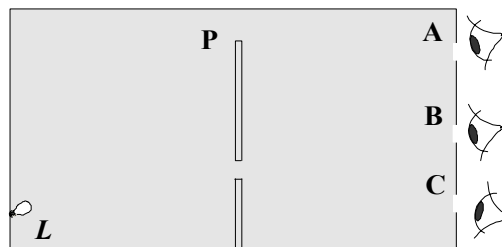
Podemos poner a prueba lo que hemos aprendido en los trazados gráficos anteriores al enfrentarnos con la explicación de fenómenos naturales que, como los eclipses de Sol y de Luna, han llamado poderosamente la atención a las personas de diferentes culturas desde la antigüedad.

A.16 En los esquemas siguientes se representan el Sol, la Tierra y la Luna en dos posiciones relativas distintas en el mismo plano. Realizad trazados de rayos para explicar los eclipses de Sol y de Luna, señalando las zonas de la Tierra donde se verán eclipses parciales de Sol.



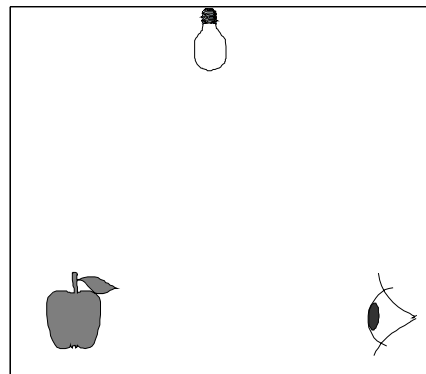
Autoevaluación 1. *En una caja de paredes negras se instala una pantalla negra con un orificio y una pequeña lámpara, que podemos considerar puntual, como se indica en el esquema:*

- A) *¿Qué podremos ver al mirar por los orificios exteriores antes de conectar la lámpara (L)?*
- B) *Una vez conectada, ¿qué se podrá ver al mirar por los orificios A, B y C hacia el orificio de la pantalla P?*



A.17 A modo de recapitulación de lo tratado hasta aquí, explica cómo vemos un objeto situado en una habitación iluminada. Para ello:

- a) Dibuja un diagrama de rayos en el cuadro del margen.*
- b) Enuncia las hipótesis que hemos formulado para elaborar el modelo de visión referidas a las fuentes luminosas, a la propagación de la luz y al papel del ojo, etc.*
- c) Da argumentos justificativos que apoyen esas hipótesis.*
- d) Plantea los nuevos interrogantes que vamos a abordar a continuación.*

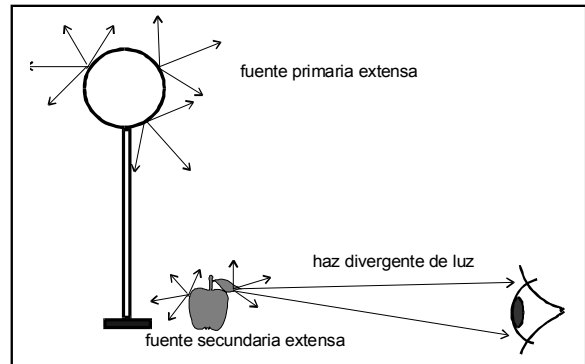


Comentarios de Autoevaluación y A.17: Estas dos actividades forman parte del sistema de evaluación del tema. En la primera, que es similar a otras dos anteriores, intentamos que los alumnos se hagan conscientes de los aspectos más relevantes del modelo de visión tratado hasta ahora: *La visión se produce por recepción de luz en el ojo procedente de las fuentes luminosas (primarias o secundarias). La luz se propaga en líneas rectas en todas las direcciones desde cada punto de la fuente y no es visible en sí misma.* Una vez completadas las respuestas, cada alumno podrá corregirse si se construye este dispositivo con una simple caja de cartón que habremos preparado tal y como se señala en el esquema.

La A.17, de recapitulación de lo tratado hasta aquí, será realizada individualmente por los alumnos y recogida para su corrección. Dado que cada alumno puede tener carencias diferentes, el profesor podrá aportarles "la recapitulación del profesor" donde pueden valorar sus avances, carencias o errores. A continuación acompañamos esta recapitulación.

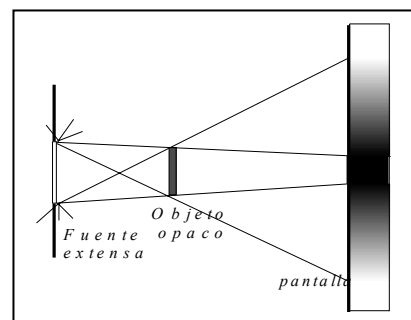
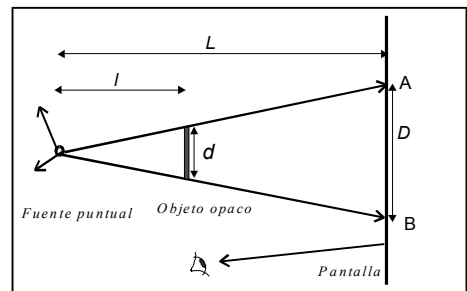
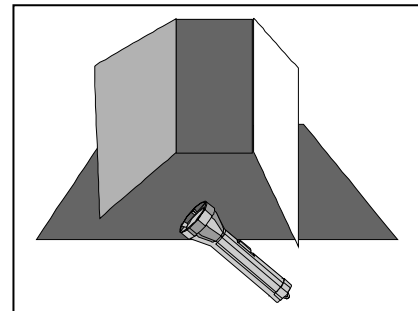
Recapitulación de las ideas sobre cómo vemos antes de estudiar el ojo humano

Para explicar cómo vemos un objeto en una habitación iluminada hemos debido suponer que la luz procedente del objeto debe llegar hasta el ojo. El ojo es, pues un receptor de haces divergentes de luz procedentes de cada punto del objeto que es considerado como una fuente luminosa secundaria. El esquema del margen representa cómo vemos un objeto en una habitación iluminada



Para elaborar este modelo hemos formulado las siguientes hipótesis:

1. Los objetos iluminados son fuentes secundarias de luz. Esta hipótesis está basada en el hecho de ver con el mismo tono de color una pantalla situada enfrente de una cartulina de color iluminada directamente.
2. Para ver los objetos el ojo no emite nada. Ya que, si así fuera, sería posible ver en la oscuridad total, lo cual sabemos que no ocurre.
3. La luz se propaga en línea recta y en todas las direcciones desde cada fuente puntual. Esta hipótesis esta basada en la observación de las sombras que se forman en una pantalla cuando se interpone un cuerpo opaco entre la fuente y la pantalla. La sombra es de la misma forma del objeto y del tamaño que cabe esperar si la luz se propagara en línea recta.
4. Si el objeto que vemos es extenso podemos considerarlo como un conjunto de fuentes puntuales. Esta hipótesis fue realizada para explicar la formación de sombras y penumbras que se forman en una pantalla cuando se interpone un objeto opaco entre la fuente y una pantalla.



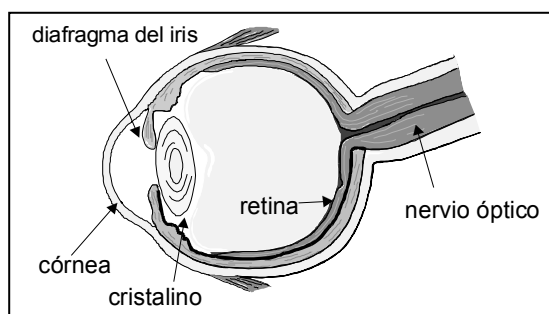
5. Para poder ver, al ojo le llega un haz divergente de luz procedente de cada punto del objeto. El rayo de luz no es nada de la propia luz ya que sólo señala una de las direcciones de propagación de la luz.
6. La luz viaja en el vacío a una velocidad de 300.000 km/s. Esta velocidad es tan grande que, en los fenómenos habituales de visión, no somos capaces de detectar ningún tiempo entre la salida de la luz desde el objeto y su llegada al ojo para ser visto.

Para profundizar en el modelo de visión de los objetos y explicar qué es necesario para ver bien, ahora, deberemos plantearnos: ¿qué “hace” la luz en el ojo para poder ver los objetos y distinguir su forma y su tamaño?, es decir, ¿cómo funciona el ojo humano?

1.2 ¿Cómo funciona el ojo humano?

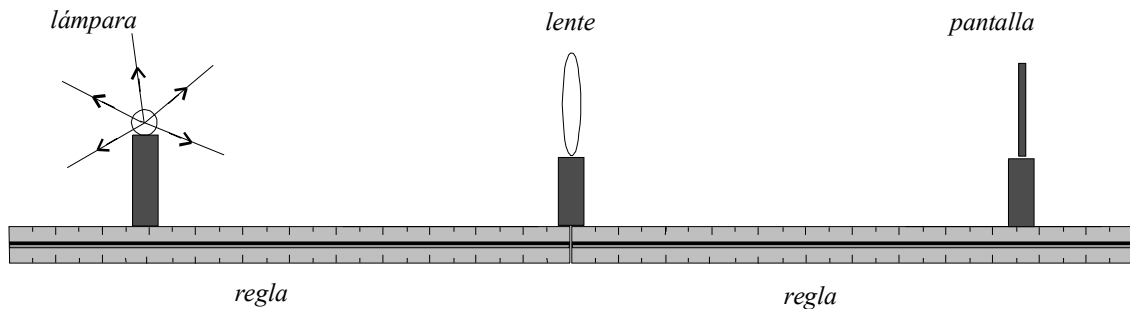
En nuestro objetivo de elaborar un modelo de visión que explique cómo vemos los objetos hemos debido ampliar la consideración de fuentes luminosas a los objetos iluminados. Además, hemos debido idealizar las fuentes luminosas extensas como conjuntos de puntos que emiten luz en todas las direcciones, hemos concebido la luz como una entidad física que viaja en el espacio a 300.000 km/s y que la luz misma no es visible. Para acabar de completar el modelo de visión debemos abordar otras preguntas que ya planteamos en el índice, estas son: ¿qué “hace” el ojo con la luz que le llega para poder ver bien?, o lo que es lo mismo ¿cómo funciona el ojo humano?

A.18 Idead algún método que permita conocer cómo funciona el ojo humano, es decir, que permita conocer cuál es el comportamiento de la luz en su interior para explicar cómo vemos el tamaño y la forma de los objetos.



La fisiología del ojo sugiere que un sistema formado por una lente convergente (como el cristalino) y una pantalla (retina) es un buen prototipo para simular un ojo humano, por lo que vamos a explorar el funcionamiento de este sistema óptico.

A.19 Explorad el comportamiento de la lente convergente suministrada por el profesor. Para ello realizad el montaje siguiente y contestad las cuestiones.



A) Buscad la posición donde hay que situar la pantalla para que se vea la imagen de la fuente luminosa puntual. Utilizar una lente convergente delgada ($f^*=100$). Escribid resultados y observaciones.

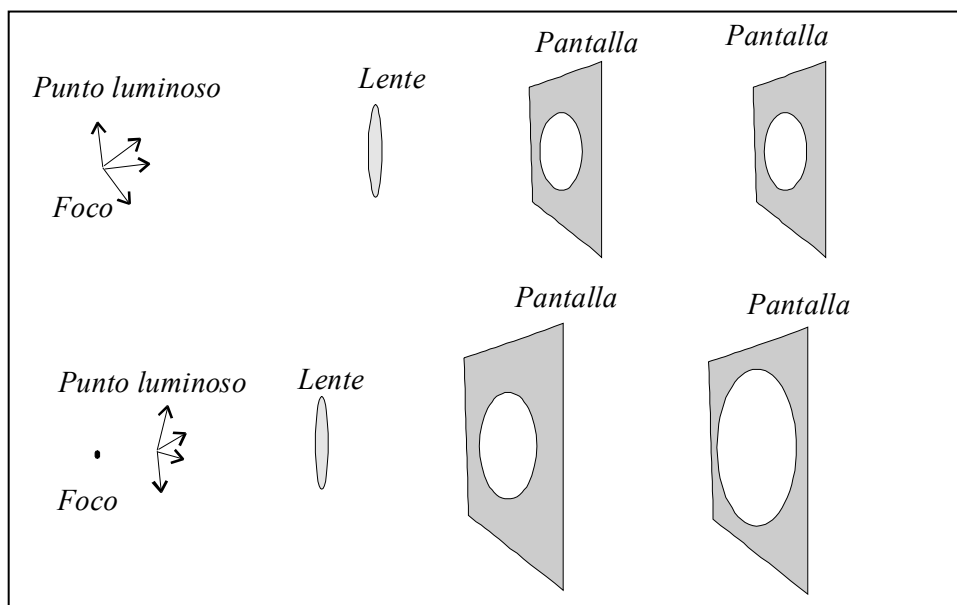
Distancia de la fuente a la lente	Distancia de la imagen a la lente
Muy lejos (3 0 4 m)	
100 cm	
50 cm	
20 cm	
10 cm	

- B) Observad el movimiento de la imagen cuando la fuente luminosa puntual se mueve hacia la derecha e izquierda y hacia arriba y abajo. Anotad las observaciones.
- C) Buscad la imagen de un objeto extenso con forma de **P** y señalar las características de la imagen que vemos en la pantalla.
- D) Dejando la pantalla fija a 10 cm de la lente y cambiando la lente convergente por otra más gruesa ($f^*=50$), encontrad la posición en la que hay que colocar el objeto para ver la imagen nítida sobre la pantalla.

Comentarios A.18 y A.19: Al estudiar la fisiología del ojo se pretende encontrar dos elementos ópticos con los cuales modelizar el funcionamiento del ojo: una lente convergente de curvatura variable (el cristalino) y una pantalla (la retina). Con estos dos elementos se puede elaborar un modelo de ojo humano con el que poder estudiar su comportamiento y, aunque es bien sabido que el elemento con más poder refractivo es la córnea, esta simplificación es una buena aproximación para el nivel de enseñanza al que está dirigido. El profesor puede describir los componentes del ojo humano a partir de láminas, maquetas existentes en los laboratorios de Biología de los centros de enseñanza o diseccionando un ojo de vaca o de cordero. Este último método permite aislar el cristalino y reconocer que su comportamiento se asemeja al de una lupa. Una vez modelizado el ojo humano como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla, la

A.19, pretende familiarizar a los estudiantes con este sistema y reconocer observacionalmente la imagen óptica de un objeto puntual. A partir de los datos obtenidos en la tabla podrán concluir que:

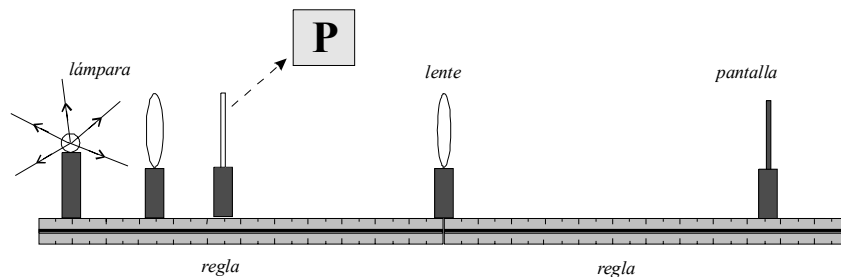
- La lente forma la imagen en la pantalla a distancias cada vez mayores conforme acercamos el objeto. Para cada posición del objeto la posición hay una única posición de la pantalla donde se ve su imagen.
- La lente tiene un límite en su capacidad de formar imágenes. Para la lente suministrada por el profesor ($f'=100$), cuando la fuente luminosa puntual se coloca a unos 10 cm de ella (en el punto focal), se observa un círculo luminoso en la pantalla del mismo diámetro que la lente en cualquier posición de la pantalla. Para distancias menores, al alejar la pantalla, el círculo luminoso se hace cada vez mayor. Para distancias del objeto a esa lente, iguales o menores de 10 cm, no será posible ver su imagen para ninguna posición de la pantalla. Se pueden puede realizar observaciones como las que muestra el esquema.



- Las imágenes de los cuerpos extensos se ven invertidas (la parte de arriba se verá abajo y la de la derecha se verá a la izquierda) por lo que la imagen de una **P** será vista como una **d**.
- Si en el sistema lente-pantalla dejamos la pantalla fija a 10 cm de la lente, en la que podemos ver la imagen del filamento de la fuente cuando se encuentra muy alejada, y cambiamos la lente por otra de mayor poder de convergencia (más gruesa en su centro), podemos comprobar que, en este caso, la imagen nítida se puede ver en la pantalla cuando el objeto está mucho más cercano a ese sistema óptico. Esta observación será de interés, ya que hemos modelizado el ojo humano como un sistema formado por una lente convergente y una pantalla y hemos observado en el primer apartado de esta actividad que, para una lente dada, la

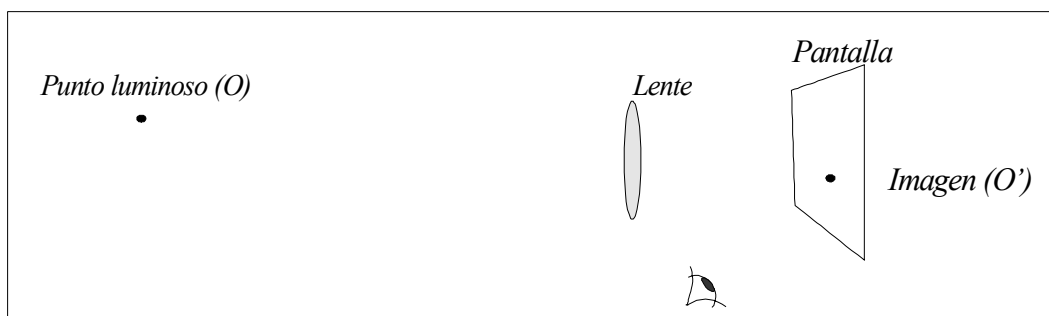
posición de la pantalla donde se ve la imagen es única para cada posición del objeto y, dado que en el ojo humano la pantalla (retina) no puede alejarse ni acercarse, para formar la imagen de objetos cercanos aumenta la curvatura del cristalino, se hace más grueso por el centro. Para cada distancia del objeto el cristalino cambia su poder de convergencia para formar la imagen en la retina, siendo mayor su grosor en el centro cuando enfoca objetos cercanos (acomodación).

Para el montaje técnico de esta experiencia se puede utilizar como fuente luminosa puntual el mismo dispositivo usado para formar sombras en A.11 y como objeto extenso el dibujo de una **P** en un papel translúcido. Cuando se trate de ver en la pantalla la imagen del objeto extenso, conviene que esté uniformemente iluminado, para ello situaremos una lente convergente, que actuará de condensadora, próxima a la fuente puntual y antes del objeto. Los detalles de este montaje se pueden ver en este el siguiente esquema.

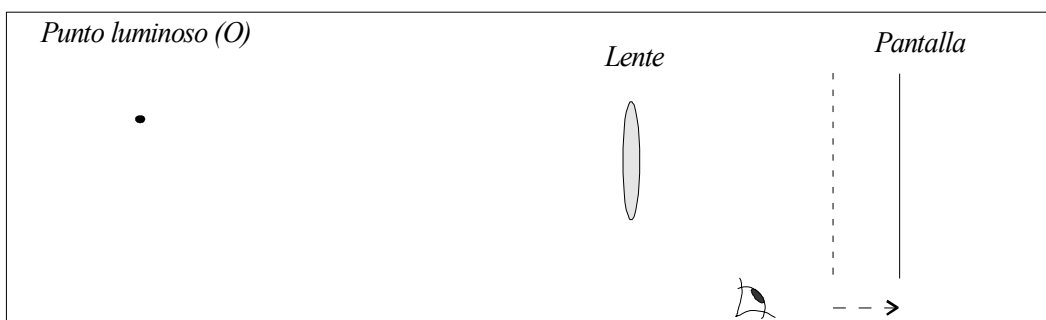
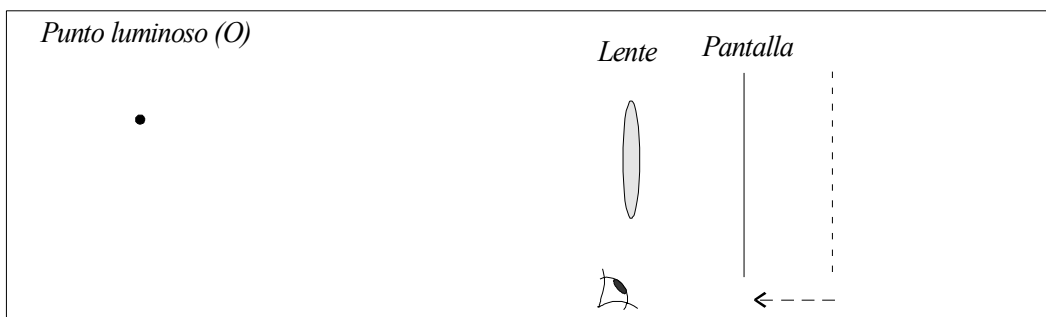
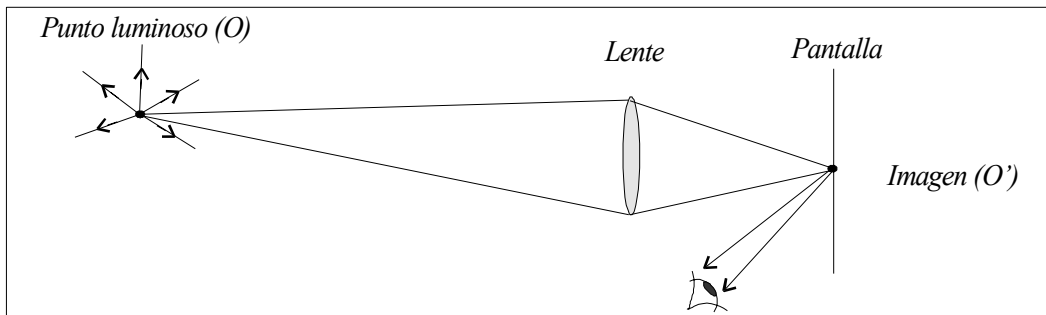


Las observaciones que hemos realizado nos han permitido aproximarnos al funcionamiento del ojo humano, pero dado que la luz, en sí misma, no es visible, debemos emitir hipótesis sobre su comportamiento cuando atraviesa la lente convergente y se forma, en algunas condiciones, una imagen óptica en la pantalla. Comenzaremos por el caso más sencillo, cuando el objeto es una fuente luminosa puntual.

A.20 Emitid hipótesis sobre cómo se comporta la luz emitida por la fuente puntual para que después de atravesar la lente forme una imagen nítida en una pantalla. Realizad un diagrama de rayos y precisar qué es una imagen óptica.



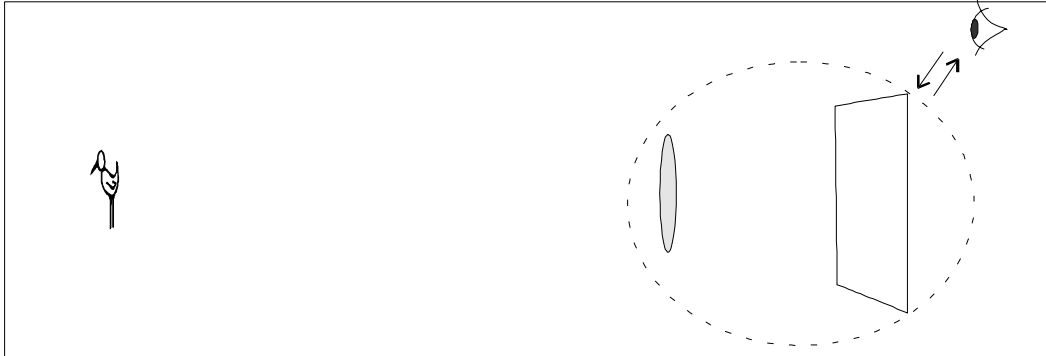
A.21 El primer esquema representa cómo se forma en una pantalla la imagen de una fuente luminosa puntual. Si mantenemos en la misma posición la fuente puntual y la lente, pero adelantamos y alejamos la pantalla, ¿qué veremos en estas situaciones? Realizad diagramas de rayos en los esquemas siguientes que expliquen vuestras predicciones.



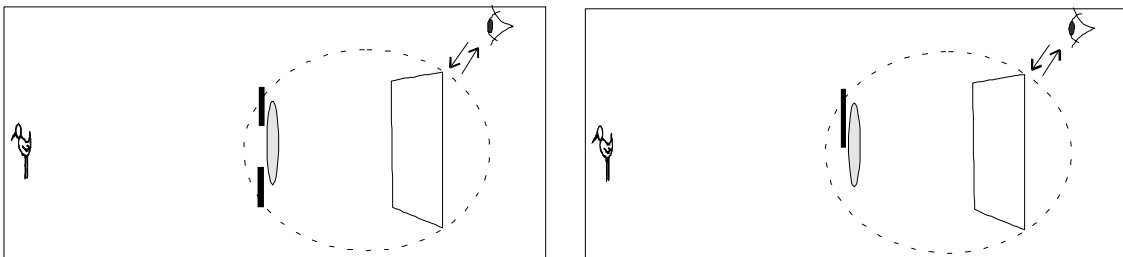
A.22 En nuestro modelo de ojo, la retina es una pantalla que se encuentra en una posición fija. Explicad, dibujando diagramas de rayos, cómo podemos ver nítidos objetos situados a diferentes distancias, es decir, cómo es posible que se forme la imagen de un objeto en la retina cuando se encuentra a distintas distancias del ojo.

Hasta ahora hemos considerado la formación de la imagen en un sistema lente-pantalla en el caso más sencillo, cuando el objeto es puntual, debemos hacer extensivo estos razonamientos a los casos habituales de objetos extensos.

A.23 Realizad un diagrama de rayos que explique la formación de imágenes extensas en un sistema lente-pantalla. Explicad con este modelo de ojo humano, cómo podemos apreciar la forma, el tamaño o la lejanía de los objetos que vemos.



A.24 El diafragma del iris regula inconscientemente (dilatando más o menos la pupila) la cantidad de luz que entra en el ojo humano ¿Cómo afecta a la imagen que se forma en una pantalla un diafragma situado delante de la lente y que tape parte de ella? Realizad diagramas explicativos con los distintos diafragmas que aparecen en los esquemas siguientes.



A.25 Diseñad y realizad experiencias para probar que los diafragmas que tapan parte de la lente no afectan a la posición, ni al tamaño de la imagen sino sólo a su luminosidad.

Comentarios A.20-A.26: Con estas actividades se formalizará el modelo de visión de Kepler y el proceso de construcción de la imagen óptica. En A.20 los estudiantes, a partir de las experiencias realizadas en A.19, podrán inferir que las lentes convergentes concentran la luz emitida por un punto en otro punto de la pantalla. Si la luz emitida por una fuente puntual era dibujada como haz divergente, después de atravesar la lente debe convertirse en convergente para formar la imagen. En ese esquema es necesario advertirles que deben trazar un haz divergente de luz procedente del punto O' hasta el ojo, ya que el ojo ve esa imagen porque se comporta como ese mismo sistema óptico.

De los trazados gráficos requeridos en A.21 pretendemos que los estudiantes comprendan que la imagen óptica sólo se forma para una única posición de la pantalla, lo que con posterioridad será utilizado para comprender las causas de las anomalías visuales como la miopía e hipermetropía.

En A.22 se requiere comparar los trazados gráficos de formación de la imagen en un sistema lente-pantalla de distancia dada cuando la lente es poco convergente (cuyo centro es delgado) y cuando la lente es más convergente (cuyo centro es más grueso). En el primer caso el objeto estará alejado y en el segundo más cerca.. En estos trazados se simulará el funcionamiento de acomodación del ojo ya que el cristalino es una lente convergente de curvatura variable por lo que se puede formar la imagen en la retina para varias distancias del objeto. Deberá recordarse que estas representaciones son la explicación de las observaciones realizadas en el apartado D) de la A.19.

A partir de A.23, los esquemas del sistema lente-pantalla están envueltos en un círculo de puntos para representar que se trata de la modelización realizada para el ojo humano. Para formar la imagen de un objeto extenso se deberá ayudar a los alumnos recordándoles la idealización que hicimos en A.12 en la que, para explicar la formación sombras y penumbras con una fuente extensa, debimos idealizarla como un conjunto de fuentes puntuales. Así pues, la imagen de un punto del extremo superior del objeto se formará en la parte inferior de la pantalla (como observamos en el apartado C de la A.19) y la de un punto del extremo inferior del objeto en la parte superior de la pantalla. Dado que el sistema óptico lente-pantalla con que hemos modelizado el ojo humano forma la imagen invertida y, sin embargo, no lo vemos así, es necesario introducir que la sensación de la visión se elabora, en último término, en el cerebro, conectado mediante el nervio óptico a la retina del ojo.

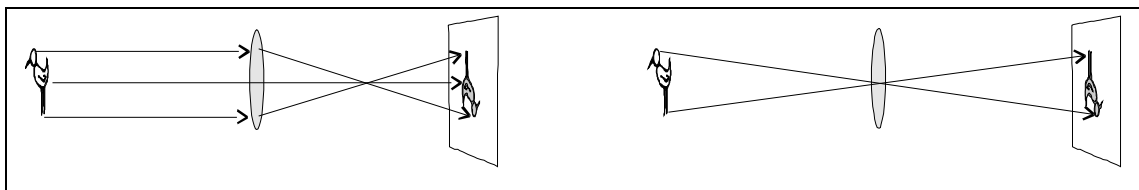
Por otro lado es necesario advertir que la imagen óptica que dibujamos en la pantalla del sistema óptico para representar lo que el ojo ve en ella no es una especie de objeto tenue pegado en ella, sino que se trata de una distribución puntos donde se concentran la luz emitida por el objeto después de atravesar la lente y, por tanto, esa imagen únicamente tiene sentido por la existencia del ojo de observador. Si éste cerrara los ojos, en la pantalla, no podríamos representar la imagen de ningún objeto; allí sólo existen, en los diferentes puntos, concentraciones de diferentes tipos de luz con diferentes intensidades

Para este nivel de enseñanza, dado que lo realmente importante es el fundamento de la imagen óptica que explica cómo vemos, no es necesario introducir las características de los trazados gráficos para localizar la posición de la imagen ni su

tamaño. En todo caso, dado que en este curso se conoce la posición de la pantalla donde se ve la imagen, para determinar gráficamente su tamaño se les puede dar la siguiente información adicional: experimentalmente se comprueba que hay una línea imaginaria que une cualquier punto del objeto con su punto imagen que pasa por el centro de la lente.

Al formalizar la construcción gráfica de la imagen óptica a partir de haces divergentes de luz emitidos por cada punto del objeto, la resolución de la A.24 se hace evidente con tal de trazar haces más estrechos en función del diafragma situado delante de la lente. Experimentalmente es fácilmente observable que el único cambio en la imagen cuando se tapa, por ejemplo, media lente es una menor luminosidad, sin afectar el tamaño de la imagen ni la posición de la pantalla donde se localiza. De hecho, el iris del ojo es un simple diafragma que regula la cantidad de luz que entra en el ojo.

Autoevaluación 2. Con frecuencia, para explicar la imagen formada por una lente convergente y que se ve en una pantalla, se realizan trazados de rayos incorrectos como los siguientes:



Con el modelo de visión y el concepto de imagen óptica que hemos elaborado, explicad por qué no pueden ser considerados correctos. En concreto analizad por qué esos diagramas no explican:

- que la imagen óptica se forme en una única posición
- que el tamaño de la imagen que se ve no dependa de que exista un diafragma que pueda tapar parte de la lente.

A.26 Realizad una recapitulación de tema que estamos estudiando en donde se recoja:

- ¿qué problema hemos planteado?
- ¿qué estrategia hemos seguido?
- ¿cómo explicamos la visión directa de los objetos?
- ¿qué hipótesis hemos realizado respecto a las fuentes luminosas, al comportamiento de la luz y al comportamiento del ojo?
- ¿qué problemas vamos a abordar como consecuencia del modelo de visión directa elaborado?

Comentarios autoevaluación y A.26: En la actividad de autoevaluación, los alumnos tienen oportunidad de enfrentarse a los trazados gráficos de la imagen

óptica que, posiblemente, harían ellos antes de la enseñanza que aquí venimos desarrollando. Al tener ocasión de analizar las carencias de estos esquemas, se está profundizando en la coherencia del concepto de la imagen óptica según el modelo de visión de Kepler. Recordemos que estos son los esquemas mayoritarios encontrados por la investigación didáctica (Galili y Hazan 2000a) y por nosotros mismos en alumnos antes y después de la enseñanza habitual de la óptica geométrica.

Al llegar a este punto del tema se ha completado el modelo de visión de Kepler y los alumnos pueden someterlo a pruebas tratando de explicar cómo vemos los objetos al mirarlos directamente. Es conveniente recapitular lo avanzado hasta aquí resaltando y justificando los aspectos más importantes del modelo de visión elaborado, así como los problemas que quedan por resolver (Osborne et al., 2003; Bartholomew et al., 2004). De la misma forma que actuamos en la recapitulación solicitada en A.17, recogeremos sus trabajos y ofreceremos “la recapitulación del profesor” donde los estudiantes tendrán ocasión de revisar sus avances, carencias y errores.

Recapitulación de las principales ideas sobre cómo vemos

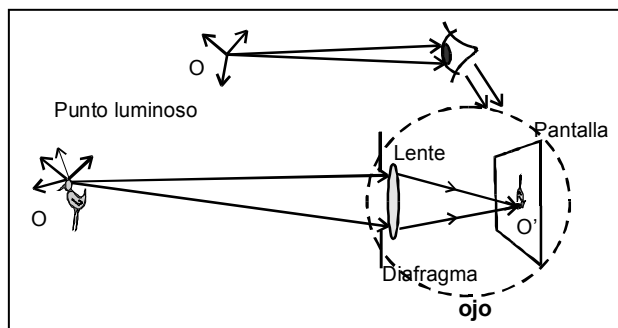
Con el trabajo realizado hasta aquí hemos intentado elaborar un modelo de visión que explique **cómo vemos** los objetos al mirarlos directamente. Para abordar este problema, la estrategia seguida ha consistido en:

- 1º Analizar las relaciones y el comportamiento del objeto que vemos, la luz y el ojo del observador.
- 2º Una vez que hemos clarificado estas relaciones, hemos abordado qué hace el ojo con la luz que le llega para explicar cómo vemos.

Históricamente, el modelo de visión que hemos construido, fue publicado por el científico y astrónomo Johannes Kepler en 1604.

En su trabajo, Kepler, se encargó de argumentar en contra de ideas antiguas, existentes desde 2000 años antes y que hasta entonces no fueron cuestionadas. Esencialmente, las ideas novedosas que introdujo y las características del modelo de visión de Kepler son las siguientes:

- Los objetos que vemos son fuentes secundarias de luz.



- Las fuentes luminosas extensas se pueden considerar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.
- Desde cada fuente puntual se emite un haz esférico de luz. Los rayos (líneas rectas para representar la luz) no son nada de la propia luz, sólo indican los límites del haz de luz que se considere.
- La luz es una entidad física que se propaga en el espacio a 300.000 km/s, independiente de las fuentes y del observador y, por tanto, puede ser objeto de estudio por parte de la Física.
- El ojo humano funciona como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.
- Para ver bien, es necesario formar una imagen en la retina. La imagen se forma de la siguiente manera: cada haz divergente de luz emitido por cada punto del objeto, después de entrar en el ojo, converge hasta un punto de la retina. Como en cada punto de la imagen se concentra parte de la luz emitida por cada punto del objeto, la forma y tamaño de la imagen que percibimos es una réplica a escala del tamaño y forma del objeto que vemos.
- Para ver bien los objetos cercanos, la lente del cristalino aumenta su curvatura (acomodación) con lo que los haces de luz acaban convergiendo y formando la imagen en esa misma pantalla (la retina).

El modelo de visión de Kepler que hemos reelaborado explica la visión directa de los objetos, aunque no profundiza en cómo se elabora la sensación en el cerebro ya que, por ejemplo, no sabemos por qué se perciben los objetos derechos y no invertidos como la imagen formada en la pantalla de la retina. Además, para completar el modelo de visión y aumentar su validez, deberemos mostrar si, con él, podemos explicar, también, la visión indirecta (cuando miramos a un espejo, a un objeto sumergido, cuando miramos a través de las lentes,...) e incluso si podemos comprender por qué se producen y cómo se corrigen las anomalías visuales y algunas otras aplicaciones tecnológicas.

2. PUESTA A PRUEBA DEL MODELO DE VISIÓN EN SITUACIONES DE VISIÓN INDIRECTA.

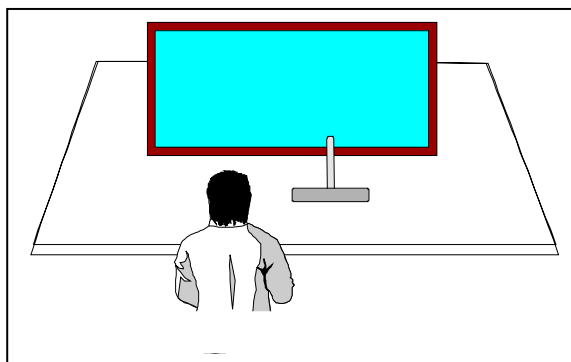
El modelo de visión de Kepler, en el que el ojo es modelizado como un sistema óptico formado por una lente y una pantalla, ha permitido explicar cómo vemos los objetos directamente. Este modelo supone que la retina es una pantalla donde se forma una representación del objeto, llamada imagen óptica, con la que se percibe la forma y el tamaño de los objetos que vemos. Para que se forme esta imagen, un haz divergente de luz emitido desde cada punto del objeto debe entrar en el ojo y, después, converger en cada punto de la imagen óptica formada en la retina. La coherencia y validez de este modelo se verá aumentada si, con él, somos capaces de explicar la visión indirecta de los objetos, es decir, al ponerlo a prueba para explicar cómo vemos al mirar a un espejo, al mirar a los objetos sumergidos en agua, al mirarlos a través de lentes, etc.

2.1 ¿Cómo vemos al mirar a un espejo plano?

Desde antiguo, los filósofos emitieron hipótesis sobre cómo podemos ver indirectamente los objetos al mirar a un espejo plano. Con el modelo de visión que hemos elaborado deberemos poder enfrentarnos a estas situaciones, pero antes deberemos conocer con detalle las características de esta visión indirecta.

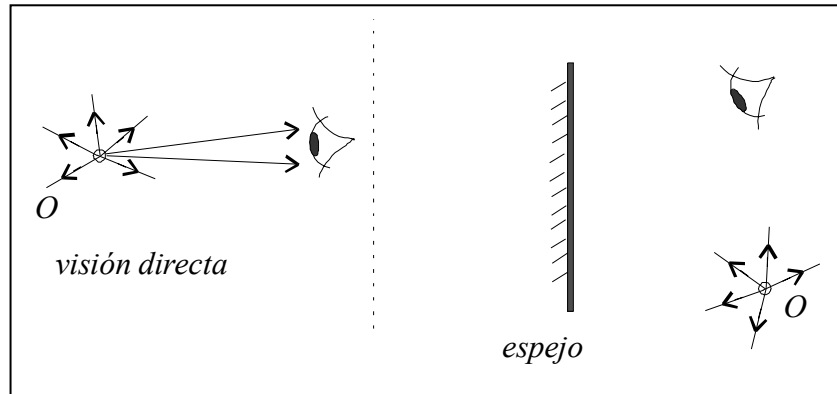
A.27 Explorad la visión de los objetos al mirar a un espejo plano. Utilizad, para ello, un espejo plano que dejaremos fijo en la mesa y un pequeño objeto que podremos situar en distintas posiciones. Anotad los resultados de las observaciones siguientes:

- ¿Dónde parece estar el objeto cuando lo miramos a través del espejo?*
- Situando el objeto enfrente del espejo, ¿desde qué posiciones es visible? Haced un esquema donde se representen estas posiciones.*
- ¿Varía el tamaño al mirar al objeto a través del espejo?*
- ¿Varía la posición de lo que vemos al variar nuestra posición?*



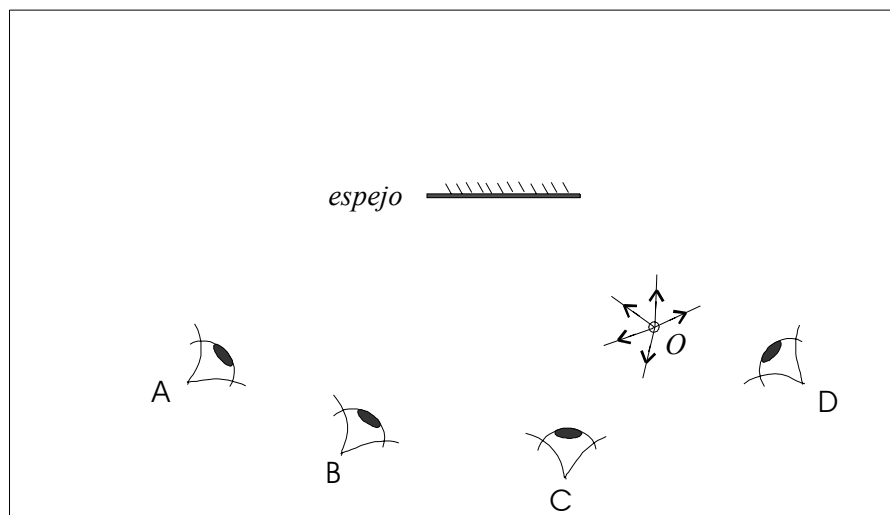
A.28 De acuerdo con el modelo de visión que hemos elaborado, vemos un objeto cuando un haz divergente de luz procedente de cada punto del mismo entra en el ojo y éste forma una imagen en la retina. Coherentemente con esto, formulad una hipótesis que explique cómo vemos un objeto puntual, *O*, al mirar a un espejo plano que explique:

- ¿Cómo llega la luz procedente del objeto hasta el ojo si está mirando al espejo?
 - ¿Por qué parece que veamos el objeto como si estuviera situado detrás del espejo?
- Completad el diagrama de visión al mirar al espejo a partir de la hipótesis.



A.29 A partir de la hipótesis formulada en la actividad anterior para explicar la visión en el espejo plano, realizad un trazado gráfico preciso para explicar que la imagen esté situada a la misma distancia del espejo que el objeto.

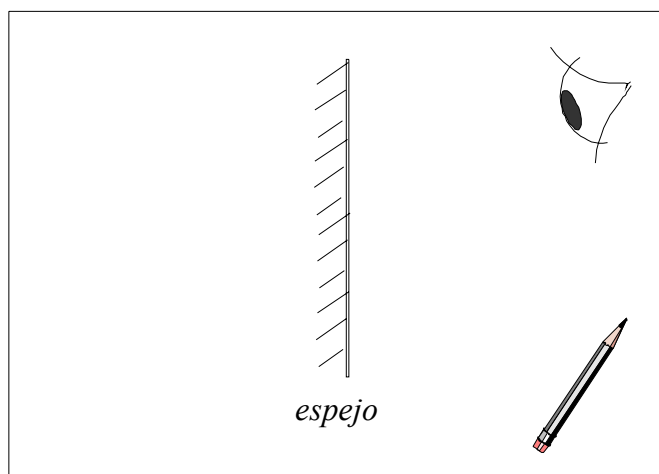
A.30 En el esquema siguiente se representa un espejo plano, un objeto puntual (*O*) y un observador en varias posiciones. Dado que la posición de la imagen que se ve, no depende de la posición del observador, completad un diagrama de rayos para interpretar desde qué posiciones del observador se podrá ver la imagen al mirar al espejo.



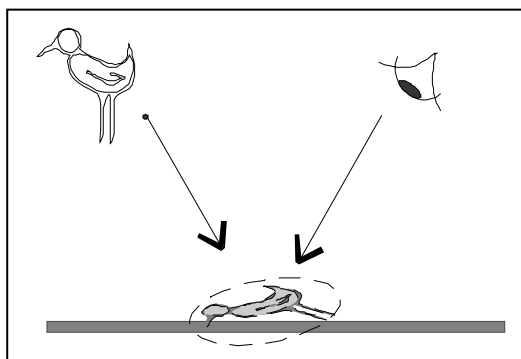
Del trazado gráfico realizado para localizar la imagen que vemos al mirar al espejo, si está hecho con precisión, se deduce que la distancia de la imagen, O' , al espejo, es igual a la distancia del objeto, O , al espejo. Podemos utilizar esta consecuencia del trazado gráfico, que parece coincidir con nuestras primeras observaciones, para realizar una contrastación experimental de la hipótesis de la reflexión de la luz que explica cómo vemos al mirar a un espejo.

A.31 Diseñad una experiencia sencilla y realizable en el aula para confirmar que la imagen que se ve al mirar a un espejo plano está situada a la misma distancia de él que el objeto. Proceded a su realización describiendo el dispositivo utilizado y el procedimiento seguido

A.32 Realizad un diagrama de rayos para explicar cómo vemos un objeto extenso al mirar a un espejo plano.



Autoevaluación 3. Para explicar cómo vemos los objetos al mirar a un espejo, muchas personas que no han estudiado óptica, opinan que una imagen del objeto llega hasta el espejo y se queda allí, pegada, y por eso la vemos. Con lo que habéis estudiado en clase dad argumentos en contra de esta idea y corregid los errores de su trazado.

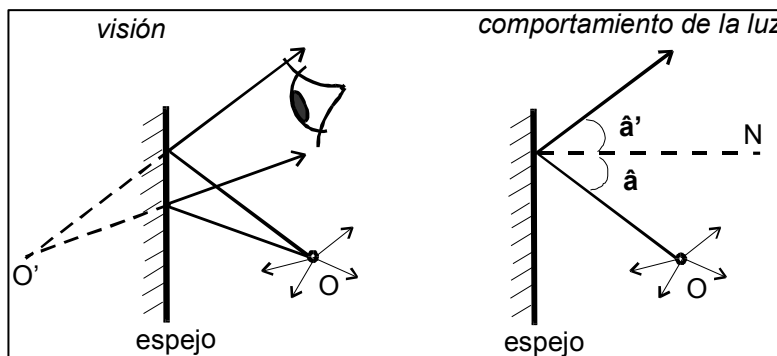


Comentarios a las actividades del apartado 2.1 (De A.27 a Autoevaluación 3): La secuencia de actividades que proponemos tiene los siguientes objetivos: en A.27 familiarizamos a los estudiantes con algunas observaciones de interés al mirar a un espejo plano que no podemos suponer que se poseen, en A.28 se les sugiere la formulación de una hipótesis acerca del comportamiento de la luz que haga explicable la visión al mirar al espejo y que sea coherente con el modelo de visión elaborado hasta ese momento, en A.29 y en A.30 se pone a prueba la validez de la hipótesis al intentar explicar algunas de las observaciones realizadas inicialmente a partir de trazados gráficos precisos. En A.31 se diseña y se realiza un procedimiento experimental para contrastar alguna de las consecuencias de la hipótesis de visión indirecta. En A.32 se repiten los trazados gráficos para un objeto extenso y en la actividad de autoevaluación se hace una reflexión sobre algunas ideas alternativas.

Concretando en las actividades de este apartado, se recomienda hacer la A.27, de simple exploración del fenómeno, ya que diferentes autores (Goldberg y McDermott 1986, Galili y Hazan, 2000a) han mostrado que, después de la instrucción habitual, los estudiantes suelen pensar que la imagen se localiza en la superficie del espejo, que la posición de la imagen depende de la posición del observador, y que una imagen “ya hecha” se desplaza desde el objeto hasta el espejo donde permanece para ser vista. De nuestras investigaciones hemos podido conocer que los estudiantes pueden poseer una concepción compatible con el modelo de Kepler en visión directa y utilizar ideas alternativas para explicar la visión indirecta. Aunque no pretendemos que las observaciones sugeridas en esta actividad sean por sí solas suficientes para cambiar las ideas espontáneas citadas anteriormente, sí esperamos remarcar aquellas que han sido reconocidas como conflictivas y hacerlas explícitas a la hora de enfrentar a los alumnos a emisión de hipótesis explicativas de la visión indirecta (A.28).

Para explicar las observaciones solicitadas de forma coherente con el modelo de visión elaborado, esperamos que los estudiantes propongan que la luz “rebota”, es decir, que cada rayo del haz de luz incidente se desvía como lo haría una pelota elástica que choca con una pared. Recordemos que en A.5 los estudiantes ya tuvieron oportunidad de observar la reflexión del haz de luz de una linterna en un espejo plano, aunque en esa ocasión sólo nos interesara la diferencia entre la reflexión especular y la reflexión difusa. Ahora esperamos que sugieran que el ángulo de incidencia, $\hat{\alpha}$, y el ángulo de reflexión, $\hat{\alpha}'$ sean iguales, lo que aplicado a dos rayos cualquiera de un haz divergente incidente en el espejo, provocaría la reflexión de ese haz y que siga siendo divergente.

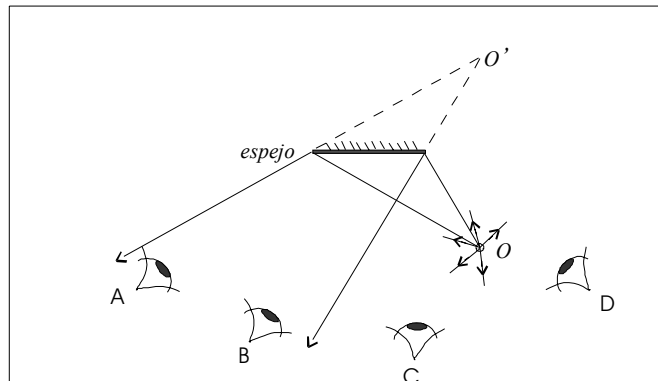
El punto O' , donde se localiza lo que se ve al mirar al espejo, se suele denominar *imagen virtual* del objeto puntual O , ya que de él parece proceder la luz que llega al ojo, pero O' no es una fuente luminosa. No obstante, sabemos que cuando vemos un objeto, sea directamente o al mirar a un espejo, la verdadera imagen es la representación del objeto que se forma en la retina del ojo.



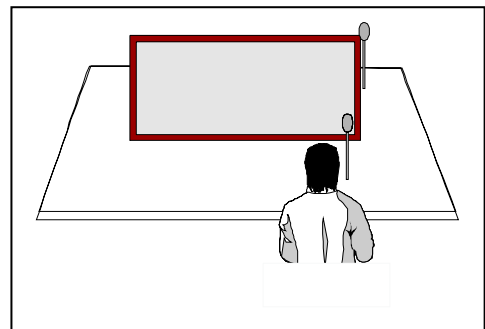
Según la secuencia de enseñanza derivada de la estructura problematizada propuesta para el tema, nuestra intención es resolver el problema de la visión indirecta, por lo que el estudio de la reflexión de la luz en los espejos planos se hace de forma subordinada al problema de la visión. Las leyes de la reflexión no se introducen, por ello, como consecuencias empíricas de determinada concepción sobre la naturaleza de la luz, sino como hipótesis lógicas que refuerzan el modelo de visión y le confieren consistencia y aplicabilidad. No es este, sin embargo, el proceso seguido en la enseñanza habitual y nuestras investigaciones, como mostraremos más adelante, así lo revelan: el 97% de una muestra de 36 profesores de Física y Química asistentes a un curso de formación en óptica geométrica, proponían un orden jerarquizado y apblemático de los tópicos de enseñanza de la óptica geométrica.

En A.30 la respuesta se puede obtener de un trazado gráfico sencillo, sin necesidad de utilizar semicírculos graduados para la medida de ángulos, aprovechando que en la actividad anterior hemos obtenido que la posición de la imagen está a la misma distancia del espejo que el objeto. Por ello, podemos, situar el punto imagen, O' , y de él trazar el haz reflejado en el espejo. Las líneas punteadas trazadas en el esquema siguiente indican que el haz de luz en esa zona no existe aunque el observador pueda interpretar que proceda del punto O' . En ese trazado gráfico se deduce que sólo a los ojos de los observadores A y B les

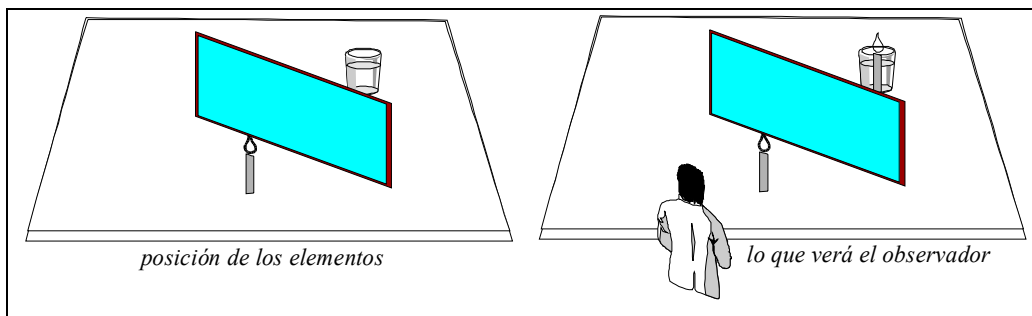
llega parte del haz de luz divergente reflejado en el espejo y son los únicos que verán la imagen. Es de destacar que la respuesta se ha obtenido de la aplicación estricta de la hipótesis de la reflexión de la luz, pero será necesario llamar la atención de los alumnos que la imagen sólo es vista por unos observadores mientras que si se localizara en la superficie del espejo, como algunos creen antes de la enseñanza, debería ser vista desde cualquier posición delante del espejo.



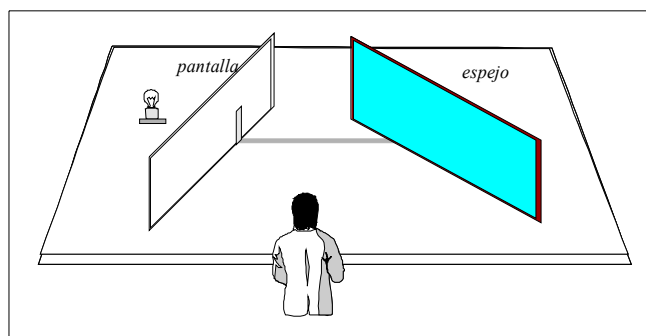
Una vez discutidos los distintos diseños experimentales propuestos en A.31, podemos sugerir la realización de las medidas tal como indica la figura. Colocamos un alfiler delante del espejo tal como indica la figura del margen, cuya cabeza tomaremos como objeto puntual, a distintas distancias de él y fijamos otro alfiler en la posición donde vemos su imagen al mirar sólo con un ojo.



Se pueden sugerir otras experiencias sencillas, pero de gran impacto en los alumnos jóvenes, para mostrar de forma cualitativa que la imagen que se ve al mirar a un espejo plano está a la misma distancia de él que el objeto. Una de ellas consiste en colocar una vela encendida delante de un trozo de vidrio transparente y detrás de él, y a la misma distancia, un vaso con agua; el observador verá la imagen de la vela dentro del vaso de agua si esas distancias son iguales, ya que el trozo de vidrio, aunque transparente y deje ver el vaso de agua, también refleja en parte la luz de la vela. La situación, esquemáticamente, es la que se muestra en la figura siguiente.

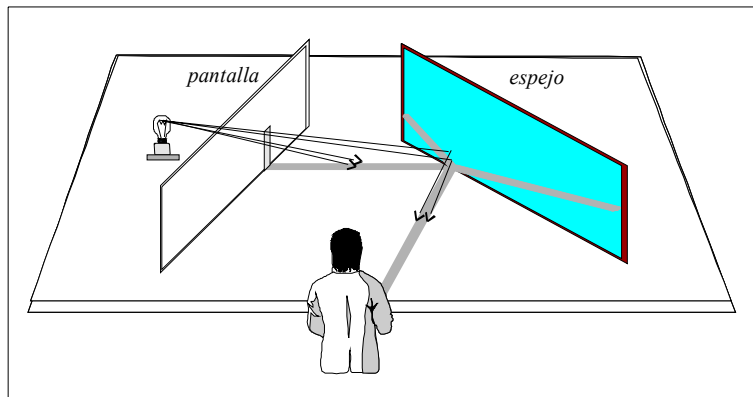


Aquí, como en las experiencias de propagación de la luz en este nivel de enseñanza, huiremos de los diseños experimentales en los que se “materializa” el rayo de luz, como cuando se ilumina una estrecha franja de la mesa o se iluminan las partículas de polvo ante un haz de luz láser, ya que pueden verse reforzadas algunas ideas espontáneas que la investigación educativa ha mostrado fuertemente arraigadas en el pensamiento de los adolescentes. Viennot et al. (2004) han llamado la atención de que, por lo general, los profesores son partidarios de este tipo de estrategias sin prever las dificultades de explicación que algunas observaciones pueden tener, por lo que reclaman la necesidad de la formación del profesorado en estos tópicos. Una de las experiencias de “rayo materializado” donde se manifiestan estas dificultades consiste en hacer pasar un estrecho haz de luz por una rendija hecha en una pantalla opaca de forma que se ilumine una estrecha franja de la mesa y que alcance en la base a un espejo plano situado como muestra el esquema siguiente.



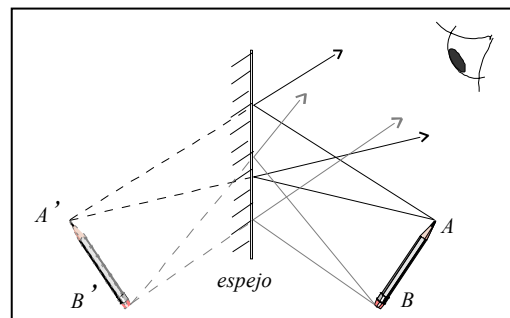
Sin embargo, lo que el observador verá de esa situación está lejos de ser elemental y puede ser objeto de confusión en estudiantes que comienzan sus estudios de óptica, como puede comprenderse de la respuesta a este tipo de situación que presentamos en el esquema siguiente y que, en general, los profesores no tienen prevista. En ella, hemos trazado algunos estrechos haces de luz que atraviesan la rendija para explicar que la primera franja iluminada en la mesa es debida a la incidencia directa de la luz que pasa por la rendija y, la segunda, es consecuencia de la luz que atraviesa la rendija, incide en el espejo donde es reflejada e ilumina esa otra zona de mesa. Cada franja iluminada de la mesa se comporta como un objeto extenso iluminado, por lo que un observador,

en esa situación, verá las dos franjas iluminadas de la mesa y sus dos imágenes virtuales.



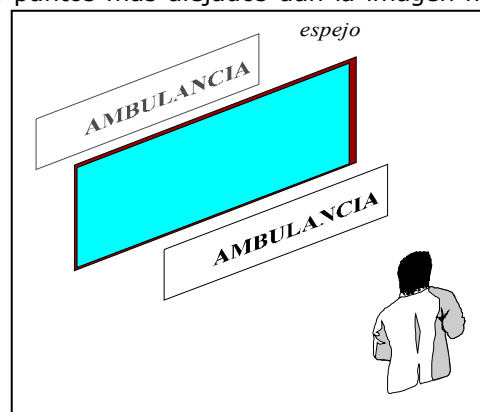
Por último la A.32, consiste en repetir el trazado de la reflexión de la luz para un par de puntos extremos del objeto, insistiendo en la hipótesis que repetidamente estamos aplicando en estos casos: considerar los objetos extensos que vemos como conjuntos de fuentes puntuales. En los trazados habituales, como el que presentamos aquí, solemos dibujar la imagen, por ejemplo el lápiz, lo que hace necesario puntualizar dos aspectos:

- a) La imagen que dibujamos sólo tiene sentido por referencia al ojo del observador, no se trata, en ningún caso, de un objeto situado detrás del espejo, ni siquiera la luz procede de allí, por eso se le denomina imagen virtual.



Para reflexionar sobre este aspecto, una vez construida gráficamente la posición de la imagen, podría preguntarse a los estudiantes: ¿seguirá existiendo esa imagen si cerramos los ojos?

- b) La simetría especular, tal y como se deduce de este dibujo, consiste únicamente en que los puntos del objeto más cercanos al espejo dan una imagen más cercana al mismo y los puntos más alejados dan la imagen más alejada, sin afectar a una inversión de derecha /izquierda (Galili et al., 1991). Sin embargo, en los libros de texto habituales, con frecuencia, se ponen ejemplos como el de un conductor que ve las letras de AMBULANCIA correctamente mirando por el espejo retrovisor del vehículo si



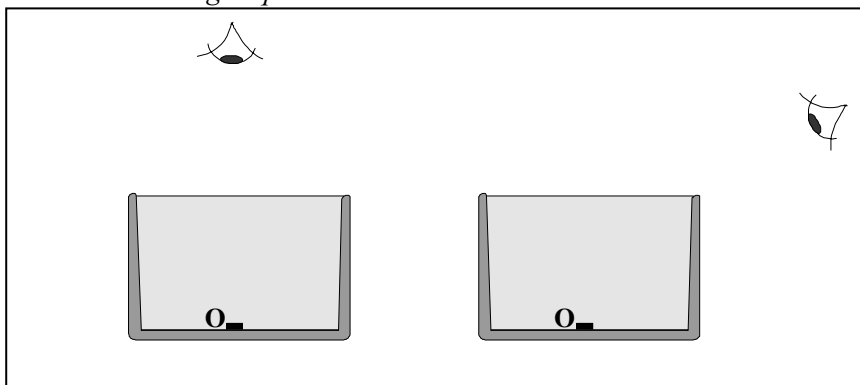
éstas (y la palabra completa) están escritas con una inversión derecha/izquierda. En este caso es necesario precisar que el observador está situado entre el espejo y el objeto y que si el conductor tuviera la palabra AMBULANCIA y el espejo delante de él no sería necesaria esa inversión de las letras para poder leerla. Se puede escribir la palabra AMBULANCIA en un plástico transparente y leer su imagen sin dificultad cuando el plástico y el espejo están delante del observador, por lo que se puede comprender que la imagen de esa palabra se lee sin inversiones derecha/izquierda como, a veces, suele explicarse.

La actividad de autoevaluación está planteada a partir de una de las ideas alternativas que hemos detectado que tienen los estudiantes antes de la enseñanza. En ese esquema la imagen parece emanar del objeto, entera, y trasladarse hasta la superficie del espejo donde se posa y el observador no es considerado un receptor de luz sino que está trazada su línea de mirada. Planteada de esta forma, los estudiantes tendrán ocasión de reflexionar y autocorregir, si fuera el caso, estas ideas, aplicando la hipótesis de la reflexión de la luz y probando la potencia explicativa del modelo de visión de Kepler.

2.2 ¿Cómo vemos los objetos sumergidos en líquidos transparentes?

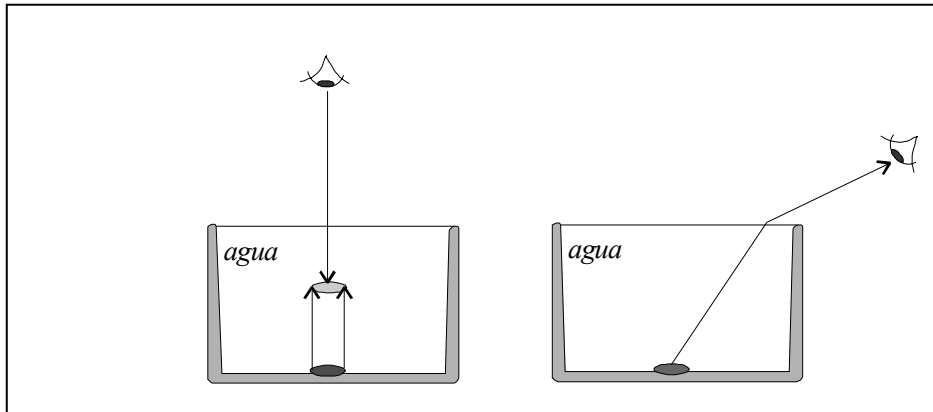
Haciendo uso del modelo de visión de Kepler y de la hipótesis de la reflexión de la luz hemos explicado cómo vemos los objetos, indirectamente, al mirar a un espejo plano. Podemos, también, poner a prueba el modelo de visión al enfrentarnos con otro fenómeno de visión indirecta como el que se da al mirar a los objetos sumergidos en líquidos o en otro material transparente.

A.33 Al mirar a un pequeño objeto sumergido en un recipiente con agua nos parece verlo en otra posición. Realizad las observaciones que se representan en los esquemas y señalad las características de la imagen que vemos.



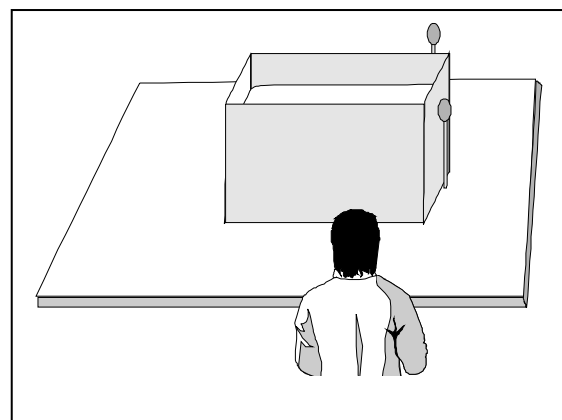
A.34 De acuerdo con el modelo de visión de Kepler, para ver un objeto debe entrar en el ojo un haz de luz divergente procedente de cada uno de sus puntos. Formulad una hipótesis sobre el comportamiento de la luz que explique que cuando miramos hacia un objeto sumergido en agua nos parezca que se encuentra a menor profundidad.

A.35 Para explicar cómo vemos los objetos cuando se encuentran sumergidos en medios transparentes, muchas personas, que no han estudiado óptica, realizan diagramas de rayos como los siguientes. Dad argumentos sobre por qué no pueden ser considerados correctos esos diagramas.



La refracción de la luz, o cambio de dirección que se produce al pasar la luz del líquido al aire, en general de un medio transparente a otro, depende del tipo de líquido y, como consecuencia, la profundidad con que se verá la imagen del objeto sumergido cuando se observa desde la vertical, también dependerá del medio donde se encuentre. La relación (o cociente) entre la profundidad real y la profundidad a la que se ve la imagen, al mirarla perpendicularmente, es una característica óptica de la sustancia transparente denominada índice de refracción (n).

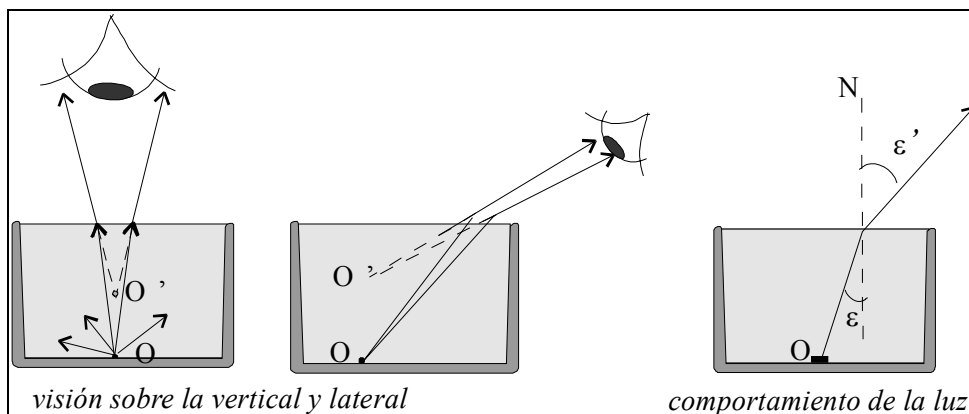
A.36 (opcional) Determinad experimentalmente el índice de refracción del agua. Para ello, colocad un alfiler sobre el fondo de un recipiente de material transparente lleno de agua y, mirando como indica el esquema, situad otro alfiler a la distancia donde parece verse su imagen en el exterior del recipiente.



Comentarios apartado 2.2 (De A.33 a A.36). De manera similar al apartado anterior, en A.33 se propone hacer observaciones cuidadosas de los fenómenos que deberán ser explicados. En este caso se puede llamar la atención de dos observaciones:

- a) Cuando miramos un pequeño objeto sumergido nos parece verlo a menor profundidad. La experiencia más sencilla consiste en situar un vaso de laboratorio de fondo plano sobre un folio en el que se ha dibujado con un lápiz una pequeña mancha circular. Para apreciar más claramente el efecto buscaremos miraremos al círculo del papel, alternativamente, de forma directa y a través del vaso con agua.
- b) Forramos ese mismo vaso, vacío, con una cartulina negra y miramos al círculo través de un pequeño tubo, como el de una pajita de refresco sujeta en un soporte para que no varíe su inclinación, desde una posición lateral en la que podemos ver la zona próxima al círculo dibujado en el papel, pero no ese círculo. Un compañero añadirá agua al vaso y el observador verá la imagen del círculo dibujado.

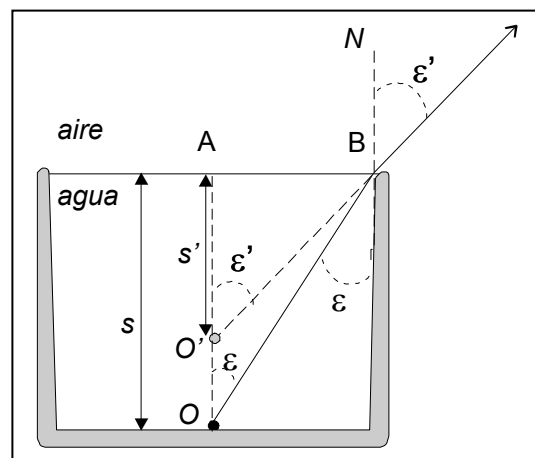
De esta forma, las observaciones de los objetos sumergidos en líquidos transparentes revelan que parecen encontrarse a menor profundidad, por lo que pueden ser vistos desde posiciones laterales en las que es imposible que llegue la luz directa del objeto. Para explicar estos fenómenos de forma coherente con el modelo de visión de Kepler es de esperar que los estudiantes supongan que la luz cambia de dirección al pasar del agua al aire. Al cambio de dirección de cada rayo de luz al pasar de un medio transparente a otro se le denomina refracción de la luz. En el caso de que la luz pase del agua al aire, el ángulo, ϵ , que forma un rayo de luz con la normal (N), es menor que el ángulo de refracción, ϵ' , por lo que la luz se desvía alejándose de la normal. De esta forma, el haz de luz que entra en el ojo del observador parece proceder de O' , por eso se suele denominar a este punto *imagen virtual* del punto O. En ese punto parece estar situada la imagen que vemos, pero ese punto no es, en realidad, una fuente luminosa.



En A.35 los estudiantes tienen ocasión de refutar posibles ideas alternativas al mirar a un objeto sumergido. Los trazados que se proponen para su análisis son algunos de los esquemas alternativos encontrados en nuestro estudio empírico en los estudiantes antes de la enseñanza de la óptica geométrica.

Por último, en A.36, se puede determinar experimentalmente la capacidad de refracción del agua, lo que es equivalente a la capacidad del agua de formar la imagen a menor profundidad cuando miramos sobre la vertical del objeto sumergido. La relación entre la profundidad real y la aparente coincide con el índice de refracción cuando el observador se sitúa en la vertical del objeto y, aunque esta interpretación está muy alejada de la ofrecida en los libros de texto habituales, conecta muy bien con el problema que hemos planteado para planificar el tema. Por otro lado, a pesar de que este fenómeno se presenta en prácticamente todos los libros de texto, no se suele avisar que, en general, el dioptrio plano no es un sistema óptico estigmático (el que forma la imagen en una posición única independientemente de la posición del observador). Sin embargo, cuando el observador se sitúa sobre la vertical al objeto sumergido, este sistema se puede aproximar a un sistema estigmático y la relación entre la profundidad real y aparente equivale al índice de refracción del líquido.

De la figura del margen, podemos escribir: $AB = s \cdot \text{tag} \varepsilon = s' \cdot \text{tag} \varepsilon'$ y de aquí: $s \cdot \frac{\text{sen} \varepsilon}{\sqrt{1 - \text{sen}^2 \varepsilon}} = s' \cdot \frac{\text{sen} \varepsilon'}{\sqrt{1 - \text{sen}^2 \varepsilon'}}$, y dado que la expresión de la ley de Snell puede escribirse como: $n \cdot \text{sen} \varepsilon = \text{sen} \varepsilon'$ (si se toma la unidad para el índice de refracción del aire), la ecuación anterior se



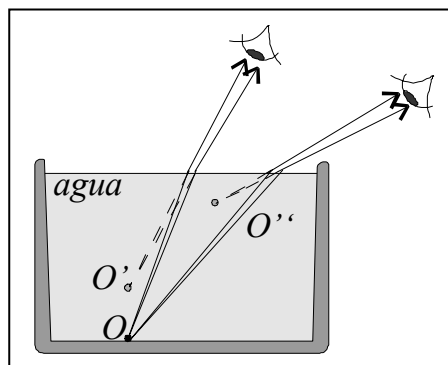
transforma en: $s \cdot \frac{\text{sen} \varepsilon}{\sqrt{1 - \text{sen}^2 \varepsilon}} = s' \cdot \frac{n \cdot \text{sen} \varepsilon}{\sqrt{1 - n^2 \text{sen}^2 \varepsilon}}$, de donde: $s' = s \frac{\sqrt{1 - \text{sen}^2 \varepsilon}}{n \sqrt{1 - n^2 \text{sen}^2 \varepsilon}}$

De esta última expresión podemos derivar que:

- Este sistema óptico no es estigmático al depender la posición de la imagen, s' , del ángulo ε y, por ende, de la posición del observador.
- Para ángulos pequeños, lo que ocurre cuando el observador se sitúa sobre la vertical y el haz que entra en su pupila es estrecho, esa expresión puede aproximarse a: $s' = \frac{s}{n}$, por lo que, en esas condiciones, el sistema es estigmático

y el índice de refracción es igual al cociente entre la profundidad real y aparente: $n = \frac{s}{s'}$.

Para posiciones alejadas de la vertical al objeto, una observación cuidadosa pone de manifiesto que la imagen no se sitúa sobre la vertical. Aplicando la ley de Snell, podemos obtener gráficamente la posición de la imagen en estos casos y confirma la observación.

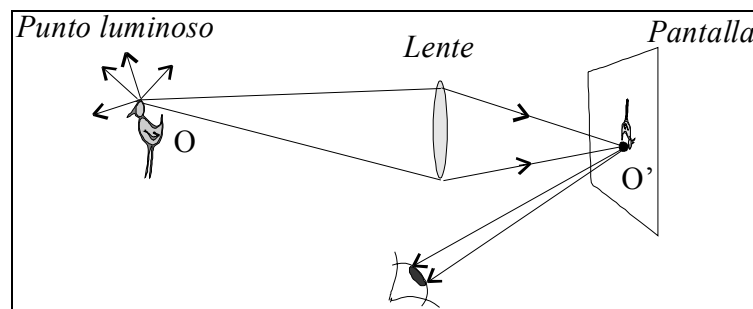


La experiencia descrita para medir el índice de refracción del agua puede repetirse con otros materiales como vidrio o metacrilato. En estos casos necesitaremos piezas de base rectangular de estos materiales y proceder de manera similar a como lo hicimos con la cubeta con agua.

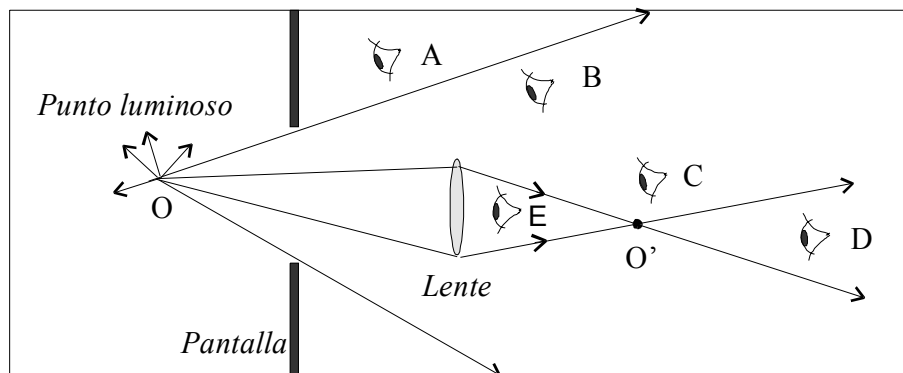
2.3 ¿Cómo vemos al mirar a través de las lentes?

Al elaborar el modelo de visión modelizamos el ojo como un sistema formado por una lente convergente y una pantalla. Al estudiar este sistema óptico comprendimos cómo vemos la imagen que se forma en una pantalla, pero sabemos que las lentes se pueden usar también eliminando la pantalla y mirando a través de ellas. Los fenómenos de visión cuando miramos a través de las lentes son otra ocasión para poner a prueba el modelo de visión que hemos elaborado.

A.37 En el esquema siguiente se representa cómo se ve en una pantalla la imagen formada con una lente convergente. Si se elimina la pantalla, ¿es posible ver esa imagen?, ¿desde dónde se podrá ver? Realizad un diagrama que lo explique y confirmad experimentalmente vuestra predicción.

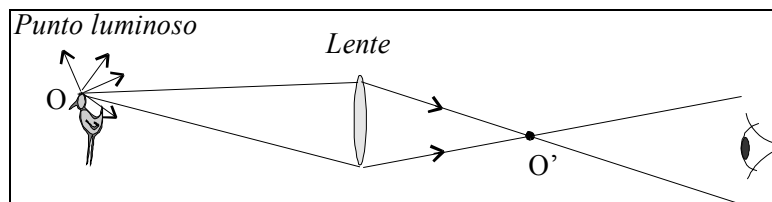


A.38 En una habitación de paredes negras, ¿qué verán cada uno de los observadores representados en el diagrama?



Comentarios A.37 y A.38.: A lo largo de este tema hemos estudiado como modelo de ojo humano el sistema óptico formado por una lente convergente y una

pantalla cuando el objeto se encuentra alejado del mismo; la imagen real formada con este sistema óptico se localiza en la pantalla de ese sistema (en la retina en el caso del ojo). En los apartados anteriores, al estudiar la visión indirecta, para explicar la visión de los objetos en los espejos planos o cuando se encuentran en el interior de una cubeta con agua, la imagen que se veía la denominamos virtual y no existe posibilidad de recogerla en una pantalla. Esa característica de la imagen de esos sistemas ópticos es la que se ha tendido a generalizar para distinguir la imagen real de la imagen virtual y, con frecuencia, se suele definir imagen real como la que se recoge en pantallas y virtual la que no lo hace. Sin embargo, como venimos analizando en este trabajo y algunos autores señalan (Goldberg et al., 1991), la imagen real no puede reducirse conceptualmente a esa característica. En A.37 se plantea una situación para clarificar este punto que, por otra parte, no puede pensarse que se trata de una situación insólita o anecdótica ya que el funcionamiento de los telescopios, microscopios y de otros muchos instrumentos ópticos se basa en la posibilidad de ver la imagen real dada por una lente convergente en ausencia de pantalla. El papel de la pantalla en un sistema óptico lente convergente-pantalla es la de ser difusora de haces de luz, de forma que, para muchas posiciones del observador, cada punto de la imagen difunde luz hasta su ojo; si se elimina la pantalla, la luz continúa propagándose desde el punto imagen y cualquier observador que sitúe su ojo en el espacio que ocupa el haz divergente que, ahora, procede de O' verá esa imagen sin necesidad de pantalla.

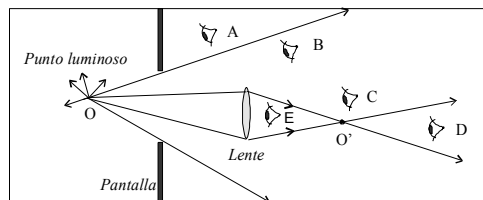


Así pues, O' es una imagen real de O , se vea con pantalla o sin ella ya que la luz que recibe el ojo procede de O' . Experimentalmente es difícil apreciar que la imagen que se ve en esta situación se localiza a cierta distancia de la lente, una primera observación más bien da la sensación de que la imagen está en la propia lente o incluso detrás de ella. Sin embargo, se pueden realizar observaciones más cuidadosas para apreciar la verdadera localización de la imagen cuando se mira a través de una lente sin pantalla. Una de ellas consiste coger con una mano una lente convergente (por ejemplo de 100 mm de focal), situar el ojo en la posición que indica el esquema gráfico anterior y, con la otra mano, poner y quitar, alternativamente, un trozo de papel traslúcido en la posición donde se forma la imagen (donde antes estaba situada la pantalla). Al poner el papel traslúcido y localizarse en él la imagen, el ojo acomoda para ver nítido a esa distancia y, al

quitarlo, permanece la sensación de que la imagen vista se encuentra en esa posición.

Es posible que una primera respuesta de los alumnos sea que la imagen O' se ve situando el ojo en la posición donde se forma, donde se encontraba la pantalla, sin embargo, de acuerdo con el modelo de visión de Kepler que venimos poniendo a prueba, la visión es posible cuando desde cada punto del objeto llega al ojo un haz divergente de luz. Según esto, el punto imagen O' se comporta como un objeto, con la diferencia de que la luz emitida por él está limitada a un único haz divergente. La distancia a la que hay que colocarse del punto O' está relacionada con la capacidad de acomodación del ojo; la variabilidad de convergencia de la lente del cristalino permite formar una imagen en la retina cuando el haz divergente tiene su origen, como mínimo, a unos 25 cm del ojo (aunque esta distancia sufre variaciones con la edad).

Relacionado con estos últimos aspectos está planteada la A.38 cuya realización deberá permitir a los estudiantes reflexionar sobre el modelo de visión de Kepler y las características de la imagen real. El análisis de esa situación deberá llevar a concluir que: en la posición A, el observador no verá nada al no recibir luz de ningún punto; en la posición B, el observador verá el punto O ya que desde él se puede trazar un haz divergente que

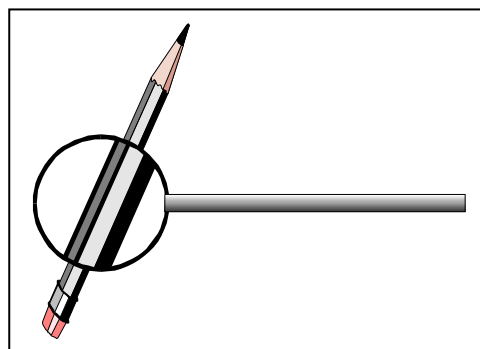


entre el ojo; en la posición C, el observador, tal y como está representada gráfica-mente la luz, no verá nada, aunque es posible que los alumnos piensen que puede llegar luz difundida desde los bordes de la lente pero, en el caso de que estén exquisitamente pulidos de forma que toda su superficie haga converger la luz que recibe, ese observador no vería nada. El observador D verá la imagen O' como hemos explicado anteriormente y el observador E no verá el objeto O ya que, en un ojo emétrope, para formar una imagen en la retina le debe llegar un haz divergente de luz. En este caso, sin embargo, le llega luz pero el ojo no puede distinguir ninguna forma ni detalle del objeto (mucho más cuanto más poder de convergencia tenga la lente) y únicamente obtendrá sensación de luminosidad.

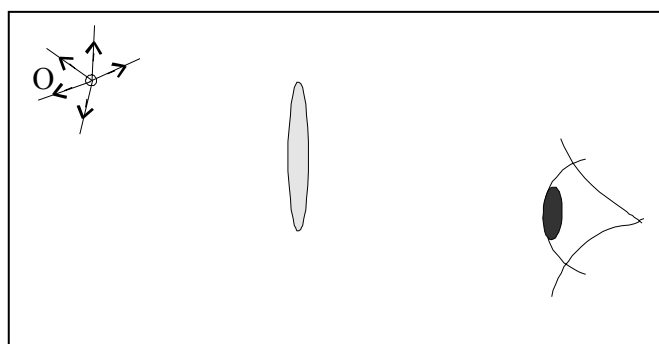
Una lente convergente puede formar una imagen real cuando el objeto (la fuente luminosa) se encuentra a cierta distancia de ella, pero la lente tiene un poder limitado de convergencia y para objetos muy cercanos no es posible su formación. Sin embargo, en estas condiciones, podemos ver aumentados los objetos mirando a través de la lente. Cuando la lente convergente se usa de esta forma se le denomina *lupa*.

A.39 Explorad el comportamiento de la lente convergente suministrada por el profesor cuando actúa como lupa anotando los resultados de las observaciones siguientes:

- a) ¿En qué margen de distancias a la lente puede estar situado el objeto para que actúe como lupa?
- b) ¿Qué características tiene la imagen cuando la lente actúa como lupa: real o virtual, derecha o invertida, de mayor o menor tamaño?

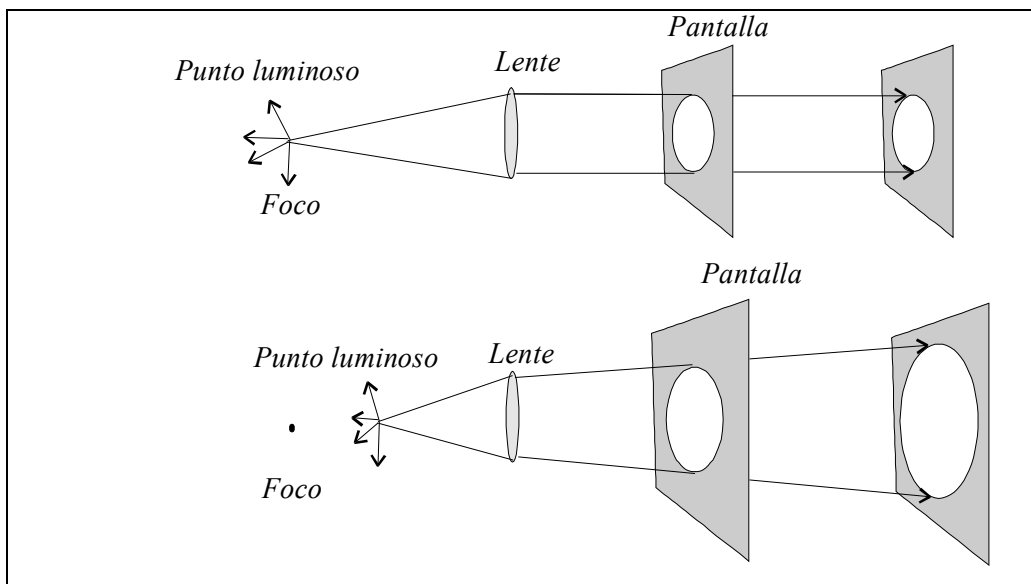


A.40 Una persona mira a través de una lente convergente a un objeto puntual situado entre el foco y la lente. Completa en el esquema un diagrama de rayos que explique cómo es visto ese objeto cuando la lente actúa como lupa.

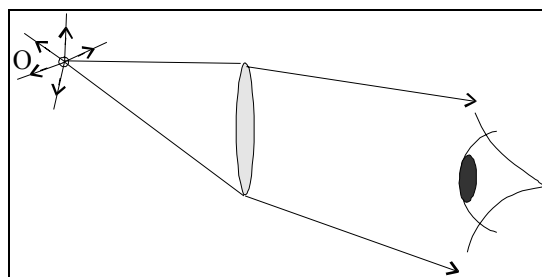


Comentarios A.39 y A.40: Aunque los alumnos hayan usado la lupa en alguna ocasión no podemos suponer que conocen las características de la visión a través de ella, por lo que se recomienda hacer la exploración de su comportamiento en A.39 con una lente convergente de 100 mm focal que, además, es el tipo de lente que suele suministrarse en los equipos de óptica de los centros educativos. Al ser éste el tipo de lente que se usó en A.19 donde se buscaba la posición de la pantalla en la que se podía ver la imagen real de una fuente puntual a distintas distancias, los alumnos pueden recordar que únicamente se podía ver la imagen en la pantalla cuando la fuente puntual se situaba a distancias mayores de 10 cm

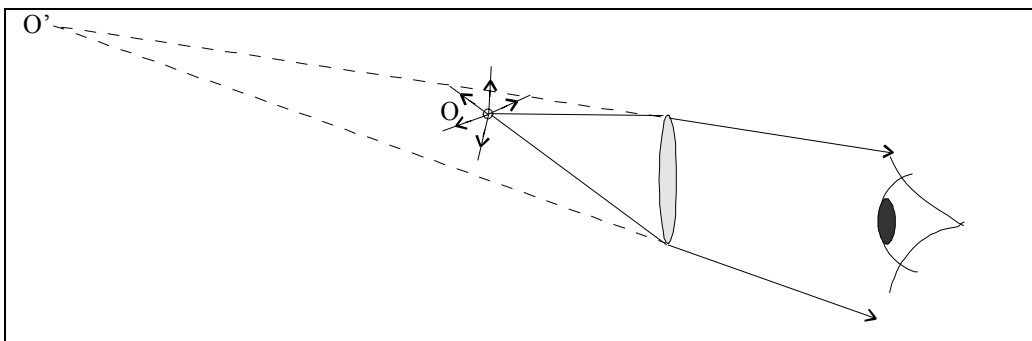
(distancia focal) y que, a esa distancia, el haz de luz emergente formaba sobre la pantalla, cualquiera que fuera su posición, círculos iluminados del mismo diámetro que la lente. Para distancias menores de la fuente puntual, esos círculos iluminados se hacen mayores conforme se aleja la pantalla, es decir, cuando el objeto (o fuente luminosa) se sitúa entre el foco y la lente. En esta última situación, aunque la lente converge el haz de luz incidente, el haz que emerge de ella aún es divergente y no es posible obtener una imagen en una pantalla. Para ayudar a comprender el comportamiento de la lupa podemos recordar estos trazados:



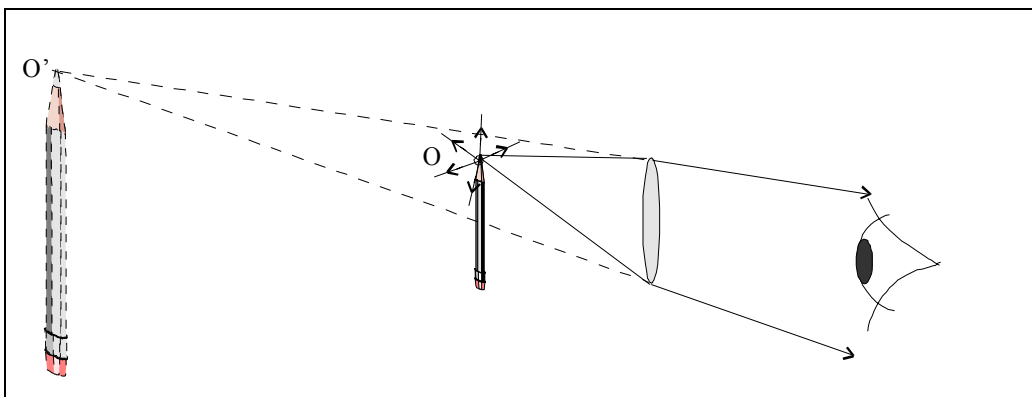
A partir de estos esquemas podemos afrontar el trazado gráfico cualitativo que se propone en A.40. Cuando el objeto está situado entre el foco y la lente, aunque el haz emergente ha convergido respecto al incidente, la convergencia no es suficiente para concentrar la luz en un punto. Así pues el trazado de la luz que podemos sugerir que se haga será:



Como el haz que llega al ojo es divergente, el observador verá una imagen (virtual) en el origen directo de ese haz de luz, lo que se asemeja a la visión en un espejo y a la de los objetos sumergidos en agua. El trazado gráfico de localización de esa imagen virtual será, pues:



En caso de tratarse de un objeto extenso, podemos imaginar que el punto O es uno de sus extremos y, para el otro, el trazado gráfico no es necesario realizarlo por ser simétrico al primero. A partir del esquema siguiente se puede entender el aumento con que se ven los objetos cuando la lente convergente se usa como lupa.



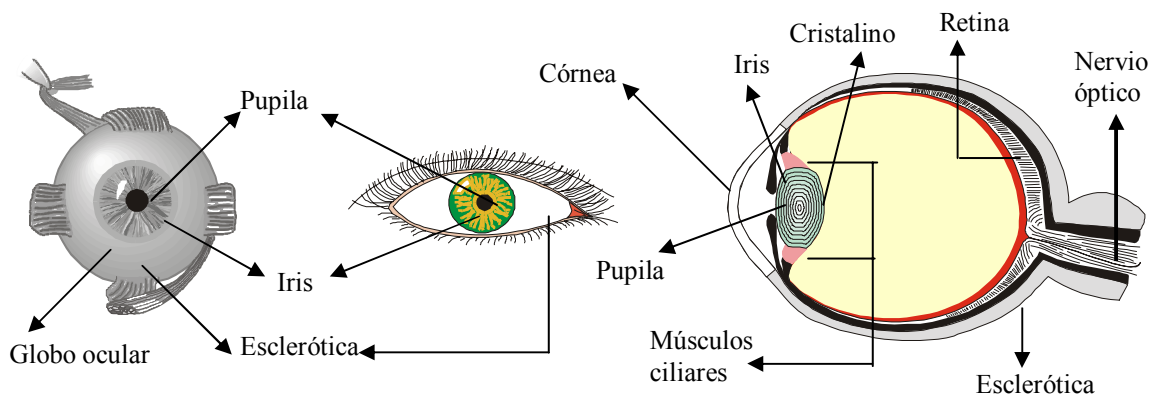
Con frecuencia se suele dibujar la imagen virtual, en este caso un lápiz, para representar que el ojo reconoce en la imagen al objeto emisor de luz, conviene volver a avisar aquí que esta imagen sólo tiene sentido por referencia al ojo del observador, que en ningún caso se trata de un objeto situado detrás de la lente y que ni siquiera es el origen de la luz que llega al ojo.

3. APLICACIONES TECNOLÓGICAS DEL MODELO DE VISIÓN

El modelo de visión de Kepler ha permitido explicar la visión directa de los objetos y cuando los vemos de forma indirecta: al mirar a espejos planos, a los objetos sumergidos en medios transparentes y al mirarlos a través de lentes. Una de las aplicaciones de este modelo de visión que más ha influido en mejorar la calidad de vida de las personas ha sido la comprensión y, por tanto, la corrección de las anomalías visuales.

3.1 ¿Cómo se corrigen las anomalías visuales?

Antes de abordar este problema recordemos que el ojo humano es un cuerpo esférico de unos 2,5 cm de diámetro y la pupila, el orificio por donde entra la luz, tiene un diámetro entre 2 mm y 8 mm que se regula según la intensidad de luz. La capa más externa del ojo se llama esclerótica y se trata de una membrana blanca que en su zona anterior es abombada y transparente (córnea). En realidad es la córnea quien produce casi toda la convergencia de los haces de luz incidentes. La luz penetra en el ojo a través de la córnea, atraviesa la pupila y el cristalino, una lente convergente que provoca otra convergencia, una especie de “ajuste fino” del haz, consigue que la imagen se forme justamente en la retina. En la retina hay unas células receptoras de luz (llamadas conos y bastones) que generan a partir de la luz que les llega impulsos eléctricos que a través del nervio óptico se propagan al cerebro, en donde principalmente se realiza la construcción de la imagen y se interpreta lo que vemos. Este es un sistema complejo que nosotros hemos modelizado como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.

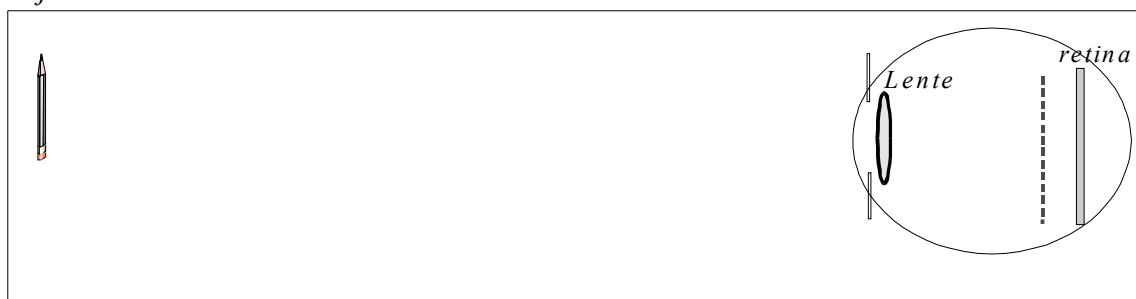


Las anomalías visuales son pequeñas modificaciones del ojo real, las más frecuentes, por las cuales las personas no ven bien los objetos lejanos, son la miopía y la hipermetropía. La presbicia o “vista cansada”, aparece en las personas mayores de 45 años independientemente de que puedan tener otra anomalía y se manifiesta en la visión de cerca. Además de estas anomalías y unido a ellas, puede existir astigmatismo, cuando la córnea presenta irregularidades en su esfericidad. Ésta última anomalía visual no la estudiaremos en este curso debido a su gran complejidad geométrica.

Para ver bien un objeto lejano, es necesario que se forme una imagen del mismo en la retina que, como hemos estudiado, es una pantalla conectada con el cerebro a través del nervio óptico. Para un ojo emétrope (sin anomalía visual) el esquema de rayos para explicar la visión de un objeto lejano sería:

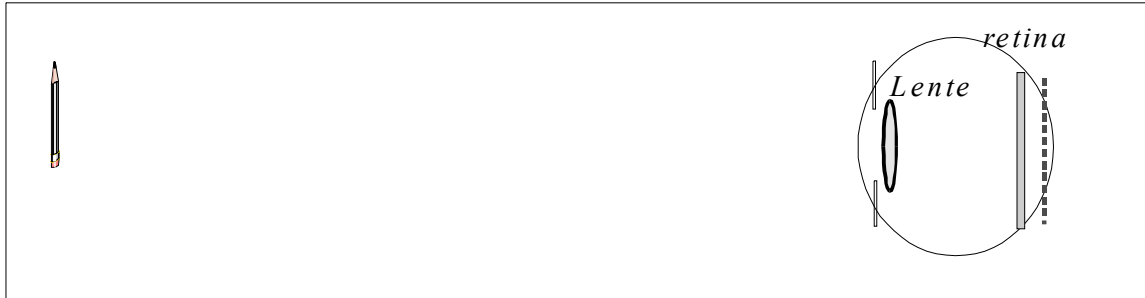


A.41 La miopía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a mayor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibujad en el esquema un diagrama de rayos que explique la visión de un ojo miope de un objeto alejado (en el esquema está señalada con línea discontinua la retina del ojo emétrope) . ¿Por qué los miopes ven borrosos los objetos alejados?



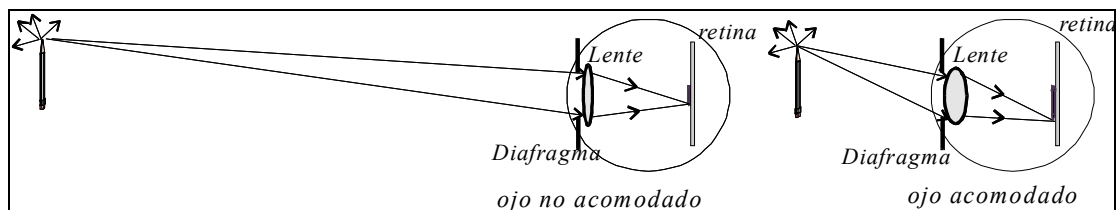
A.42 Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, proponed una solución óptica para la corrección de la miopía.

A.43 La hipermetropía es la anomalía visual de los ojos cuya retina está a menor distancia del cristalino que en el ojo emétrope. Dibujad en el esquema un diagrama de rayos para la visión de un objeto alejado. ¿Por qué los hipermétropes ven borrosos los objetos alejados?

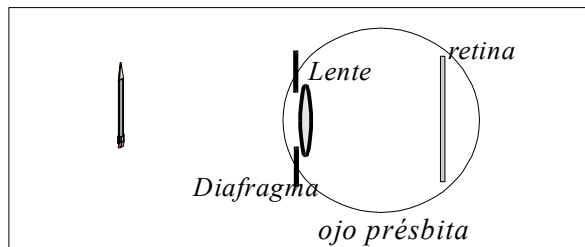


A.44 Dado que la distancia lente-retina no puede ser modificada, proponed una solución óptica para la corrección de la hipermetropía.

Además de la miopía y la hipermetropía, a partir de los 45 años de edad, aproximadamente, aparece la presbicia o “vista cansada” ya sea el ojo emétrope o con anomalía visual (miope o hipermetrope). Cuando un ojo emétrope o corregido con gafas adecuadas para ver de lejos, no ve bien de cerca se dice que tiene presbicia o “vista cansada”. Cuando estudiamos el sistema óptico lente convergente-pantalla como modelo de ojo humano, llamamos la atención de que para formar una imagen en una pantalla situada a una distancia fija, la lente debe tener capacidad de variar su curvatura para aumentar el poder de convergencia de los haces de luz y ver nítido a distintas distancias. Este fenómeno, denominado acomodación, lo realiza en el ojo humano la lente del cristalino y se representa en el esquema siguiente:

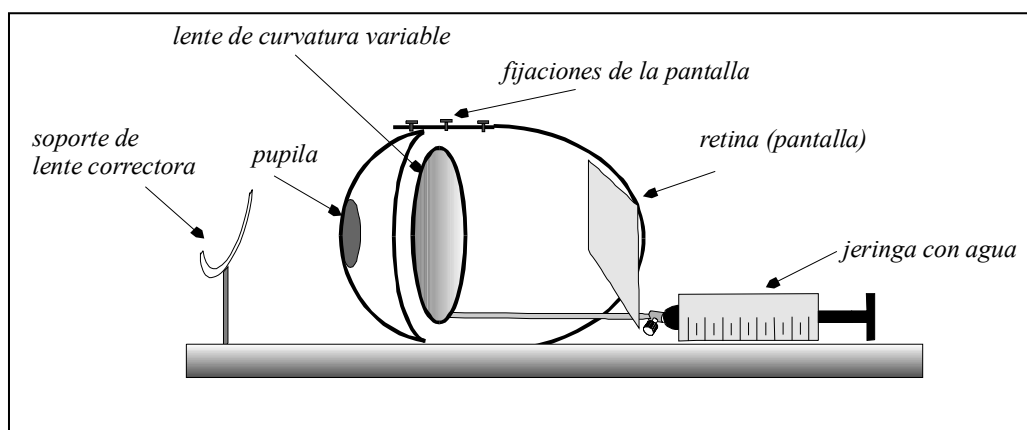


A.45 El esquema siguiente representa un ojo presbita, en el que el cristalino no aumenta su curvatura al mirar a los objetos cercanos. Dibujad en él un diagrama de rayos y explicad por qué ve borroso.

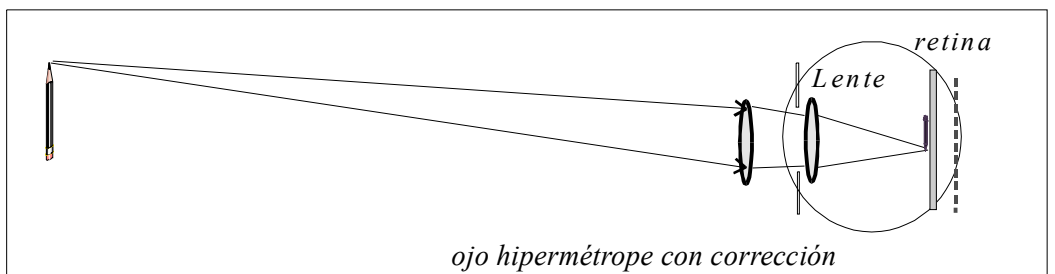
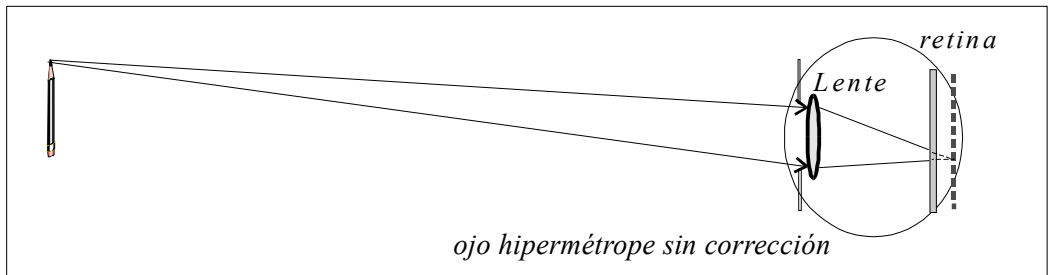
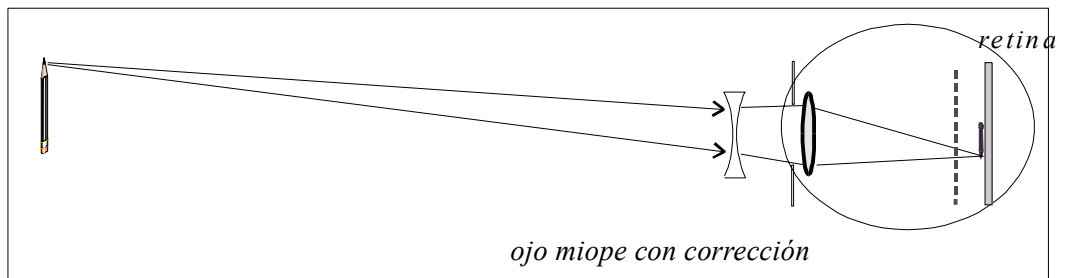
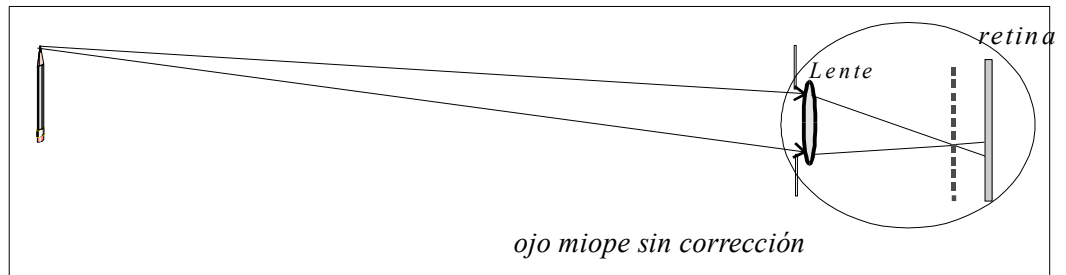
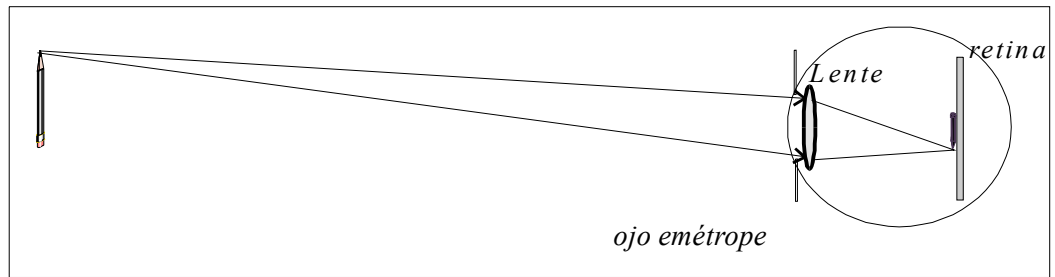


A.46 Proponed una solución óptica para corregir la presbicia.

Comentarios apartado 3.1 (de A.41 a A.46): En este apartado los estudiantes tendrán oportunidad de aplicar los conocimientos construidos para la comprensión de las anomalías visuales y su corrección óptica. Se puede facilitar este estudio con el apoyo de algunas maquetas de ojo humano existentes en el mercado. El dibujo siguiente es un esquema del modelo que es distribuido actualmente por varias empresas de material educativo (Jeulin, Edumad,...) y consiste, básicamente, en una lente convergente de caucho flexible y transparente llena de agua y una pantalla móvil para simular la visión del ojo miope y del hipermetrope. La lente está conectada a dos jeringas con las que inyectar o extraer agua para modificar su curvatura y simular la acomodación del cristalino. Una vez simulada en la maqueta una ametropía visual (miopía, hipermetropía o presbicia) se le puede colocar delante lentes adecuadas para observar de nuevo una imagen nítida en la pantalla y, por tanto, su corrección.

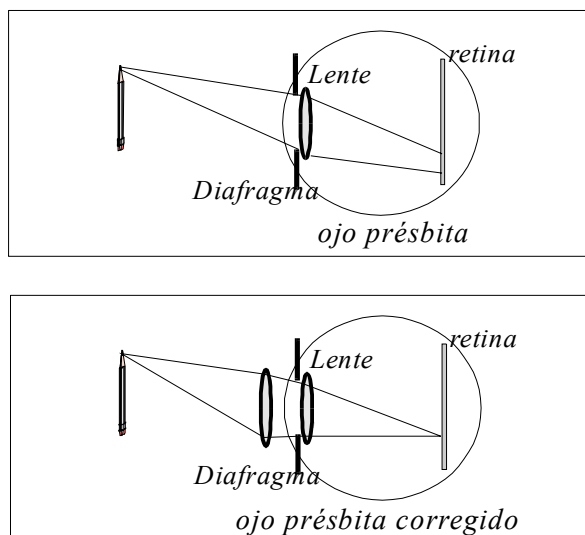


Los esquemas gráficos que se solicitan en este apartado son los siguientes:



Para este nivel educativo nos bastará con que los alumnos comprendan que la lente divergente utilizada en la corrección óptica del ojo miope tiene unas propiedades ópticas contrarias a las de la lente convergente.

Respecto de la corrección de la presbicia, se puede comprender que si la lente del cristalino no puede aumentar su poder de convergencia al mirar a un objeto cercano, el haz de luz procedente de cada punto del mismo convergerá en un punto detrás de la retina. Por ello, la corrección del ojo presbita se realizará con lentes convergentes que equilibren el déficit de convergencia del cristalino. Los esquemas solicitados serán:



3.2 ¿Cómo funciona un telescopio? (opcional)

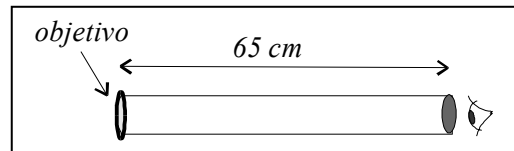
Además de las gafas para la corrección de las anomalías visuales, otra aplicación tecnológica del modelo de visión, de gran impacto social y científico, es el telescopio. El telescopio fue desarrollado a partir del siglo XVI como una herramienta de uso habitual en el campo militar y en el científico, sobre todo en astronomía. Sin embargo, al principio, su aceptación tuvo dificultades ya que las observaciones que se hacían con él cuestionaban las teorías del Universo hasta entonces aceptadas. Se sabe, por ejemplo, que con un telescopio construido por él, Galileo observó cuatro satélites de Júpiter y probó que tenían órbitas alrededor del planeta, lo que contradecía las ideas aceptadas en esa época de que todos los astros giraban alrededor

de la Tierra. Por otro lado, la ausencia de un modelo de visión que explicara su funcionamiento, hacía que se desconfiara de lo que no era visto a “simple vista”.

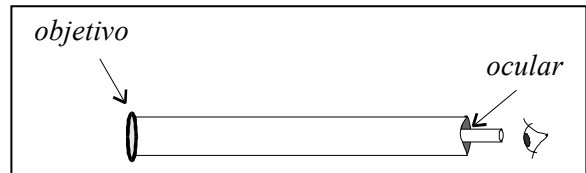
En síntesis, el telescopio de Kepler consiste en un sistema de dos lentes convergentes: la primera de ellas, el objetivo, es una lente convergente casi plana. Esta lente al tener poco poder de convergencia formaría, de un objeto alejado, una imagen de gran tamaño en una pantalla alejada. Una lente de 1 dioptría, que es una lente habitual en la corrección de la visión, formaría la imagen de un objeto alejado a 1 m de distancia y una lente convergente de 2 dioptrías a 0’5 m de distancia. La imagen formada por esa lente se puede ver sin pantalla si situamos el ojo detrás de ella en la dirección de propagación de la luz. Con las indicaciones que aportamos en las siguientes actividades y con materiales baratos podrás construir un telescopio del mismo tipo que construyó Kepler

A.47 *Construid un telescopio de Kepler a partir de las siguientes indicaciones:*

Pegad una lente convergente de dos dioptrías en el extremo de un tubo de cartón del mismo diámetro de la lente y de una longitud de algo más de 60 cm. Sitúad el ojo en la posición del esquema y comprobad las características de la imagen que se ve al mirar a un objeto lejano.

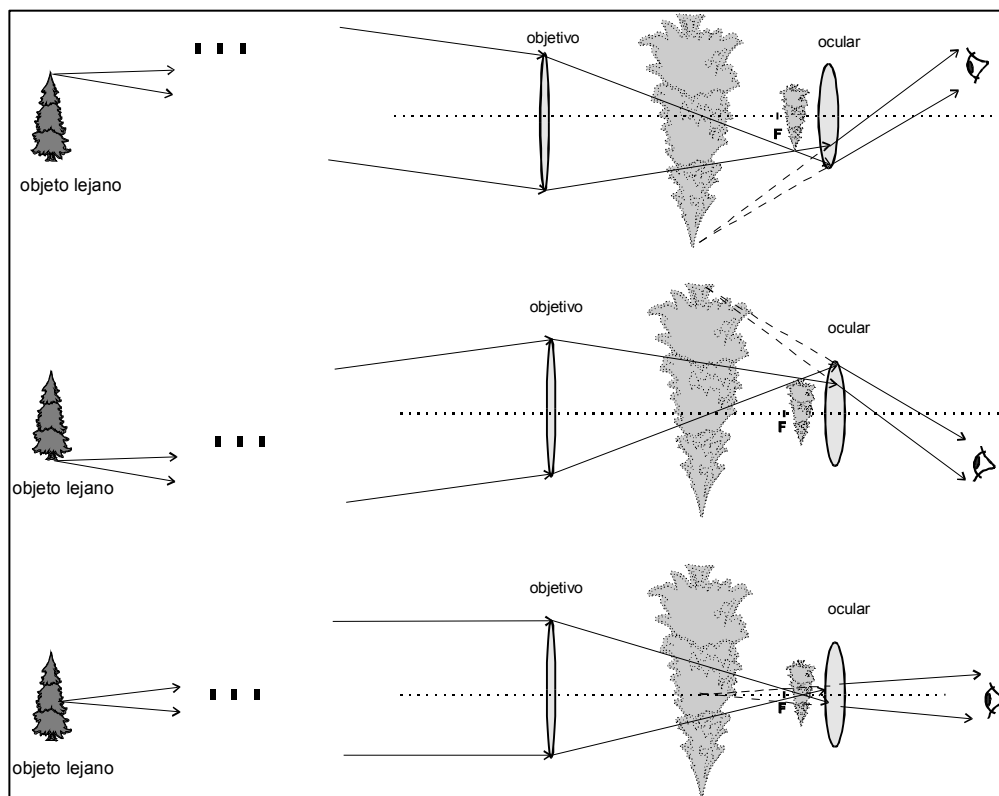


Para ver con mayor aumento esa imagen, podemos mirarla con una lupa. Se pueden encontrar lupas baratas de 10 dioptrías en el mercado. También se puede obtener una buena lupa (aunque de muy poco diámetro) extrayendo la lente de una cámara fotográfica desechable. Estas lentes son de unas 33 dioptrías y tienen el foco a unos 3 cm. Para que la lente que se coloca en el ocular, funcione como lupa, la imagen obtenida con el objetivo debe estar situada entre el foco del ocular y el ocular. Podemos ajustar las distancias o enfocar, montando el ocular en un tubo de diámetro más pequeño que se pueda mover hacia delante y hacia atrás dentro del otro tubo. Es muy importante para obtener una buena visión que los centros de las lentes estén alineados.



Comentarios apartado 3.2: La construcción de un telescopio de Kepler en este nivel educativo, siguiendo las instrucciones dadas en la actividad, pretende

únicamente que los estudiantes puedan apreciar las mejoras de visión que se consiguen con estos dispositivos. Los trazados gráficos que explican el aumento de un telescopio superan los objetivos de enseñanza en este nivel, por lo que los que presentamos a continuación ofrecen una justificación cualitativa a los estudiantes interesados.



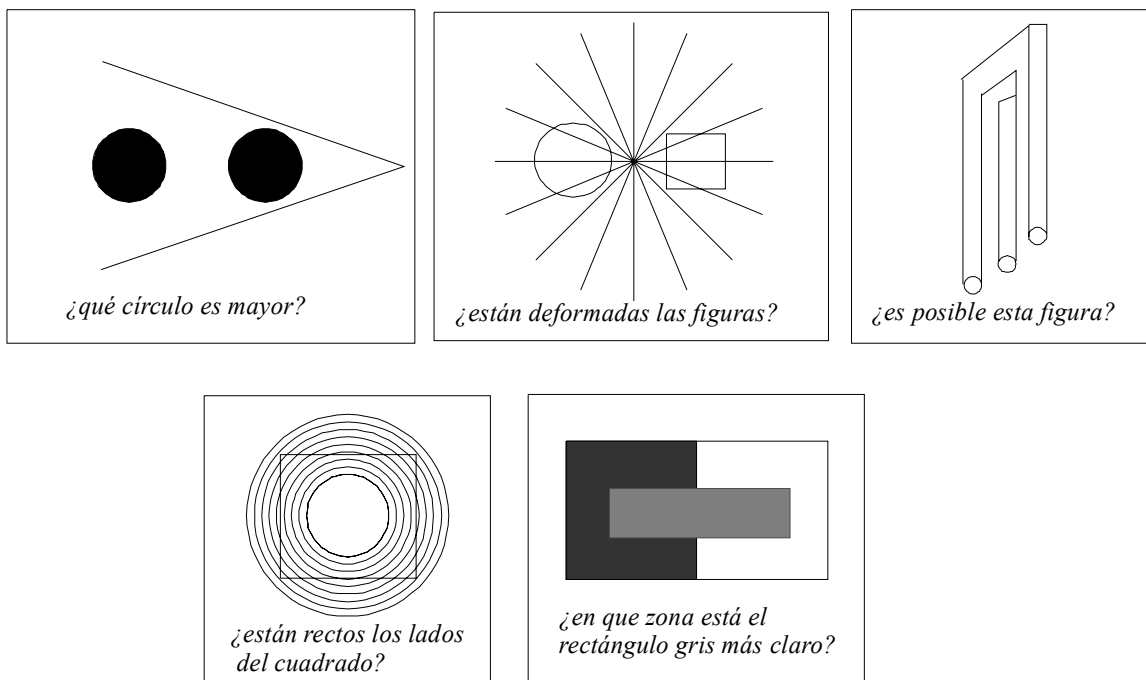
4. CONCLUSIONES Y PROBLEMAS ABIERTOS

Hemos elaborado un modelo de visión con el que podemos explicar la forma y el tamaño de los objetos que vemos directamente. Al poner a prueba este modelo para explicar la visión a través de un espejo plano o cuando el objeto está sumergido en un medio transparente, hemos debido formular nuevas hipótesis sobre el comportamiento de la luz como la reflexión y la refracción. Además, con este modelo de visión, hemos podido comprender qué es lo que hace que un ojo sea miope, hipermetrope o presbita y con qué tipo de lentes corregir esas anomalías visuales. El modelo de visión y el comportamiento de la luz frente a las lentes convergentes también nos ha permitido entender cómo podemos ver aumentados los

objetos lejanos haciendo uso del telescopio de Kepler. No obstante, los avances conseguidos sobre cómo vemos y sobre el comportamiento de la luz permiten plantear nuevos interrogantes para profundizar en el modelo de visión humano.

A.48 Enunciad algunos problemas que podamos plantear como consecuencia del estudio realizado y que el modelo de visión elaborado no ha resuelto.

La visión humana es un problema de gran complejidad y el modelo de visión que hemos elaborado en este tema sólo es una buena aproximación para entender cómo vemos los objetos. Sabemos, por ejemplo, que el cerebro elabora la percepción de la visión a partir de los estímulos de la imagen óptica formada en la retina y a partir de otras informaciones codificadas y almacenadas en nuestra memoria. La percepción visual a nivel cerebral es muy compleja y es, actualmente, objeto de investigación. Una de las pruebas de esta complejidad y de la necesidad de un mayor número de investigaciones en este campo son las ilusiones ópticas.



Por otro lado, hemos asignado un conjunto de propiedades a la luz para explicar la visión en distintos contextos: hemos supuesto una propagación rectilínea en cada

medio y en todas las direcciones desde cada fuente puntual, hemos supuesto que se refleja en los espejos o se refracta al cambiar de medio, etc. , con lo que podemos plantear ¿qué es la luz?, ¿cuál es su naturaleza para que su comportamiento sea el que hemos descrito?

También podemos plantear interrogantes que atañen a la cuantificación necesaria a toda ciencia. Hemos estudiado el comportamiento de las lentes convergentes pero ¿podemos caracterizar cada tipo de lente de forma que sepamos la distancia a la que hay que poner la pantalla para ver la imagen, o para corregir un determinado grado de anomalía visual?

De la misma forma, podemos plantear ¿cómo vemos el color?, una sensación que acompaña a la visión de la forma y el tamaño de los objetos, etc.

5. ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS: ¿CÓMO EXPLICAR EL COLOR CON QUE VEMOS LOS OBJETOS?

El modelo de visión que hemos elaborado ha explicado con suficiente profundidad cómo vemos los objetos, pero sabemos que, con la visión, al reconocer la forma y el tamaño, también percibimos el color. Con frecuencia se piensa que el color es una propiedad de los cuerpos que vemos, de hecho, el lenguaje que utilizamos es una muestra de esta forma de pensar, así se suele decir: “este papel es de color blanco, el tomate maduro es rojo o el limón es amarillo”. Sin embargo, tenemos experiencias en las que un mismo objeto puede ser visto con otro color diferente del habitual, por lo que se hace necesario reflexionar sobre ello.

A.49 ¿Es amarillo el limón?, ¿son rojos los tomates? Exponed algunas experiencias en las que los objetos puedan ser vistos de color distinto del habitual.

Las experiencias que hemos comentado muestran que el color no es una propiedad exclusiva del cuerpo, como lo es su forma, su masa o su composición química, sino que depende de la luz con que se iluminen, por lo que debemos preguntarnos si el color es una propiedad de la luz.

A.50 ¿Tiene color la luz?, entonces, ¿qué significan las expresiones habituales: luz blanca, luz azul o luz roja?

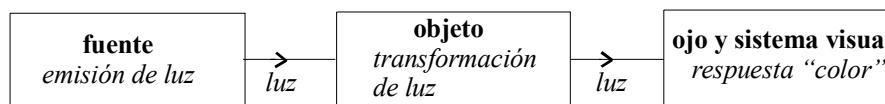
Cuando decimos que el tomate es rojo estamos afirmando, entonces, que cuando está iluminado con la luz “blanca” habitual de las lámparas o la luz de día lo percibimos de color rojo, pero sabemos que puede verse de otro color si la luz con que se ilumina fuera otra. Para comprender la visión del color será necesario, pues, profundizar en cómo se obtienen las luces de “colores” a partir de la luz “blanca”. Para ello, vamos a analizar algunos fenómenos, que desde siempre han llamado poderosamente la atención, en los que se obtienen espectros de colores a partir de la luz “blanca”.

A.51. Existen algunos fenómenos en los que a partir de luz “blanca” es posible ver una gama de muchos colores. Citad alguno de esos fenómenos, observad la reproducción de alguno de ellos realizada por el profesor y dad una interpretación.

Comentarios A.49, A.50 y A.51: De acuerdo con las metas parciales que habíamos establecido al elaborar la estructura de esta unidad didáctica (véase capítulo 3, cuadro 3.4), para explicar la sensación del color es necesario disponer de, al menos, tres concepciones básicas:

1. El modelo de Kepler en el que se explica la visión a partir de la luz que llega al ojo.
2. La hipótesis de la luz blanca como mezcla de distintos tipos de luz.
3. El conocimiento de que en la retina existen tres tipos de células con respuesta diferente según el tipo de luz incidente. Esta respuesta es la que hace que a cada tipo de luz le corresponda una sensación de color, pero no a la inversa, es decir, que a cada sensación de color no le corresponde un tipo de luz. Así, podemos explicar la visión del color rojo cuando incide este tipo de luz en el ojo, pero no podemos explicar la visión del magenta a partir de un tipo de luz del espectro de la luz blanca.

De acuerdo con Chauvet (1996) la comprensión de la visión del color requiere la comprensión de una cadena de sucesivos cambios en la información que sobre el color transporta la luz desde la fuente luminosa hasta el sistema visual. Esta cadena de cambios la representa según este esquema:



Esta cadena de cambios lleva asociada una serie de razonamientos que es necesario que realicen los alumnos. Estos razonamientos son la respuesta a preguntas tales como:

- ¿Cuál es la composición de la luz incidente?
- ¿Cuál es el resultado de la interacción de la luz con la materia?
- ¿Cuál es la composición de la luz transmitida o difundida?
- ¿Cuál es la respuesta del sistema visual?

Nuestra estrategia didáctica para buscar respuesta a estas preguntas, en este nivel educativo, estará basada en la hipótesis de la composición heterogénea de la luz "blanca" sin recurrir a la naturaleza ondulatoria de la luz, lo que supone, por ello, una aproximación cualitativa a la comprensión de la visión del color. Cabe señalar que concebir la luz blanca como una mezcla de diferentes tipos de luz fue la hipótesis fundamental de Newton en su "*Óptica*" para explicar la dispersión de la luz blanca al atravesar un prisma, frente a las teorías imperantes en esa época que basaban la explicación en supuestas modificaciones de la luz (Westfall, 1996; Solís y Sellés, 2005). De forma similar, pensamos, que la introducción de esta hipótesis en la enseñanza de la visión del color puede ser un camino para sustituir

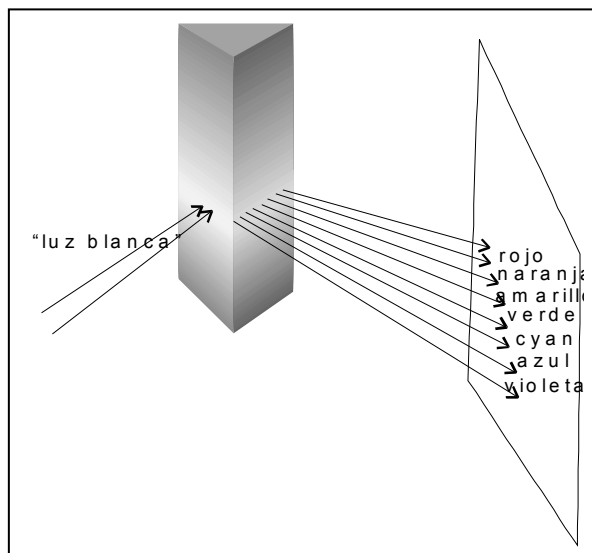
ideas alternativas que hemos encontrado en los estudiantes (véase capítulo 5, tabla 5.12, pag. 184) cuando admiten que un filtro de color modifica el color de la luz que pasa por él.

Por otro lado, otras investigaciones didácticas sobre la visión del color han puesto de manifiesto, además, que los estudiantes asignan el color a una propiedad del material de que está compuesto el objeto (Feher y Rice, 1992) pero, dado que los estudiantes que han seguido esta secuencia de enseñanza han tenido ocasión de realizar experiencias en las que la luz difundida por los objetos ilumina con su mismo tono de color una pantalla blanca enfrentada a ellos (véase A.5), es de esperar que también relacionen el color con la luz que los ilumina o, más exactamente, de acuerdo con el modelo de visión elaborado, con alguna característica de la luz que llega a los ojos del observador.

De acuerdo con estos antecedentes, en A.49, esperamos que los estudiantes recuerden experiencias en las que el color con que se ven los objetos cambia en función de la iluminación, como pueden haber observado en su ropa al ser iluminada con las luces de color de teatros o discotecas. Si no se poseen este tipo de experiencias, se pueden realizar oscureciendo el aula y colocando filtros coloreados en un proyector de diapositivas para iluminar cartulinas u objetos diferentes. Como consecuencia, en una primera conclusión, podremos relacionar el color con el tipo de luz que difunden los objetos. Si embargo, debemos hacer una reflexión sobre el lenguaje que normalmente se utiliza ya que al hablar de luz "blanca" o luz "azul" estamos asociando, también, el color con cada tipo de luz. Como hemos estudiado en este tema (véase A.8), la luz, aunque haga posible la visión, no es en sí misma una entidad visible y, si el color es una percepción asociada a los objetos que vemos (como la forma o el tamaño), entonces el color no puede ser una propiedad de la luz, esto es, la luz no tiene color. En A.50 debe seguirse este razonamiento y, aunque no intentemos cambiar el lenguaje habitual, sí sería conveniente clarificar el significado de estas expresiones. Así, a partir de ahora, entenderemos por luz "blanca" el tipo de luz que hace que veamos blanca una pantalla iluminada por ella y luz "azul" al tipo de luz que hace que veamos azul esa misma pantalla. La pantalla que servirá de testigo para "identificar" el tipo de luz es la pantalla habitual sobre la que se suele hacer proyecciones de diapositivas o de cine, aquella que vemos blanca al estar iluminada con la luz habitual del Sol o de las lámparas de la clase.

En A.51 completaremos el primer eslabón de la cadena de razonamientos sugerida por Chauvet al formular la hipótesis de la naturaleza heterogénea de la luz blanca para explicar el espectro de colores que vemos al mirar a una pantalla, cuando un haz de esa luz ha atravesado un prisma de vidrio. Es de esperar que los alumnos

citen el arco iris como uno de los fenómenos donde se observa el espectro de colores, aunque en este nivel educativo no profundizaremos en él y nos limitaremos al fenómeno de dispersión de la luz en un prisma. Para su realización en el aula utilizaremos un proyector de diapositivas en el que hemos introducido una diapositiva con un acetato opaco en el que hemos abierto una rendija rectangular de 12 por 3 mm, aproximadamente, con la que obtener un estrecho haz de luz blanca para incidir en el prisma. Es conveniente conocer que en estas experiencias se produce, además de la franja de colores principal sobre la pantalla, otras debidas a la reflexión en las caras internas del prisma que conviene dirigir a zonas del aula alejadas de la pantalla de observación.



Esperamos que estas observaciones puedan ser interpretadas como consecuencia de la heterogeneidad de la luz blanca a pesar de quedar por explicar, por el momento, por qué esta combinación de distintos tipos de luz (la luz blanca) da sobre la pantalla color blanco y por qué el prisma separa esos tipos de luz. Para reforzar esta hipótesis podemos seguir el siguiente razonamiento: si un prisma separa los diferentes tipos de luz que componen la luz blanca, añadiendo otro prisma colocado inversamente debería volver a obtener luz blanca. Esta consecuencia puede ser probada experimentalmente uniendo dos prismas y formado con ellos una lámina de vidrio de caras plano- paralelas, lo que es una simplificación del experimento *in crucis* de la Óptica de Newton.

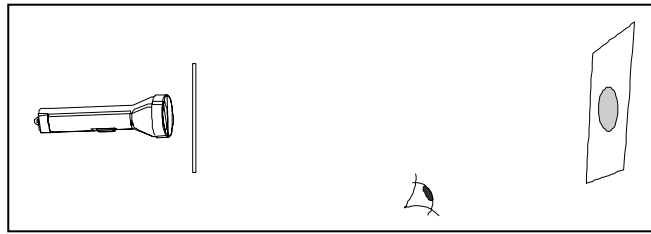
Llegados a este punto disponemos de un modelo de visión según el cual es necesario que llegue luz procedente de los objetos para poder verlos y, por otro lado, para explicar el espectro de colores que se forma cuando la luz blanca atraviesa un prisma de vidrio, hemos supuesto que es una mezcla de muchos tipos de luz. A partir de estos dos supuestos podemos enfrentarnos a explicar cómo vemos el color de los objetos.

A.52 A partir de la hipótesis de que la luz blanca es una mezcla muchos tipos de luz, cuando iluminamos con este tipo de luz, explicad:

- a) *Cómo vemos blanco un objeto*
- b) *Cómo vemos azul un objeto*
- c) *Cómo vemos amarillo un objeto*
- d) *Cómo vemos verde un objeto*
- e) *Cómo vemos negro un objeto*

De la misma forma que hemos razonado en la actividad anterior, también podemos enfrentarnos a explicar el comportamiento de los filtros coloreados de acetato con los que se pueden obtener haces de luz de color.

A.53 Cuando un haz de luz blanca atraviesa un filtro coloreado, vemos en una pantalla una mancha luminosa del color con que vemos el filtro. Explicad este fenómeno.

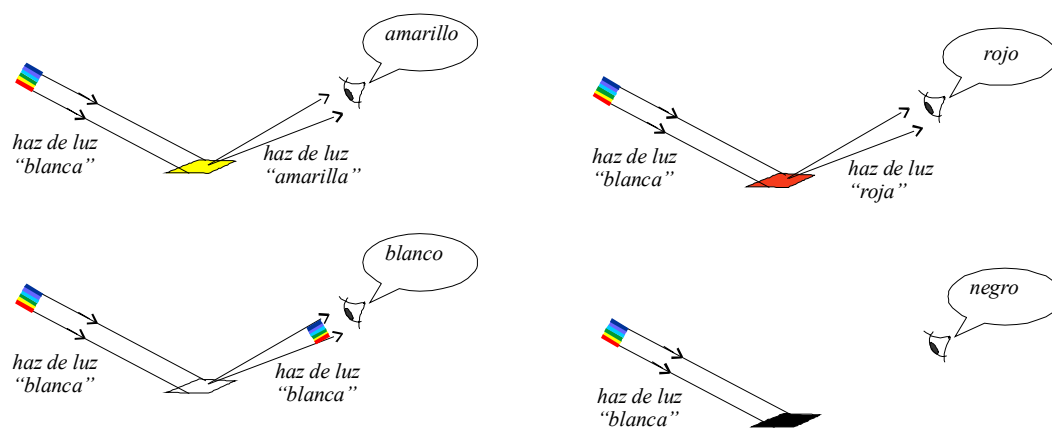


Comentarios A.52 y A.53. En estas actividades abordamos el segundo eslabón de la cadena de cambios que proponía Chauvet (1996) y, para ello, buscaremos razonamientos que respondan a las cuestiones: ¿cuál es el resultado de la interacción de la luz con la materia? y ¿cuál es la composición de la luz transmitida o difundida?, aunque las respuestas a esta última cuestión deberán ser matizadas posteriormente.

Después de las actividades anteriores esperamos que los estudiantes puedan proponer una hipótesis sencilla de interacción de la luz blanca con la materia según la cual vemos blanco un objeto al ser iluminado con luz blanca cuando todos los tipos de luz que la componen son difundidos por el objeto después de incidir la luz en él. Análogamente, se verá azul, verde, rojo, cyan o amarillo cuando el objeto difunda ese tipo de luz hasta el ojo del observador y el resto de luces del espectro de la luz blanca sean absorbidas. Por último, diremos que es negro cuando el objeto absorba todos los tipos de luz. Dado que los objetos que llamamos negros son vistos por contraste con el fondo donde se encuentran, algunos alumnos, irreflexivamente, podrán opinar que el objeto negro difunde luz negra, lo que será fácil de desmontar con la hipótesis de interacción de la luz blanca con la materia ya que en su espectro no existe luz negra.

De forma similar, en A.53 supondremos que el filtro coloreado deja pasar el tipo de luz con que lo vemos y absorbe el resto del espectro. Es posible que esta hipótesis compita en las discusiones de clase con la idea de la modificación de la luz al interactuar con la materia, en ese caso, el profesor podrá sugerir a los estudiantes que intenten explicar con ese posible comportamiento de la luz el espectro de colores que se forma cuando un haz de luz blanca atraviesa un prisma de vidrio y el experimento *in crucis*.

Según la propuesta de visión de color que se desprende de los razonamientos anteriores, el ojo deberá tener poder de discriminación y reconocimiento de cada tipo de luz del espectro. El esquema que representa esta interpretación de la visión del color sería:



No obstante la potencia de la hipótesis de la heterogeneidad de la luz blanca y los límites de la propuesta de interacción de la luz con la materia para explicar la visión del color van a ser pronto puestos en cuestión y van a necesitar modificaciones ya que, si bien todo tipo de luz incidente en el ojo produce una sensación de color, no todas las sensaciones de color pueden ser interpretadas como consecuencia de un tipo de luz del espectro de la luz blanca. Los tonos rosas, púrpuras o magentas no se corresponden con ningún tipo de luz del espectro analizado. En caso de que en las discusiones de estas actividades surja la cuestión de la visión de esos colores deberá ser aplazada hasta la A.54 y siguientes donde nos enfrentaremos a ellas.

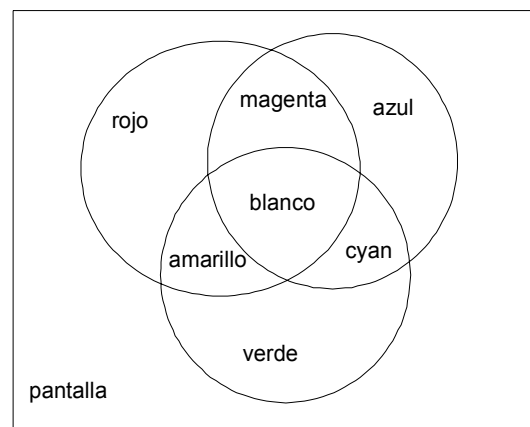
A partir de la hipótesis de la heterogeneidad de la luz blanca y de la absorción por los objetos de parte del espectro de la luz blanca que los ilumina hemos elaborado una primera explicación de la visión del color, sin embargo, la visión humana percibe colores que no se encuentran en el espectro de la luz blanca, lo que hace necesario profundizar en ella y/o modificarla.

A.54 Suponiendo que un filtro o un objeto iluminado absorbe parte del espectro de la luz blanca y reemite otra parte podemos explicar la visión de algunos colores, pero ¿cómo explicar que veamos tonos magentas³ si no existe luz de ese tipo en el espectro de la luz blanca?

Si la luz blanca está formada por los distintos tipos de luz que componen el espectro (del rojo al violeta), y los objetos difunden sólo parte de él hasta el ojo, la visión de los colores que no se corresponden con ninguna luz del espectro habrá que buscarla en la fisiología del ojo humano. Por otro lado, se conocen experiencias con luces de color que sugieren que cuando al ojo llegan varios tipos de luz, es posible ver un color diferente de las luces que le llegan. Una de ellas, conocida como síntesis aditiva del color, fue la base para la elaboración de la teoría de la visión del color aceptada actualmente.

A.55 Al proyectar sobre una pantalla tres tipos de luces: rojo-anaranjado, verde y azul-violáceo, se puede percibir en las zonas de confluencia colores diferentes a los de las luces emitidas. Observad la experiencia realizada por el profesor, coloread la figura tal como se ve en el experimento y dad una interpretación.

A partir de estos experimentos, Thomas Young, en 1802 (Sanz,1993), propuso la teoría tricromática de la visión del color, según la cual en la retina del ojo humano deberían existir tres tipos de células especializadas del color, cada una de las cuales sería sensible a cada uno de los tipos de luz de esa experiencia.

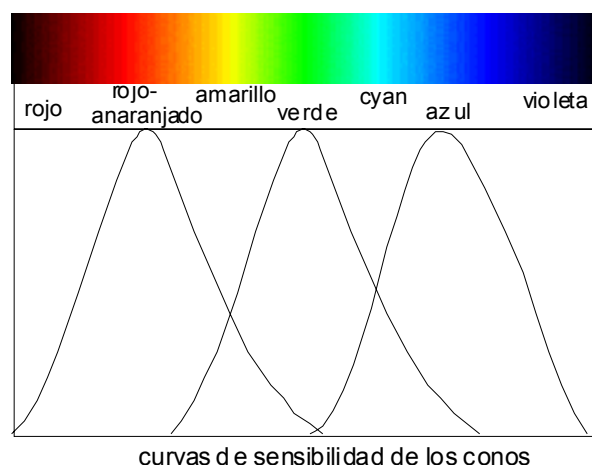


Recientemente se han realizado observaciones microscópicas de la retina y se ha medido la respuesta de estas células (los conos) a cada uno de los tipos de luz que

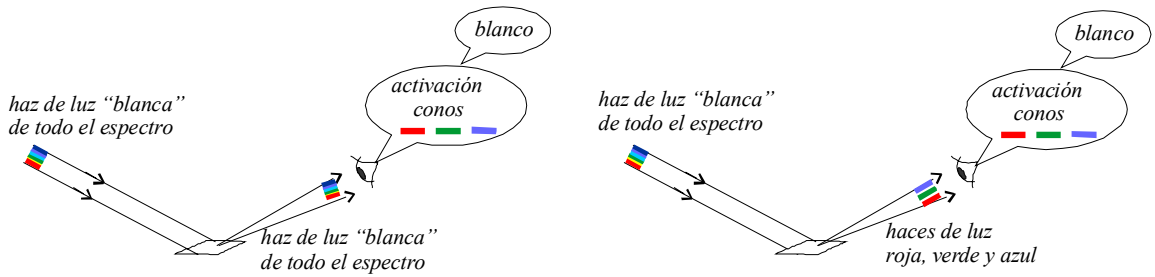
³ El tono magenta se le conoce también por rosa, púrpura o carmín.

propuso Young. Además, en la retina, existen otras células llamadas bastones que responden de forma distinta según la intensidad luminosa, por lo que distinguimos los objetos más o menos iluminados.

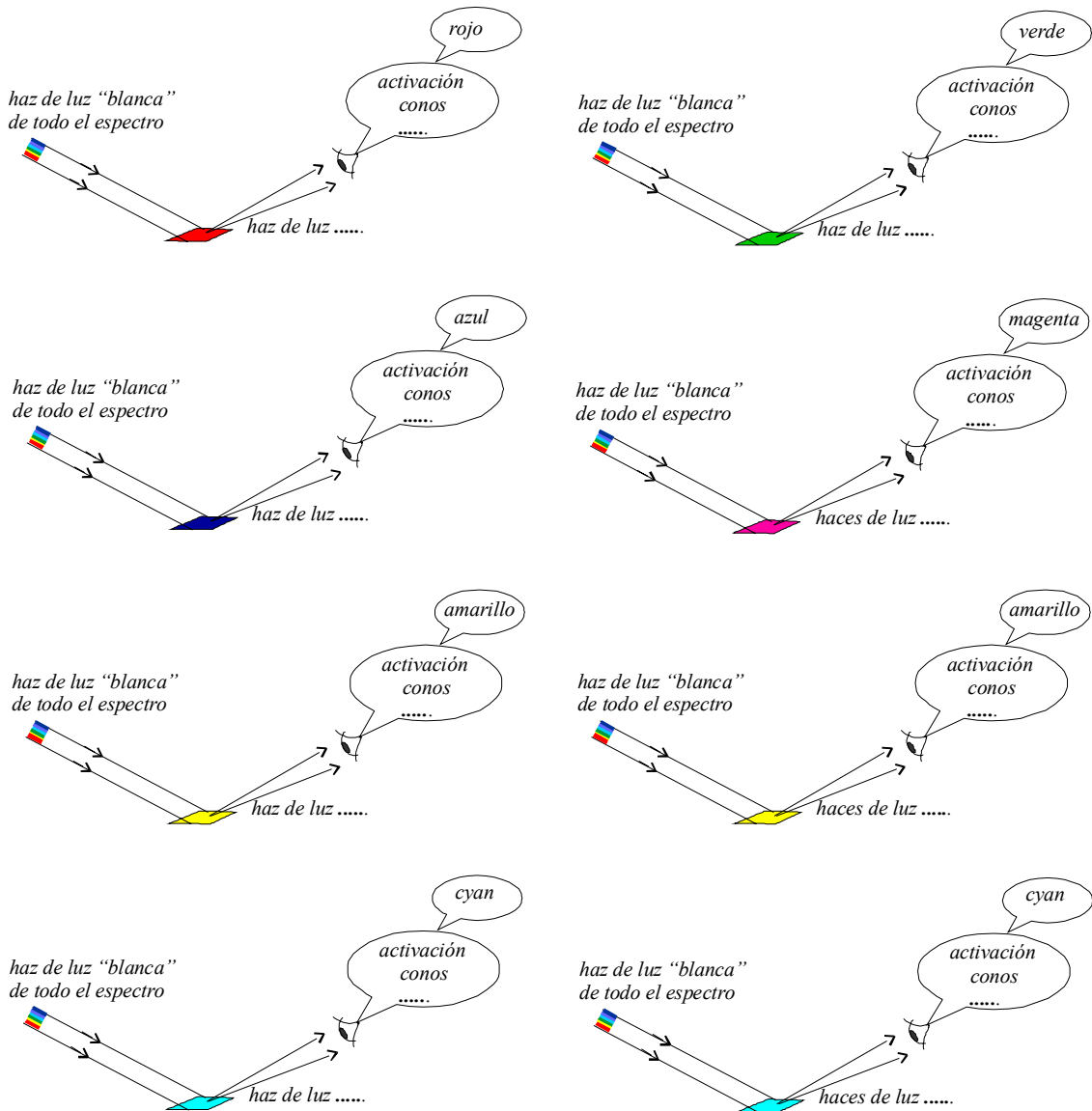
En la figura siguiente se representan las curvas de sensibilidad de cada uno de los conos de la retina. Uno de estos conos presenta un máximo de sensibilidad a un tipo de luz rojo-anaranjado, otro presenta el máximo de sensibilidad a la luz verde y el otro a la luz azul-violácea. Según la teoría tricromática de la visión de los colores, cuando a la retina llega cualquier tipo de luz, la respuesta de los tres tipos de conos, según su diferente sensibilidad espectral, provoca en el cerebro la sensación de los distintos colores que somos capaces de distinguir. Cómo se observa en las curvas de sensibilidad de cada uno de los conos, la respuesta es máxima para un determinado tipo de luz, pero cada cono también responde para otras luces del espectro próximas.



La teoría tricromática para la visión de los colores, modifica en parte los razonamientos que habíamos hecho basándonos en la hipótesis de Newton, de forma que, a partir de ahora, podemos decir que vemos un objeto blanco cuando la luz que difunde hasta el ojo activa los tres tipos de conos de la retina. Esta activación se puede realizar, con una mezcla de todos los tipos de luz del espectro, o con otras muchas distribuciones, la más sencilla es la observada en el patrón de colores de la síntesis aditiva, en la que se obtiene la sensación de blanco cuando llegan al ojo sólo tres tipos de luz: rojo-anaranjado, verde y azul-violácea. Suponiendo que se ilumina el objeto con luz blanca habitual que contiene todas las luces del espectro, representamos estas ideas en los esquemas siguientes:

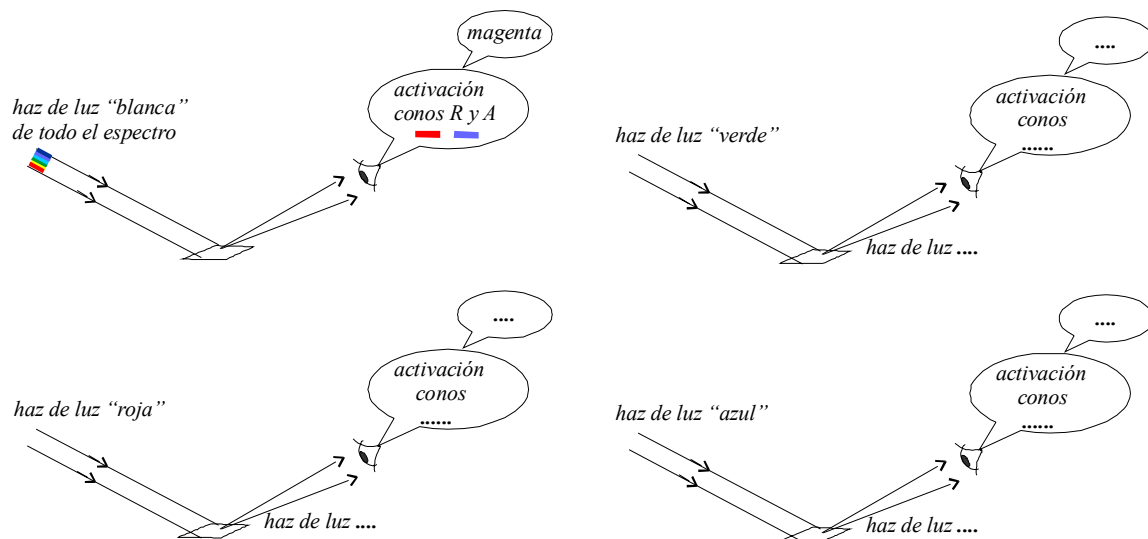


A.56 Suponiendo que se ha iluminado con luz blanca que contiene todos los tipos de luz del espectro, aplicad la teoría tricromática de la visión de los colores completando los esquemas siguientes que explican cómo vemos rojo, verde, azul, magenta, amarillo (dos posibilidades) y cyan (dos posibilidades):

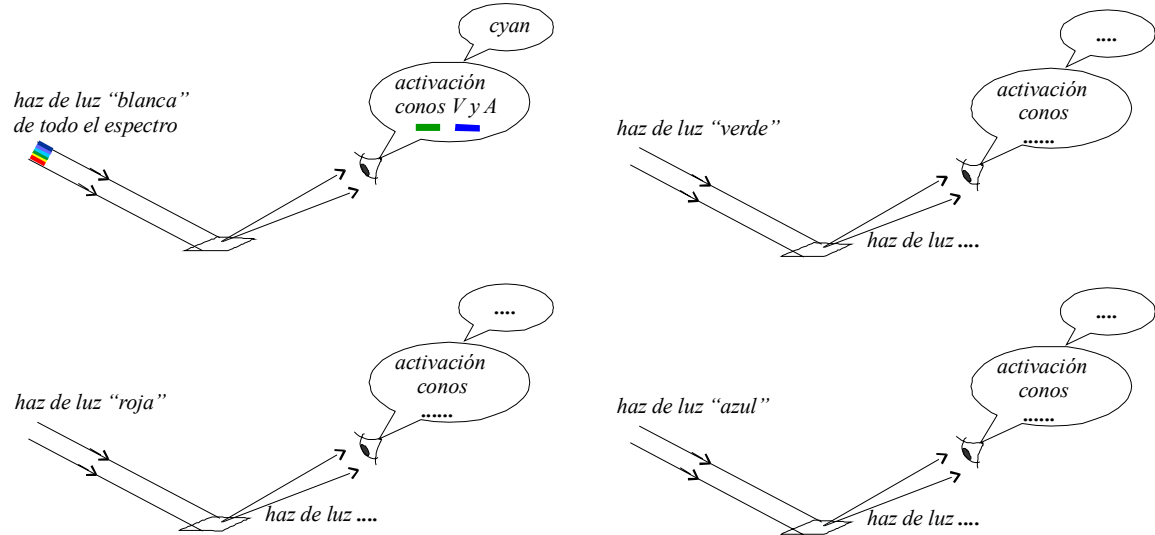


La teoría tricromática permite explicar como vemos el color de los objetos cuando están iluminados con la luz blanca habitual con la que solemos verlos, incluso los tonos magentas, pero, tal y como planteamos a principio de este apartado, tenemos experiencias en las que los objetos pueden ser vistos de un color diferente del habitual cuando están iluminados con otros tipos de luces. La teoría tricromática también debe explicar estas observaciones.

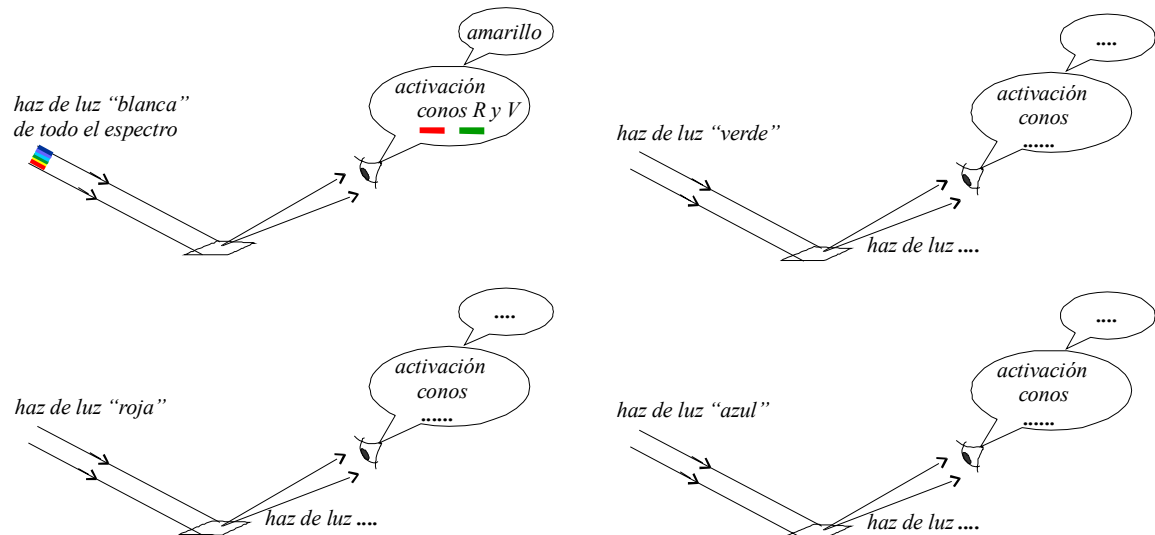
A.57.1 Iluminando un objeto con luz blanca lo vemos magenta. Explicad, completando los esquemas, de qué color se verá cuando lo iluminemos con: a) luz roja, b) luz verde y c) luz azul. Confirmad vuestras predicciones experimentalmente.



A.57.2 Iluminando un objeto con luz blanca lo vemos cyan. Explicad, completando los esquemas, de qué color se verá cuando lo iluminemos con: a) luz roja, b) luz verde y c) luz azul. Confirmad vuestras predicciones experimentalmente.

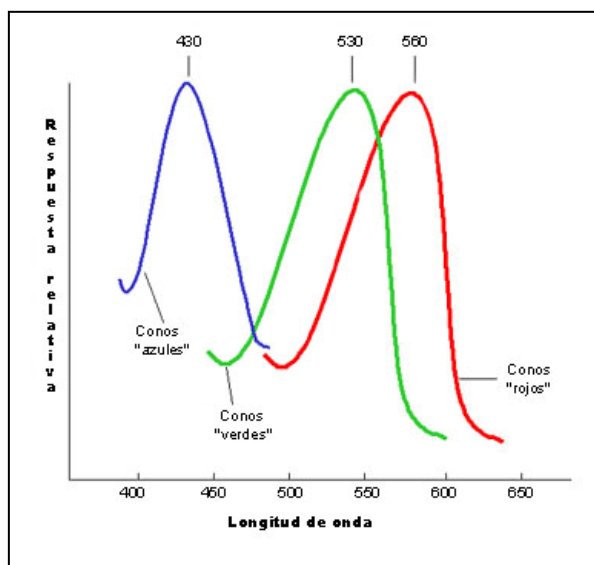


A.57.3 Iluminando un objeto con luz blanca lo vemos amarillo. Explicad, completando los esquemas, de qué color se verá cuando lo iluminemos con: a) luz roja, b) luz verde y c) luz azul. Confirmad vuestras predicciones experimentalmente.



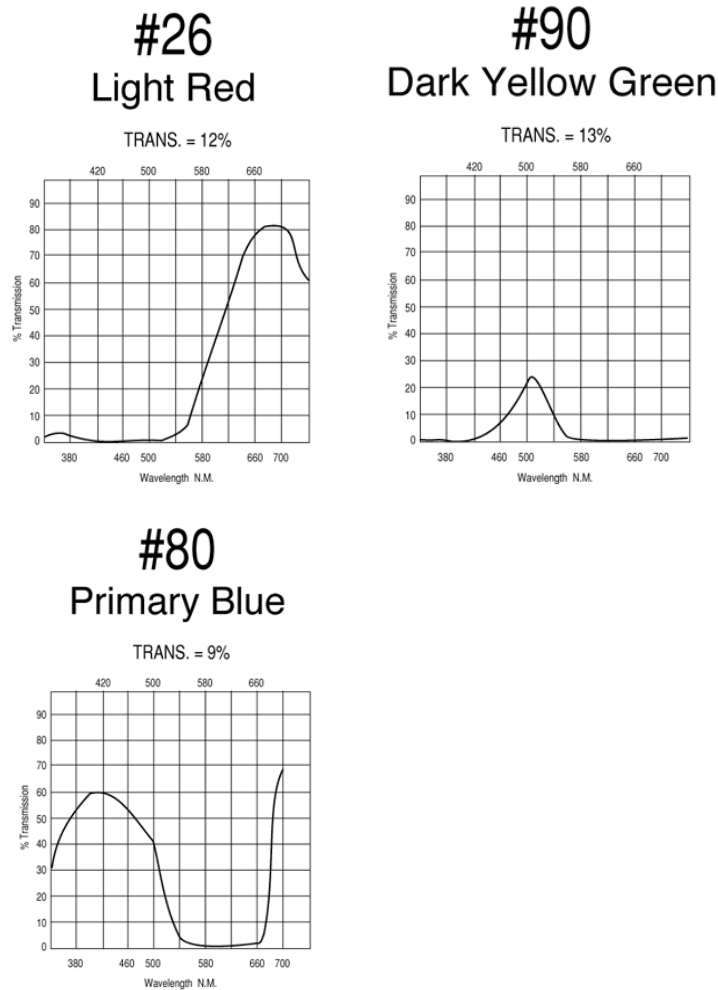
Comentarios de A.54 a A.57. En A.54 es de esperar que los estudiantes interpreten la visión de los colores magentas debido a las “mezclas” de diferentes tipos de luz. Estas mezclas pueden tener para los estudiantes el mismo significado que las de las pinturas o las de lápices de colores que han podido realizar en las clases del área de Plástica. Pueden pensar que estas mezclas se realizan sobre el objeto, en el espacio o en el interior del ojo. Una experiencia que el profesor puede realizar en clase para cuestionar estas ideas consiste en hacer cruzar dos haces de luz de distinto color que se proyectan sobre sendas pantallas y llamar la atención de que los haces de luz llegan a las respectivas pantallas sin alterar “su color”, con lo que ninguno se “mezcla” o coge alguna propiedad del otro cuando se cruzan. Estas experiencias negativas de sus expectativas pueden permitir acercar a los estudiantes a admitir la hipótesis de Young, según la cual el cerebro debe elaborar un conjunto de diferentes sensaciones de color a partir de tres tipos de luces incidentes. La respuesta de los tres tipos de conos en función de la longitud de onda de la luz incidente según las normas CIE (www.cie.co.at) presenta un máximo para las longitudes de onda 437 nm, 533 nm y 564 nm y su variación en función del tipo de luz incidente se muestra a continuación.

La síntesis aditiva que se propone interpretar en A.55 se puede realizar en clase con filtros para la iluminación de espectáculos existentes en el mercado y con tres proyectores de diapositivas o contruoidos para tal fin. Cada proyector se puede construir con un tubo metálico en cuyo extremo se coloca una lente convergente de 10 dioptrías y a unos 9 cm una lámpara halógena dicróica de 12V y 50 W. En nuestras experiencias hemos utilizado el dispositivo que se muestra en la fotografía.

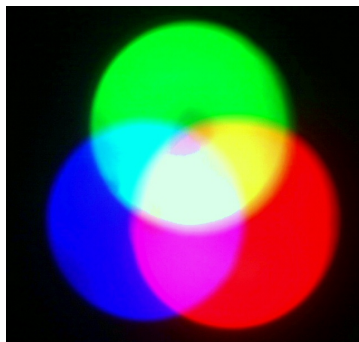


Para la obtención en una pantalla del patrón de colores exacto de la síntesis aditiva, deben utilizarse tres tipos de luz cuyas longitudes de onda se encuentren en un estrecho margen alrededor del máximo de sensibilidad de cada uno de los conos, y que se pueden obtener con tres proyectores láser adecuados, lo que se aleja de los materiales y condiciones de un laboratorio escolar. Nosotros hemos recurrido a filtros de supergel de la marca “Rosco” que se usan para la iluminación de espectáculos y que producen un patrón de colores para la síntesis aditiva con suficiente aproximación. En concreto se han utilizado el filtro rojo-anaranjado nº

26, el filtro verde nº 90 y el filtro azul-violáceo nº 80 cuyas curvas de transmisión son las siguientes:



El patrón de colores de la síntesis aditiva con estos materiales se muestra en la fotografía:



síntesis aditiva de los colores



montaje de focos utilizados

Después de estas observaciones es de esperar que los estudiantes interpreten la visión de los colores separando el tipo de luz recibida de la sensación de color producida. Recordaremos aquí, si fuera necesario, que la pantalla reemite toda la luz incidente, por lo que si una zona ha sido iluminada con luz roja y con luz verde, la pantalla reemite luz roja y luz verde y la sensación de amarillo que percibimos se deberá a algún mecanismo del interior del ojo y/o del cerebro. Como consecuencia, la sensación de amarillo puede obtenerse de dos formas: al llegar al ojo luz amarilla o al llegar luces roja y verde. De manera similar se interpretaría la sensación de color cyan y, en el caso del magenta, llamaremos la atención de que este color no se corresponde con ningún tipo de luz del espectro de la luz blanca y se percibe cuando al ojo llega luz azul y luz roja. Los diferentes tonos de magenta, de cyan o de amarillo se pueden apreciar variando la intensidad de la luz de los respectivos focos. Por último, hay que destacar que la sensación de blanco se elabora al llegar al ojo estos tres tipos de luces sin necesidad del resto de los tipos de luz presentes en su espectro.

Las actividades A.56 y A.57 son actividades de aplicación de la teoría tricromática de la visión de los colores y que permitirán superar los dos problemas que hemos detectado en este apartado, cuales son la percepción de los tonos magentas que no se corresponden con ningún tipo de luz del espectro de la luz blanca y el cambio de color que se observa cuando se ven los objetos iluminados con luces de color.

La teoría tricromática ha sido capaz de explicar el color con que vemos los objetos, incluso cuando son iluminados con luces de color, distintas de la luz blanca habitual de las lámparas o la luz natural de día. Sin embargo, los tipos de luces con las que se hace la síntesis aditiva, que se corresponden con la sensibilidad de los conos de la retina, no son los colores primarios que se usan en las mezclas de pinturas. Por ejemplo, desde niños se nos enseña a mezclar tres pinturas de color primarios: amarillo, cyan y magenta. Convendrá recordar el color que se obtiene en las mezclas:

A.60 Coloreando en un folio blanco con lápices amarillo, cyan y magenta ¿Qué color se obtiene al mezclar dos cualesquiera de ellos? ¿y los tres juntos?

La explicación más sencilla de estas experiencias conocida como síntesis sustractiva, procede de considerar que la pintura sobre el papel blanco actúa como un filtro, de forma que la pintura amarilla absorbe los tonos azules del espectro y la luz que

difunde, por tanto, activa a los conos sensibles a la luz roja y a los conos sensibles a la luz verde. De manera similar, la pintura cyan absorbe la luz roja del espectro y difunde el resto por lo que activa a los conos sensibles a la luz verde y a la luz azul. Por último, la pintura magenta actúa al pintar sobre un papel blanco como un filtro de la luz verde, por lo que la luz que difunde activa a los conos sensibles a la luz roja y los conos sensibles a la luz azul. Estas explicaciones están suficientemente contrastadas ya que haciendo pasar la luz difundida por las pinturas de colores primarios a través de un prisma se puede ver en el espectro resultante la ausencia del tipo de luz que hemos señalado en cada caso. Aplicando esta función de filtro de cada uno de los colores primarios podemos enfrentarnos a explicar el color resultante de las mezclas de pinturas.

A.61 Explicar el color que se obtiene al mezclar de dos en dos las pinturas de los colores primarios y cuando se mezclan los tres.

Las explicaciones que hemos dado y que permiten comprender, en multitud de ocasiones, cómo vemos el color, no resuelven completamente el problema ya que existen otros muchos fenómenos inexplicados. Por ejemplo, podemos iluminar una pantalla con una luz roja y, si la habitación está semiiluminada con luz blanca, en la zona de la pantalla de alrededor de la mancha roja se ve una coloración cyan. Si la iluminamos con luz azul, en los alrededores vemos coloración amarilla, etc. En general, la sensación de color depende, no sólo del tipo de luz y de la respuesta de los conos de la retina sino, también, del entorno donde se encuentre el objeto y de la propia forma en cómo se elabora la sensación a nivel cerebral. Estos fenómenos inexplicados son objeto de investigación en la actualidad.

SEGUNDA PARTE

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE LA SECUENCIA DE
ENSEÑANZA PROBLEMATIZADA SOBRE LA LUZ Y LA VISIÓN
EN LA ESO**

CAPÍTULO 7

¿SE FAVORECERÁ DE ESTE MODO UN APRENDIZAJE CON COMPRENSIÓN DEL TEMA Y UNA MEJORA EN LAS ACTITUDES DE LOS ALUMNOS? ¿SE PRODUCIRÁN MEJORAS NOTABLES RESPECTO A LA SITUACIÓN ACTUAL?

Ya hemos mostrado que los estudiantes tienen ideas y razonamientos sobre las metas parciales para comprender *cómo vemos* que deben contemplarse si deseamos que se apropien de las mismas, que dichas ideas y razonamientos son persistentes a la enseñanza habitual y que son similares, básicamente, a los obstáculos que se derivan del estudio histórico y epistemológico de la luz y la visión.

La secuencia de enseñanza diseñada según una lógica problematizada contempla las características de la enseñanza por investigación reseñadas por D. Gil (1993) que en síntesis son:

- El planteamiento inicial de situaciones problemáticas abiertas que generen interés y proporcionen una primera aproximación a la tarea a realizar.
- El estudio cualitativo de las situaciones problemáticas planteadas y la toma de decisiones para acotar y abordar los problemas de forma precisa, lo que proporciona ocasiones de explicitar las ideas de los alumnos.
- La orientación al tratamiento científico de los problemas, lo que conlleva: la emisión de hipótesis e invención de conceptos y modelos, la elaboración de estrategias y diseños experimentales para su contrastación y el análisis de resultados (que puede ocasionar situaciones de conflicto cognitivo y reestructuración de las ideas iniciales).
- El manejo reiterado de los nuevos conocimientos en una variedad de situaciones para hacer posible la profundización de los mismos, su capacidad predictiva, sus relaciones con las mejoras técnicas y sociales, ...
- La elaboración de síntesis y recapitulaciones problematizadas donde se expliciten los avances conseguidos y los nuevos problemas a abordar,...

En esta propuesta de enseñanza por investigación orientada, los estudiantes no son considerados, en absoluto, investigadores autónomos, sino organizados en pequeños grupos de trabajo asesorados y dirigidos en todo momento por el profesor experto en la estructura problematizada del tema a tratar (Gil y Martínez Torregrosa, 1987; Gil y Carrascosa, 1994). Es necesario matizar que en la unidad didáctica sobre la luz y la visión, dirigida a la etapa obligatoria de la enseñanza secundaria, se abordan fundamentalmente actividades de tipo cualitativo y los diseños experimentales no requieren sofisticación instrumental, sin embargo, no por ello, se alejan de un plan estrictamente investigativo.

7.1 Formulación y justificación de la segunda hipótesis

En el campo de la física y química, la enseñanza por investigación orientada ha mostrado resultados esperanzadores al desarrollar propuestas sobre la manera de abordar la resolución de problemas de lápiz y papel (Martínez Torregrosa, 1987; Gil y Martínez Torregrosa, 1983), los trabajos prácticos (Gil y Paya, 1988; Payá, 1991), la forma de introducir los conceptos (Carrascosa, 1987; Gil y Carrascosa, 1990) y las características que debe satisfacer la evaluación como instrumento de impulso del aprendizaje (Alonso, 1994; Alonso et al. 1996). También se han presentado propuestas sobre cómo estructurar los temas de forma que queden integrados todos los aspectos anteriores (Verdú et al., 2001; Verdú, 2004) que ya han aportado resultados en la elaboración de temas concretos (Doménech, 2000; López-Gay, 2002; Martínez-Sebastián, 2002; Becerra, 2004).

Por nuestra parte, esperamos mostrar que el tema sobre la luz y la visión que hemos elaborado y que se presenta en la primera parte de esta memoria, también produce mejoras importantes respecto a la situación actual. Es decir, de un modo genérico –que posteriormente precisaremos– nuestra segunda hipótesis afirma que:

"La puesta en práctica de la secuencia de actividades propuesta para la enseñanza de la luz y la visión produce mejoras sustanciales respecto a la enseñanza habitual".

La fundamentación realizada en la primera parte de esta memoria hace innecesario, en nuestra opinión, reiterar por qué esperamos que esto ocurra. Si

acaso, señalar que dadas las carencias de la enseñanza habitual que hemos puesto de manifiesto tras nuestro análisis de los libros de texto habituales (véanse tablas 5.18a y 5.18b, pag. 194 y 197) coincidentes, en parte, con las señaladas por otros autores (Hirn y Viennot, 2000), y de las carencias de los profesores y su forma estructurar la enseñanza (véanse tablas 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 pag. 180-189), parece obvio que esperemos mejoras en la comprensión de los conceptos y, una disminución de los obstáculos asociados a la comprensión del modelo de visión de Kepler.

Sin embargo, no debemos minusvalorar los aspectos actitudinales y metacognitivos intrínsecamente relacionados con los conceptuales. En un ambiente colectivo de búsqueda de un modelo de visión, con un plan de investigación explícito, donde se tienen oportunidades para expresar y discutir las ideas iniciales, tratar las contradicciones, donde existen ocasiones de poner a prueba los nuevos conocimientos, donde la evaluación recoge aspectos de autorregulación, etc., es de esperar que los alumnos mejoren la comprensión de los conceptos implicados, y, a la vez que adquieran actitudes positivas hacia el aprendizaje de conocimientos científicos. La importancia en el proceso de enseñanza-aprendizaje que tiene la mejora de estos últimos aspectos viene siendo resaltada desde diferentes líneas de investigación (Novak, 1988; White et al., 1989; Bransford et al., 2000).

7.2 Operativización de la segunda hipótesis

Podemos, pues, extraer, al menos, cuatro derivaciones de esta segunda hipótesis, esto es, la "mejora sustancial" de la puesta en práctica de la secuencia de enseñanza problematizada se concretará en que:

H2.1. Generará oportunidades en el aula favorecedoras de un aprendizaje con comprensión.

Esta derivación deberá ser puesta a prueba mediante el análisis de lo que ocurre en la clase durante su práctica y la evaluación de los materiales producidos por los alumnos a lo largo de la secuencia.

H2.2. Producirá una mayor comprensión conceptual.

Lo que se pondrá de manifiesto al comparar los porcentajes de los alumnos tratados y no tratados que alcanzan la comprensión de cada una de las metas parciales del modelo de visión de Kepler y, también, los porcentajes que adquieren un nivel global de comprensión.

H2.3. Propiciará una mejora en las actitudes de los alumnos.

Lo que se manifestará por mejores indicadores de apropiación (orientación, interés, sensación de avance, expectativas positivas, ..) (Verdú, 2004) en los alumnos tratados que en los no tratados.

H2.4. Generará expectativas muy positivas sobre su potencialidad para mejorar la enseñanza y el aprendizaje en aquellos profesores que participan en cursos de formación donde pueden desarrollar, (re)elaborar y reflexionar sobre dicha secuencia.

Lo que se manifestará porque los profesores, después de finalizar un curso de formación sobre la óptica geométrica donde se les instruye en la unidad didáctica con estructura problematizada:

- Valoran positivamente aspectos genuinos de la estructura problematizada del tema presentado.
- Perciben que dicha forma de planificar la enseñanza de la óptica geométrica en la ESO producirá mejoras en la apropiación de los alumnos, el aprendizaje de conocimientos ricos y estructurados y en las actitudes de los propios profesores.
- Reconocen que la estrategia y el tratamiento de los conceptos ópticos implicados en la (re)construcción del modelo de visión de Kepler que se han seguido en la secuencia didáctica son apropiados.

7.3 Diseños experimentales para la contrastación de la 2ª hipótesis

7.3.1 Diseño experimental para analizar en qué medida se generan oportunidades favorecedoras de un aprendizaje con comprensión en el desarrollo de la secuencia de enseñanza

El análisis de lo que ocurre en la clase durante la secuencia de enseñanza es un aspecto esencial para el profesor ya que da oportunidad para reorientar la actividad de los alumnos, corregir errores comunes, incluso rediseñar las próximas actividades. Fruto de nuestras investigaciones y ensayos previos o de las aportaciones publicadas en este campo, en el capítulo 6, se ha comentado con detalle lo que esperamos que ocurra en cada una de las actividades de nuestra secuencia, resaltando las dificultades de los estudiantes, incluso orientando posibles estrategias en la actividad del profesor o proponiendo alternativas de ampliación o refuerzo en situaciones conflictivas. Tras los dos primeros cursos de prueba y los registros consecuentes, lo que hemos expresado en los comentarios de las actividades como expectativas se acerca mucho a lo que sucede “en vivo” durante el desarrollo de las clases, podemos, pues, decir que lo que esperamos que ocurra es lo que, en base a nuestra experiencia, ocurre y deseamos que ocurra. Por ello, describir aquí las aportaciones de los alumnos en cada una de ellas no aporta información adicional a lo ya expuesto entonces. Sin embargo, con objeto de mostrar que la secuencia de enseñanza genera oportunidades para que se produzca un aprendizaje con comprensión, sí analizaremos los trabajos de los alumnos en aquellos momentos claves en los que realizan recapitulaciones sobre lo avanzado en el tema. De las tres actividades de recapitulación que están previstas en la secuencia de enseñanza, hemos seleccionado dos de ellas, ya que la tercera, al final de la misma, coincide en el tiempo con el cuestionario de evaluación conceptual que comentaremos en el apartado siguiente.

Con esa intención hemos analizado las aportaciones de los alumnos en las recapitulaciones solicitadas en la A.17 y en la A.26 de la secuencia de actividades (páginas 228 y 237) para valorar:

- a) El avance conceptual logrado hasta ese momento y sus carencias más importantes.
- b) La calidad del texto elaborado y
- c) El grado de orientación con que los alumnos abordan estos trabajos.

Aunque hemos separado los dos primeros aspectos, cabe señalar, que los considerados íntimamente unidos. Existe un amplio consenso en considerar que hablar y escribir sobre contenidos científicos implica la comprensión de los mismos y que, a la vez, la comprensión de las ideas científicas se consigue en la medida que se habla, se piensa y se escribe sobre ellas (LemKe, 1997; Jorba, et al., 2000; Osborne et al., 2004). Por otro lado, con el tercer criterio pretendemos valorar si los alumnos dan muestras de saber qué problema orienta su trabajo, qué estrategia han seguido o qué queda por hacer. Todos ellos, importantes indicadores de que la secuencia de enseñanza favorece el aprendizaje con comprensión.

El avance conceptual será valorado mediante los indicadores de comprensión del modelo de visión de Kepler adquiridos por los estudiantes en el momento de la recapitulación. La calidad del texto será valorada por el número de frases con sentido que escriben y el número de ellas que pueden ser consideradas como ideas *argumentadas* que apoyan el modelo. El grado de orientación de los alumnos en el trabajo de la secuencia didáctica será analizado en función de sus respuestas a cuestiones que se incluyen en los enunciados de las recapitulaciones (plantear el problema estructurante que organiza el tema, describir la estrategia seguida o plantear nuevos problemas).

Para elaborar un estadillo que permita analizar con detalle los trabajos de recapitulación realizados por los alumnos y concretar los aspectos a valorar, recogemos a continuación el enunciado de estas actividades y lo que se espera de sus trabajos en el momento en que se realizan. Designaremos a estas recapitulaciones como el instrumento **C6-a**.

Enunciado de la primera actividad de recapitulación individual (C6-a)

A.17 A modo de recapitulación de lo tratado hasta aquí, explica cómo vemos un objeto situado en una habitación iluminada.

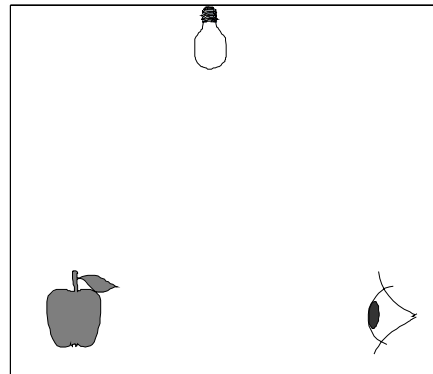
Para ello:

e) Dibuja un diagrama de rayos en el cuadro del margen.

f) Enuncia las hipótesis que hemos formulado para elaborar el modelo de visión referidas a las fuentes luminosas, a la propagación de la luz y al papel del ojo, etc.

g) Da argumentos justificativos que apoyen esas hipótesis.

h) Plantea los nuevos interrogantes que vamos a abordar a continuación.



Para elaborar un conjunto de ítems de valoración de las recapitulaciones de los alumnos recurriremos al cuadro 3.2 (pag. 79) donde se recogen los indicadores de comprensión o pasos necesarios para comprender el modelo de visión de Kepler. Los indicadores implicados en lo estudiado hasta este momento y sus consecuencias contrastables son:

Cuadro 7.1 Indicadores de comprensión del modelo de Kepler que los alumnos podrían haber adquirido tras la primera recapitulación

A. Concebir la visión a partir de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo.

Lo que supone:

A₁. Describir el proceso de visión directa e indirecta a partir de la luz que llegue al ojo procedente del objeto.

A₂. Saber que los objetos que vemos emiten luz y son, por tanto, fuentes secundarias de luz.

A₃. Concebir la luz como una entidad física con existencia independiente en el espacio separada de las fuentes primarias y/o secundarias y del ojo del observador.

B. Disponer de un esquema de representación geométrico e idealizado de propagación de la luz potencialmente explicativo, según el cual:

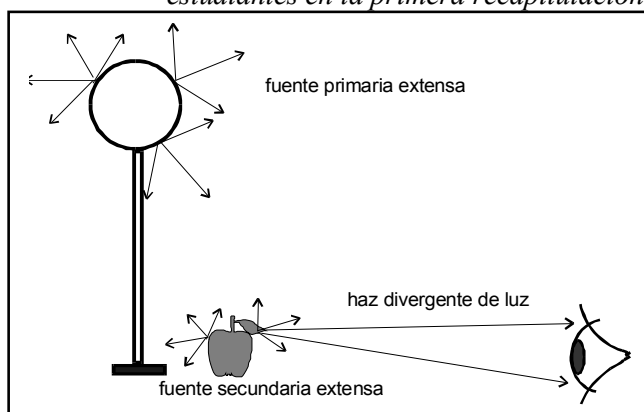
B₁ Los rayos son conceptos ideales no visibles (ni la propia luz) que sólo representan cada una de las direcciones de propagación de la luz.

B₂ Desde cada fuente puntual la luz es emitida en todas las direcciones (esféricamente). Un haz de luz es parte de la esfera de luz emitida.

B₃ Las fuentes luminosas extensas (primarias o secundarias) se pueden idealizar como conjuntos de fuentes luminosas puntuales.

El diagrama que, como máximo, pueden realizar los alumnos en la primera recapitulación y que recoge las hipótesis básicas del modelo hasta este momento es el de la figura 7.1.

Figura 7.1: Diagrama que pueden haber adquirido los estudiantes en la primera recapitulación



La segunda recapitulación se propone después de haber estudiado el comportamiento del ojo, modelizándolo como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla, y habiendo introducido el concepto de imagen óptica en visión directa.

Enunciado de la segunda actividad de recapitulación individual (C6-a)

A.26 Realizad una recapitulación de tema que estamos estudiando en donde se recoja:

- f) ¿qué problema hemos planteado?
- g) ¿qué estrategia hemos seguido?
- h) ¿cómo explicamos la visión directa de los objetos?
- i) ¿qué hipótesis hemos realizado respecto a las fuentes luminosas, al comportamiento de la luz y al comportamiento del ojo?
- j) ¿qué problemas vamos a abordar como consecuencia del modelo de visión directa elaborado?

En esta recapitulación, además de las cuestiones referidas a la orientación en el tema (reconocer el problema planteado, la estrategia seguida, etc.) se solicitan de nuevo las hipótesis básicas en la que se asienta el modelo (ya citadas en la primera recapitulación) y los aspectos referentes al tercer indicador de comprensión siguientes:

Cuadro 7.2 Nuevos indicadores de comprensión del modelo de Kepler que los alumnos podrían haber adquirido tras la segunda recapitulación

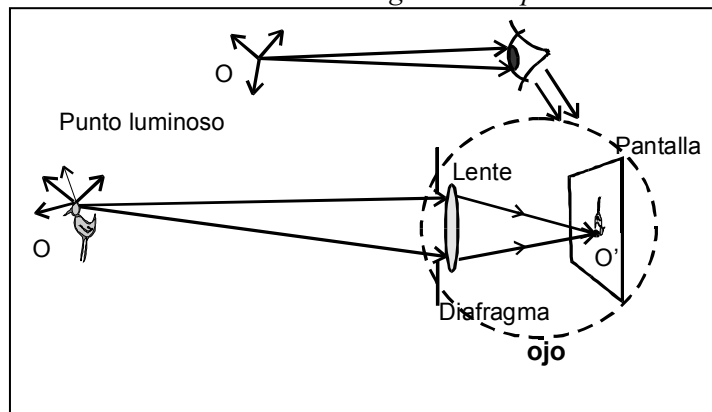
C. Saber qué es una imagen óptica y cómo se forma (en el modelo de Kepler). Lo que supone:

C₁. Conocer que el ojo es un instrumento óptico formador de imágenes en la retina que puede ser modelizado como un sistema formado por un lente y una pantalla. La imagen retiniana aporta información sobre la forma, tamaño, color y lejanía (perspectiva) del objeto que vemos.

C₂. Considerar que en visión directa la imagen se obtiene cuando un haz divergente de luz emitido por cada punto de la fuente luminosa entra en el ojo y converge en un punto de la retina.

El diagrama donde se recogen las hipótesis básicas del modelo de visión directa elaborado hasta este momento y los conceptos más importantes se representan en la figura 7.2.

Figura 7.2: Diagrama que pueden haber adquirido los estudiantes en la segunda recapitulación



En base a los comentarios y esquemas anteriores hemos elaborado el siguiente estadillo para analizar las recapitulaciones de los estudiantes (**C6-a**).

Cuadro 7.2: Estadillo para analizar las recapitulaciones A.17 y A.26 (C6-a)

<i>Ideas sobre la relación entre el objeto, la luz y el ojo presentes en las recapitulaciones A.17 y A.26:</i>		
- El objeto es una fuente secundaria de luz.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- La luz es una entidad independiente que viaja en el espacio.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- El ojo es receptor de luz	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
<i>Ideas sobre la representación geométrica e idealizada de la luz presentes en las recapitulaciones A.17 y A.26:</i>		
- La luz se propaga en línea recta.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- La luz no es visible en sí misma.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- Las fuentes extensas son consideradas como conjuntos de fuentes puntuales	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- La luz que sale de cada punto de la fuente luminosa se representa mediante haces divergentes.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
<i>Ideas sobre la formación de la imagen óptica del modelo de Kepler presentes en la recapitulación A.26:</i>		
- El ojo es considerado como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- La imagen óptica se forma en la retina por concentración de haces de luz.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- Otros aspectos como la acomodación del cristalino, la función del diafragma del iris y la sensación de la visión elaborada en el cerebro.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
<i>Sobre la calidad de los diagramas realizados en A.17 y A.26:</i>		
- El ojo es receptor de rayos de luz.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- El ojo es receptor de haces de luz.	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- El ojo es un sistema lente-pantalla donde se forma la imagen a partir de haces de luz (únicamente en A.26).	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
- El ojo no es receptor de luz	<input type="checkbox"/>	Sí <input type="checkbox"/> No
<i>Sobre la calidad del texto escrito en las recapitulaciones A.17 y A.26:</i>		
- N° de frases con sentido físico.		
- N° de frases argumentadas (donde se justifica las hipótesis implícitas en el modelo o se realizan predicciones con él)		

Si nuestro objetivo es probar que la secuencia didáctica seguida por los grupos de alumnos experimentales genera oportunidades en el aula que favorecen el aprendizaje con comprensión, además de la información numérica que obtengamos al completar este estadillo, también nos detendremos en mostrar detalles sobre el tipo de frases que utilizan, los razonamientos más comunes, los aspectos más difíciles de comprender, etc.

A este respecto, denominaremos frases con sentido físico a cualquier comentario sea razonado o simplemente expositivo que exprese una idea de forma inteligible con significado físico. Podremos, pues, considerar frases con sentido físico a expresiones del tipo: *"La luz viaja en línea recta"* o *"Los objetos iluminados son fuentes luminosas"*, etc.

Para aclarar qué consideraremos frase argumentada es necesario alguna consideración más, incluso precisar qué sería aceptable en la primera y en la segunda recapitulación según lo que se solicita en cada una de ellas. En primer lugar, destacamos que recientemente la investigación educativa ha abordado la cuestión de qué entender por argumentación en la enseñanza de las ciencias, así, Osborne, Erduran y Simon (2004) revisan esta investigación y recogen, como consenso general, que por argumentación se entiende *"la coordinación de pruebas y teoría para sostener o refutar una conclusión aclaratoria, modelo o predicción"*. Así pues, en la primera recapitulación, donde se solicita que argumenten las hipótesis implícitas en el diagrama de visión, aceptaremos como válidas aquellas expresiones en las que se justifique una aseveración sobre el modelo de visión en base a una observación cotidiana, una experiencia de clase, etc., por lo que consideraremos como frases argumentadas razonamientos del tipo:

- *"La luz viaja en línea recta ya que la forma y el tamaño de las sombras que se observan al iluminar un objeto opaco con una fuente puntual son una consecuencia de su propagación rectilínea"*.
- *"Los objetos iluminados son también fuentes luminosas ya que al iluminar cartulinas de colores se observa que una pantalla situada frente a ellas se ilumina con una coloración del mismo tono que el de las cartulinas"*.
- *"Del ojo no sale nada ya que si así fuera veríamos en la oscuridad"*.

En la segunda recapitulación, una vez que las hipótesis en las que se asienta el modelo de visión están suficientemente justificadas, se aceptarán como frases argumentadas aquellos razonamientos en los que se usa el propio modelo para realizar, por ejemplo, una predicción o justificar una observación. Frases del tipo:

- *"El tamaño de la imagen que se forma en la retina del ojo no depende de la apertura del diafragma del iris, de acuerdo con el diagrama de rayos que se traza para formar la imagen óptica en un sistema lente-pantalla,..."*.

- "Para formar la imagen en la retina de un objeto a diferentes distancias, la lente del cristalino debe cambiar su curvatura y así variar el poder de convergencia de los haces de luz,...".

7.3.2 Diseños experimentales para obtener evidencias de la mejora en la comprensión conceptual.

Este diseño experimental consistirá en comparar la comprensión conceptual adquirida por los alumnos tratados con la de alumnos no tratados del mismo nivel y de 2º de Bachillerato. Lo que se hará mediante:

- a. Comparación del porcentaje de alumnos tratados y no tratados que superan los obstáculos para conseguir las ideas fundamentales del modelo funcional de visión (en el caso de los alumnos experimentales, incluso un año después del tratamiento).
- b. Categorización por consenso entre expertos de una gradación de niveles de comprensión del modelo y asignación de cada alumno (tratado y no tratado) a un nivel determinado y, posteriormente, comparación de los porcentajes que alcanzan cada nivel y del nivel medio alcanzado por los alumnos de grupos experimentales y de control.

Para someter a pruebas más exigentes la eficacia de nuestra secuencia, compararemos el conocimiento mostrado por alumnos tratados de ESO inmediatamente después de la enseñanza y un año después de haber recibido instrucción, con los conocimientos de alumnos no tratados del mismo nivel y de Física de 2º curso de bachillerato inmediatamente después de haber acabado un tema sobre óptica.

a) Para la comparación de los porcentajes de alumnos que superan los obstáculos para comprender el modelo de visión de Kepler, hemos utilizado, cinco muestras de alumnos: las tres primeras, grupos de control, son las mismas que las usadas en la primera parte de la tesis para probar la existencia y persistencia de estos obstáculos antes y después de la enseñanza habitual; las dos últimas, grupos experimentales, de alumnos de ESO inmediatamente después de la enseñanza de nuestra secuencia y un año después. En cada una de estas muestras, hemos

pasado un cuestionario compuesto de distintas agrupaciones de la colección de cuestiones del anexo 1 (pag. 373). No nos vamos a detener aquí en comentar las particularidades de estas cuestiones ya que se comentaron con profusión en el capítulo 4, apartado 4.3.1 (páginas 98 a 141).

En la tabla 7.1 presentamos los códigos de las cuestiones utilizadas en cada muestra para realizar esta comparación. El conjunto de las cuestiones de cada muestra son los instrumentos designados por: **C1-a**, **C2-a**, **C3-a**, **C4-a** y **C5-a**.

Tabla 7.1: Cuestiones utilizadas (véase enunciados en anexo 1) para comparar los porcentajes de alumnos que superan los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler

Meta parcial o indicador de comprensión y obstáculos asociados	Grupos de control			Grupos experimentales	
	Antes	Después de la enseñanza		Final del tratamiento	Al curso siguiente
	ESO-1	ESO-2	BAC-3	ESO-4	ESO-5
<p>A. Concebir la visión a partir de un modelo que relaciona el objeto, la luz y el ojo del observador. Obstáculos asociados:</p> <p>A₁. No considerar necesario que llegue luz al ojo procedente del objeto para verlo:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Directamente. - En un espejo. - Sumergido en agua. - En oscuridad total. <p>A₂. No considerar a los objetos iluminados fuentes luminosas, por lo que:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No señalan que los objetos emitan luz al ser iluminados. - No citan objetos iluminados como fuentes luminosas. <p>A₃. No considerar que la luz tiene existencia independiente y que viaja en el espacio, por lo que:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Creen que sólo existe luz en las fuentes luminosas o en sus proximidades. - Creen que la luz desaparece cuando se apaga la fuente luminosa. 	<p>C-1</p> <p>C-7</p> <p>C-8</p> <p>C-2</p> <p>C-3</p> <p>-</p> <p>C-4a</p> <p>C-4b</p>	<p>C-1.1</p> <p>C-7.1</p> <p>-</p> <p>-</p> <p>C-3</p> <p>C-3.1</p> <p>C-4a</p> <p>C-4b</p>	<p>C-1.1</p> <p>C-7</p> <p>C-8</p> <p>-</p> <p>C-3</p> <p>-</p> <p>C-4a</p> <p>C-4b</p>	<p>C-1.1</p> <p>C-7.1</p> <p>C-8</p> <p>-</p> <p>C-3</p> <p>C-3.1</p> <p>C-4a</p> <p>C-4b</p>	<p>C-1</p> <p>C-7</p> <p>C-8</p> <p>-</p> <p>C-3</p> <p>-</p> <p>C-4a</p> <p>C-4b</p>

Tabla 7.1 (continuación): Cuestiones utilizadas (véase enunciados en anexo 1) para comparar los porcentajes de alumnos que superan los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler

Meta parcial o indicador de comprensión y obstáculos asociados	<i>Grupos de control</i>			<i>Grupos experimentales</i>	
	Antes	Después de la enseñanza		Final del tratamiento	Al curso siguiente
	ESO-1	ESO-2	BAC-3	ESO-4	ESO-5
<p>B. Disponer de un esquema de representación idealizada de la propagación de la luz potencialmente explicativo. Obstáculos asociados:</p> <p>B₁. Creer que la luz o los rayos de luz se ven.</p> <p>B₂. No modelizar las fuentes extensas de luz como conjuntos de emisores puntuales</p> <ul style="list-style-type: none"> - Al explicar la visión directa. - Al representar la luz difundida. - Al explicar la visión en un espejo. - Al explicar la formación de la imagen en una pantalla. <p>B₃. No representar haces de luz emitidos desde cada punto del objeto</p> <ul style="list-style-type: none"> - Al explicar la visión directa. - Al explicar la visión en un espejo. - Al explicar la visión de un objeto sumergido. - Al explicar la formación de una imagen en una pantalla. - Al predecir la sombra y penumbra. 	C-5	C-5.1	C-5	C-5.1	C-5
	C-1 C-3 C-7	C-1.1 C-3 C-7.1	C-1.1 C-3 C-7	C-1.1 C-3 C-7.1	C-1 C-3 C-7
	C-9	C-9	C-9	C-9	C-9
	C-1 C-7	C-1.1 C-7.1	C-1.1 C-7	C-1.1 C-7.1	C-1 C-7
	C-8	-	C-8	C-8	C-8
	C-9	C-9	C-9	C-9	C-9
	C-6	-	C-6	-	C-6

Tabla 7.1 (continuación): Cuestiones utilizadas (véase enunciados en anexo 1) para comparar los porcentajes de alumnos que superan los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler

Meta parcial o indicador de comprensión y obstáculos asociados	Grupos de control			Grupos experimentales	
	Antes	Después de la enseñanza		Final del tratamiento	Al curso siguiente
	ESO-1	ESO-2	BAC-3	ESO-4	ESO-5
<p>C. Conocer el concepto de imagen óptica del modelo de visión de Kepler. Obstáculos asociados:</p> <p>C₁. Realizar trazados gráficos en los que la imagen se traslada “ya hecha” desde el objeto o los rayos son portadores de cada uno de sus puntos al explicar su formación al mirar...</p> <ul style="list-style-type: none"> - A un espejo. - A un objeto sumergido. - A una pantalla donde se ve la imagen formada por una lente convergente. <p>En consecuencia, consideran que esa imagen...</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se mueve con la pantalla. - Existe aunque se quite la lente. - Se ve la mitad al tapar media lente. <p>C₂. No considerar al ojo como un instrumento óptico formador de imágenes, por lo que:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No explican la percepción de la forma y el tamaño de los objetos a partir de la imagen retiniana. - El ojo no participa como receptor de luz en los trazados gráficos de la imagen en una pantalla. 	<p>C-7</p> <p>C-8</p> <p>C-9a</p> <p>C-9b</p> <p>C-9c</p> <p>C-9d</p> <p>-</p> <p>C-9a</p>	<p>C-7.1</p> <p>-</p> <p>C-9a</p> <p>C-9b</p> <p>C-9c</p> <p>C-9d</p> <p>C-1.1</p> <p>C-9a</p>	<p>C-7</p> <p>C-8</p> <p>C-9a</p> <p>C-9b</p> <p>C-9c</p> <p>C-9d</p> <p>C1.1</p> <p>C-9a</p>	<p>C-7.1</p> <p>-</p> <p>C-9a</p> <p>C-9b</p> <p>C-9c</p> <p>C-9d</p> <p>-</p> <p>C-9a</p>	<p>C-7</p> <p>C-8</p> <p>C-9a</p> <p>C-9b</p> <p>C-9c</p> <p>C-9d</p> <p>-</p> <p>C-9a</p>

Tabla 7.1(continuación): Cuestiones utilizadas (véase enunciados en anexo 1) para comparar los porcentajes de alumnos que superan los obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler

Meta parcial o indicador de comprensión y obstáculos asociados	<i>Grupos de control</i>			<i>Grupos experimentales</i>	
	Antes	Después de la enseñanza		Final del tratamiento	Al curso siguiente
	ESO-1	ESO-2	BAC-3	ESO-4	ESO-5
<p>D. Concebir el color como una sensación obtenida a partir de la respuesta de diferencial de los fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente. Obstáculos asociados:</p> <p>D₁. No considerar el carácter heterogéneo de la luz "blanca".</p> <p>D₂. No relacionar el color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos.</p>					
	C-11	-	C-11	C-11	C-11
	C-10	-	C-10	C-10	-

De acuerdo con el enunciado de la segunda hipótesis esperamos que, tras la aplicación de estos cuestionarios, los porcentajes de alumnos en los que existen o persisten obstáculos a cada uno de los indicadores de comprensión sea sensiblemente menor en los grupos experimentales que en los grupos de control.

b) Para establecer los niveles de comprensión globales y comparar los porcentajes de alumnos que adquieren cada nivel de los grupos de control y experimentales hemos seguido el proceso siguiente:

La lectura de los cuestionarios permite agrupar a los estudiantes, en un principio, en tres niveles básicos de comprensión global: bajo, medio y alto. Al intentar asignar a todos los estudiantes a uno de estos niveles de comprensión surgen casos dudosos que obligan a ampliar la escala y definir más niveles, precisando pormenorizadamente sus características, hasta que todos los estudiantes puedan clasificarse en alguno de ellos. Esto nos permite, además, precisar qué niveles podrían ser considerados como representativos de una comprensión global funcional. Este análisis de los cuestionarios, mucho más complejo, aporta información que no es posible obtener a partir de la comparación de los resultados de cada obstáculo individual. Para ello, siguiendo algunas ideas de Hogan y Maglienti (2001), dos investigadores han releído una pequeña parte de los

cuestionarios de cada muestra, han completado una plantilla de corrección del cuestionario con los 28 ítems de la tabla 7.1 anterior añadiendo, además, algunas características del tipo de razonamientos que utilizan en sus explicaciones y han asignado independientemente el nivel de conocimientos. Con posterioridad, ha habido reuniones para discutir los grados de desencuentro y los casos dudosos, así como para codificar más exactamente los niveles de comprensión. Inicialmente se asignarán conjuntamente 15 cuestionarios, posteriormente se categorizarán de modo independiente 15 más, se pondrá en común su asignación y se discutirán los casos no coincidentes o dudosos, tomando acuerdos hasta una coincidencia prácticamente total con el estadillo utilizado definitivamente.

En el estadillo utilizado para la asignación del nivel global de comprensión dividimos los diferentes aspectos evaluados, que se recogen en la tabla 7.1 anterior, en cinco bloques: el tratamiento que dan al objeto que es visto, el tratamiento que dan a la luz, el comportamiento del ojo en la visión, la concepción de imagen óptica y la cantidad y calidad de las explicaciones que utilizan. La introducción de este último bloque para asignar el nivel de comprensión global está justificado ya que, la capacidad de explicación de los modelos científicos está íntimamente relacionada con el grado de comprensión de los mismos (Lemke, 1997; Osborne, et al., 2004; Guisasola et al. (2004).

De acuerdo con estas ideas, hemos utilizado el estadillo que presentamos en la tabla siguiente y que, junto a la descripción de los niveles globales de comprensión conceptual que mostraremos con posterioridad, conforman el instrumento **C7-a**.

Cuadro 7.3: Estadillo C7-a utilizado para asignar un nivel de comprensión global a cada estudiante

Cuestionario N° / Muestra: / Fecha :	
BLOQUE A: <i>¿Cómo es considerado el objeto en el cuestionario?</i>	BLOQUE C: <i>¿Cómo es el tratamiento que dan al ojo e el cuestionario?</i>
Como fuente secundaria en C-1/C-1.1	Considerado receptor de luz en visión directa C-1/C-1.1
Ídem en C-3/C-3.1	Ídem en visión directa en C-4a
Ídem en C-7/C-7.1	Ídem en visión indirecta C-7/C-7.1
Ídem en C-9	Ídem en visión indirecta C-8
Ídem en C-8	Considerado un instrumento conectado al cerebro C-1.1
Como conjunto de puntos de luz en C-1/C-1-1	Con receptores específicos a cada tipo de luz C-11
Ídem en C-7/C-7.1	Con capacidad de acomodación C-1.1
Ídem en C-3	Considerado parte del sistema óptico lente-pantalla en C-9
Ídem en C-9	BLOQUE D: <i>¿Cómo es el tratamiento que dan a la imagen óptica en los cuestionarios?</i>
Ídem en C-8	Realiza esquema gráfico correcto en C-1/C-1.1
BLOQUE B: <i>¿Cómo es el tratamiento que dan a la luz en el cuestionario?</i>	Ídem en C-7/C-7.1
Como entidad independiente en C-4a	Ídem en C-9
Como entidad que viaja en el espacio en C-4b	Ídem en C-8
Como entidad no visible en C-5/C-5.1	No realiza esquemas gráficos alternativos en C-1/C-1.1
Representada por haces divergentes/rayos en C-1/C-1.1	Ídem en C-7/C-7.1
Ídem en C-7/C-7.1	Ídem en C-9
Ídem en C-9	Ídem en C-8
Ídem en A.8	BLOQUE E: <i>Sobre la calidad y cantidad del texto escrito:</i>
Ídem en A.10	N° de argumentos tautológicos
Realiza trazados gráficos de tipo geométrico en C-1/C-1.1, C-7/C-7.1, C-9, C-8	N° de frases de carácter descriptivo
Luz “blanca” como ente heterogéneo en C-11	N° de frases de carácter explicativo-argumentativo

Con el procedimiento explicado anteriormente y atendiendo a los resultados recogidos en el estadillo anterior, hemos caracterizado cinco niveles de comprensión cuya descripción presentamos a continuación:

NIVEL 0: Nivel de los alumnos en los que no se detecta ninguna característica relevante del modelo de visión de Kepler. El pensamiento de los estudiantes agrupados en este nivel de comprensión se caracteriza por:

- No considerar a los objetos que vemos como fuentes luminosas.
- La luz es una entidad que tiene existencia en las fuentes o en sus proximidades, es visible, suele ser representada de forma imprecisa por rayos, por lo que a menudo sus gráficos no son trazados geométricos de los que podrían derivarse consecuencias ópticas.
- El ojo no es considerado como un receptor de luz ni en visión directa ni en indirecta.
- Representar, habitualmente, diagramas de visión directa e indirecta alternativos en los que dibujan la línea de mirada o el movimiento de la imagen como un todo emitido por el objeto.
- Utilizar pocas frases y además suelen ser características de razonamiento tautológico. Así suelen explicar la visión de los objetos con frases del tipo: "Veo porque miro".
- En general el porcentaje de respuestas correctas en los ítems evaluados no supera el 10 %.

NIVEL 1: Nivel de comprensión alcanzado por los alumnos que adquieren alguna característica importante del modelo de visión de Kepler, pero muestran contradicciones evidentes y usan razonamientos no apoyados en el modelo. El pensamiento de los estudiantes agrupados en este nivel de comprensión se caracteriza por:

- Ante la cuestión de cómo vemos los objetos, describen, mediante esquemas o con explicaciones explícitas, la visión directa como un proceso en el que es necesario que llegue luz al ojo procedente del objeto. A menudo la recepción de luz en el ojo va acompañada de una imagen del objeto. Sin embargo pueden aceptar, en otras situaciones del cuestionario donde no se implica la visión, que los objetos iluminados no emiten luz.
- Respecto al tratamiento que dan a la luz, aunque puedan responder de forma esporádica correctamente en alguna situación, su inconsistencia en otras es tal que puede afirmarse que no disponen de un esquema geométrico e idealizado para la representación de la luz. Así, la luz puede ser visible en sí misma, encontrarse en las fuentes o en sus alrededores, y no representarse mediante haces divergentes emanados desde por cada punto de la fuente luminosa.
- Respecto al ojo del observador, pueden considerarlo receptor de luz en visión directa y emisor de la mirada en las situaciones de visión indirecta. Aunque, en algunos casos, pueda existir alguna somera descripción del ojo como instrumento óptico, su inconsistencia nos permite pensar que, muy probablemente, puede estar repitiendo memorísticamente esquemas observados repetidas veces.
- En este nivel de conocimientos no se aprecian mejoras del concepto de imagen óptica con relación a las descritas en el nivel 0.
- Respecto del tipo de explicaciones dadas, son pocas o ninguna las frases utilizadas y siempre de tipo meramente declarativo.
- El porcentaje de respuestas correctas en los ítems evaluados suele estar comprendido entre el 10% y el 40 %.
- En este nivel se encontrarán los estudiantes que de forma memorística exponen alguna característica del modelo de visión estudiado, pero sin embargo carecen de conocimientos fundados del mismo, ya que en situaciones novedosas expresan un conocimiento similar al descrito en el nivel 0 de preaprendizaje.

NIVEL 2: Nivel alcanzado por los alumnos en los que se manifiesta más de una característica relevante del modelo de visión y basa alguno de sus juicios en alguna característica del mismo. El pensamiento de los estudiantes agrupados en este nivel de comprensión se caracteriza por :

- Describir la visión como un proceso en el que el objeto iluminado emite luz hasta el ojo. En la mayoría de las diferentes situaciones del cuestionario consideran a los objetos iluminados como fuentes luminosas secundarias.
- Considerar la luz como un ente separado de la fuente o sus alrededores, no visible. Su representación suele ser trazados geométricos de rayos emitidos por cada punto de la fuente. Aunque esporádicamente pueden dibujar en alguna situación haces divergentes de luz emitidos desde cada punto, no es ésta, no obstante, la norma general.
- Considerar al ojo como receptor de luz, tanto en visión directa como indirecta. También pueden hacer referencia al ojo como instrumento óptico formador de imágenes aunque no describan su funcionamiento con precisión.
- Respecto del concepto de imagen óptica, aunque existan leves mejoras respecto al nivel anterior, no consiguen la comprensión del concepto ya que al representar la luz, en la mayoría de las ocasiones mediante rayos y no mediante haces divergentes, los esquemas de formación de imágenes en distintas situaciones son incorrectos y las consecuencias que derivan del proceso de formación de la imagen en el sistema lente convergente-pantalla suelen ser erróneas. Sus esquemas parecen dar a entender que los rayos transportan la imagen del objeto punto a punto para ser depositada en otro lugar. Incluso, en visión indirecta, pueden aparecer esquemas en los que los rayos emitidos desde el objeto parecen acompañar a una imagen hasta el ojo, pero no aparecen esquemas en los que el ojo es emisor.
- El tipo de frases expresadas es fundamentalmente declarativo y su número escaso.
- El porcentaje de respuestas correctas en los ítems evaluados suele estar comprendido entre el 40% y el 70 %.

NIVEL 3: Nivel alcanzado por los alumnos que conocen todos los aspectos relevantes del modelo aunque su razonamiento sea escasamente argumentativo y no describan o no utilicen con detalle todos los aspectos y consecuencias del modelo. El pensamiento de los estudiantes agrupados en este nivel de comprensión se caracteriza por:

- Los objetos iluminados son considerados, en todas las situaciones, conjuntos de fuentes secundarias y puntuales de luz.
- La luz es tratada como un ente independiente en el espacio, de carácter no visible. Las representaciones gráficas de la luz se realizan con haces divergentes de luz emitidos desde cada punto de la fuente luminosa.
- El ojo es considerado receptor de luz tanto en las situaciones de visión directa como en las de visión indirecta. En este nivel el ojo es, además, un sistema óptico formado por una lente y una pantalla donde se forma la imagen a partir de la cual reconocemos la forma y el tamaño de los objetos que vemos. En este NIVEL 3 lo fundamental es comprendido, pero no aparecen más ideas que las estrictamente necesarias para resolver la cuestión (no se refieren nunca al papel del cerebro, a la acomodación del ojo, ...)
- Los diagramas de formación de la imagen son, en general, correctos, aunque cometen algún error al prever alguna consecuencia de la imagen óptica así formada.
- El tipo de frases usadas es básicamente expositivo. Así, para explicar cómo podemos distinguir la forma y tamaño de los objetos que vemos, usan frases que fundamentalmente describen el esquema realizado: *"el haz de luz al llegar al ojo se concentra en un punto de la retina", "En la retina se forma una imagen del objeto" ...*
- El porcentaje de respuestas correctas en los ítems evaluados suele estar comprendido entre el 70% y el 85 %.

NIVEL 4: Nivel alcanzado por los alumnos que conocen todas las características del modelo y realizan inferencias y argumentaciones basadas en ellas. En este nivel los alumnos no cometen, prácticamente, ningún error en el cuestionario asumiendo a la perfección el modelo de visión de Kepler. Utilizando, además, un discurso de naturaleza claramente explicativa-argumentativa. Así, se emplean razonamientos del tipo: *"Para explicar la visión podemos utilizar como modelo de ojo una lente convergente y una pantalla,....., la forma de la imagen que se forma en la retina es igual a la del objeto, pero se forma al revés y debe actuar el cerebro..."*, *"Cuando el objeto está cerca, el cristalino debe hacerse más grueso para formar la imagen en la retina,..."*.

El porcentaje de respuestas correctas en los ítems evaluados es superior al 85%.

De la descripción de estos niveles de comprensión se deduce que los alumnos con un nivel de comprensión funcional, el que les permite producir explicaciones y extraer consecuencias en base al modelo de visión de Kepler, serán aquellos con nivel de comprensión 3 o 4.

De acuerdo con el proceso y descripción de la asignación de niveles de comprensión del modelo de visión de Kepler y en consonancia con la formulación

de la segunda hipótesis, esperamos que los porcentajes de alumnos que adquieran lo que hemos denominado nivel de comprensión funcional sean sensiblemente mayores en los alumnos de los grupos experimentales que en los de control después de la enseñanza. La distribución de los niveles en las muestras comparadas ofrecerá, asimismo, un nivel de comprensión medio superior en los grupos experimentales que en los de control.

7.3.3 Diseños experimentales para obtener evidencias de la mejora en los indicadores de apropiación y en las actitudes de los alumnos

De acuerdo con el significado de apropiación desarrollado por Verdú (2004), evaluaremos si un alumno muestra apropiación de lo tratado mediante los siguientes indicadores que se recogen en el cuadro 7.4:

Cuadro 7.4: Indicadores de apropiación (Verdú, 2004)

1. **Orientación**, que se pondría de manifiesto cuando se cumple alguno, o ambos, de los siguientes aspectos: a) Conocer qué interés tiene lo que se está haciendo (de una forma cualitativa y global); b) Ser consciente de que lo que se está haciendo se enmarca en un objetivo o finalidad más general, es decir, sentirse partícipe de un plan y saber dónde se encuentra en el desarrollo de dicho plan: qué se está buscando, cuánto se ha avanzado, o qué se encontrará si el plan se llevara a cabo con éxito.
2. **Implicación/ motivación**, que se pondría de manifiesto cuando se expresa una actitud positiva hacia lo que se está haciendo (atractivo, interesante, etc.) y/o se tiene sensación personal de “avance”, de aprendizaje.
3. **Recuerdo relevante, con sentido físico**, de lo tratado, mostrando un conocimiento de ideas importantes, globalizadoras, que pueden ser expresadas cualitativa y coherentemente, sobre lo que se ha hecho.
4. **Mejor comprensión de los conceptos fisicoquímicos por los alumnos.**

Y, aunque algunos de los indicadores anteriores (p. ej.: sensación de aprendizaje, encontrar atractivo lo que se está haciendo,...) lo son también de actitudes positivas hacia, o generados por, la enseñanza recibida y viceversa, los complementaremos (haciendo más exigentes los criterios para admitir la generación de actitudes positivas debidas a la forma de estructurar la enseñanza) añadiendo el siguiente indicador:

5. **Actitud positiva hacia la enseñanza recibida**, que se pondrá de manifiesto si los alumnos perciben que dicha enseñanza facilita el aprendizaje y genera actitudes positivas hacia el aprendizaje de la Física y la Química.

Siguiendo estos indicadores, para obtener evidencias de la mejora en la apropiación y en las actitudes de los alumnos hemos diseñado dos instrumentos, el **C8-a**, y el **C9-a**, que describimos a continuación:

El cuestionario **C8-a** se trata de una valoración respecto a una norma de la percepción subjetiva de los alumnos sobre diferentes proposiciones relacionadas con los indicadores de apropiación y las actitudes. En él hemos señalado, entre paréntesis, para cada proposición, los indicadores de apropiación afectados: Orientación (O), Implicación/Motivación (I/M), Actitudes (A).

Cuestionario C8-a: Instrumento para valorar, respecto a norma, la percepción subjetiva de los alumnos sobre diferentes proposiciones relacionadas con los indicadores de apropiación y las actitudes

<p>Como sabes, una misma asignatura puede resultar atractiva o interesante para unos estudiantes y para otros no. Estamos interesados en conocer el efecto que ha tenido en tus actitudes la forma en como se ha desarrollado el tema de óptica (luz y visión), con el objetivo de poder mejorar la enseñanza de la misma.</p> <p>Para ello, te pedimos que leas con cuidado cada pregunta antes de contestar, y que las contestes con la mayor sinceridad. Valora de 0 a 10 tu grado de acuerdo con las siguientes afirmaciones (0 = nada de acuerdo; 10= totalmente de acuerdo). El cuestionario es individual y anónimo.</p> <p>Cuestiones: Con relación al modo en que se ha desarrollado el tema...</p>	
a) El índice del tema y su desarrollo me ha permitido sentirme orientado, es decir, saber lo que estaba haciendo en todo momento y para qué lo hacía (O).	
b) A lo largo del tema he tenido oportunidades de expresar lo que pensaba sobre lo que estábamos tratando y resolver mis dudas (A).	
c) Tengo la sensación de que iba haciendo actividades, una tras otra, si saber muy bien por qué las hacía (O; I/M, en negativo).	
d) La organización del tema sobre luz y visión me ha permitido aprender “de verdad” y no a repetir cosas de memoria (I/M).	
e) La organización del tema sobre luz y visión me ha permitido darme cuenta sobre cómo trabajan los científicos y cómo avanzan en la elaboración de teorías (I/M; A).	
f) Lo que hemos tratado es muy difícil, creo que no he entendido nada “de verdad” (O; I/M; A, en negativo).	
g) Esta forma de organizar la enseñanza ha contribuido a que me guste menos la asignatura (A en negativo).	
h) Si el curso próximo eligiera la asignatura de Física y Química, me gustaría que los temas se organizaran como éste (A).	
i) Lo que hemos tratado no es fácil, pero la forma de trabajar y evaluar me ha ayudado a comprender mejor los conceptos sobre la luz y la visión (I/M, A).	
j) Creo que lo aprendido en este tema ha hecho que cambie algunas de las ideas que tenía sobre la luz y la visión (I/M).	

La validez de esta valoración no comparada, a efectos de nuestra investigación se basa en la aceptación de que la escala de 0 a 10 está arraigada en todos los alumnos españoles, de manera que aunque se pase a grupos independientes o no se le pida al alumno una valoración comparativa, permite una valoración con sentido respecto a una norma. Parece lógico admitir, según nuestra tradición, que una puntuación de 7 a 10 supone que se está bastante o totalmente de acuerdo con la afirmación, mientras que una puntuación de 4 a 0 puede ser interpretada como de bastante o total desacuerdo con la afirmación. Se compararán estadísticamente los valores dados por los grupos experimentales y de control. Este instrumento se aplicará a los grupos experimentales y de control de ESO inmediatamente después de haber recibido instrucción sobre el tema de óptica.

En nuestra comparación esperamos encontrar un porcentaje significativamente mayor de alumnos en los grupos experimentales que den una valoración igual o superior a 7 y/o que la media de los grupos experimentales sea igual o superior a 7 y su diferencia respecto a la media de los grupos de control sea significativa estadísticamente. En las proposiciones formuladas en forma negativa, o incluso opuestas a las otras, esperamos también diferencias significativas aunque, en ellas, la valoración media de los grupos experimentales será inferior a 4.

El cuestionario **C9-a** consiste en varias preguntas abiertas que demandan: a) recuerdo relevante, con sentido físico de lo tratado, b) conocer el interés que tiene el estudio realizado y c) recuerdo espontáneo de características de la enseñanza recibida que pueden haber influido positiva o negativamente en indicadores de apropiación y actitudes. Por ello, este cuestionario, abierto, es mucho más exigente y permitirá reforzar los resultados que se obtengan con el instrumento anterior **C8-a**. De igual forma que en el anterior se aplicará a los grupos experimentales y de control de ESO inmediatamente después de haber recibido instrucción sobre el tema de óptica.

Cuestionario C9-a: Cuestiones abiertas para valorar la apropiación de los estudiantes de ESO después de la enseñanza.

Ahora que acabas de terminar el tema de óptica geométrica (luz y visión) te pedimos una valoración sobre algunos aspectos de su enseñanza que nos pueden ser útiles conocer para mejorar su enseñanza.

Te pedimos que leas con cuidado cada pregunta y contestes con sinceridad. El cuestionario es individual y anónimo.

A) ¿Qué aspecto o aspectos fundamentales tratábamos de comprender en el tema de óptica (luz y visión)?

B) ¿Qué interés crees que puede tener el estudio que hemos realizado en el tema de óptica (luz y visión)?

C) Señala las características de la forma de organizar la enseñanza de este tema que crees que han contribuido a favorecer el aprendizaje.

Para valorar las respuestas a las preguntas abiertas anteriores relativas a los indicadores de apropiación sobre la enseñanza recibida hemos elaborado el siguiente estadillo:

Cuadro 7.5: Estadillo para valorar el cuestionario C9-a

A) Sobre qué aspecto o aspectos fundamentales tratábamos de comprender en el tema de óptica (luz y visión), agruparemos las respuestas en las categorías:

- ¿Señala el problema “*cómo vemos*” como el aspecto fundamental que tratamos de comprender en este tema?
- ¿Señala otros aspectos del tema: fisiología del ojo, comportamiento de la luz, anomalías visuales, color, formación de imágenes,...?
- No contesta o da una respuesta sin significado.

B) Sobre qué interés puede tener el estudio realizado en el tema de óptica (luz y visión), agruparemos las respuestas en las categorías:

- ¿Señala alguno o varios de los siguientes aspectos: la comprensión de las anomalías visuales, la corrección de las anomalías visuales, la construcción de aparatos ópticos, ...?
- No contesta o da una respuesta sin relación con el interés del tema.

C) Sobre las características de la forma de organizar la enseñanza que creen que han contribuido a favorecer el aprendizaje, agruparemos las respuestas en las categorías:

- ¿Señala alguna o varias de las características genuinas de la enseñanza problematizada: el planteamiento de un problema estructurante, el índice como estrategia, el interés del mismo, el trabajo en grupos, la realización de recapitulaciones, las discusiones de clase, las experiencias de clase, la conexión con la vida real,...?
- No contesta o no señala ninguna característica de la enseñanza problematizada.

Somos conscientes de las limitaciones de los estudiantes de estas edades para expresar por escrito ideas abstractas sobre la forma en que se ha desarrollado la clase, el interés de lo tratado o las ideas globales estudiadas, no obstante, para alumnos de la misma edad, esperamos encontrar diferencias significativas a favor de nuestra hipótesis entre los grupos de control y experimentales.

7.3.4 Diseños experimentales para obtener evidencias sobre las expectativas generadas por la secuencia problematizada en los profesores

Dentro del modelo de enseñanza por investigación dirigida se han realizado numerosas investigaciones en las que se incluye la realización de actividades de formación de profesores en activo de Física y Química y la medición de las expectativas generadas al finalizar la actividad. Estas actividades no pretenden transmitir directamente a los profesores cómo deberían desarrollar el tema tratado, sino hacerles tomar conciencia del interés y/o deficiencias de lo que se va a tratar y participar en la (re)construcción de propuestas alternativas en un ambiente de reflexión colectiva (Doménech, 2000; López-Gay, 2002; Martínez Sebastiá, 2003).

Nuestro diseño experimental se basa en la medición y análisis de las expectativas generadas por la secuencia de enseñanza elaborada en esta investigación en profesores de secundaria en activo que participan en cursos de formación realizados por los profesores/ investigadores.

En dichos cursos, de una duración de 30 horas, los profesores en activo participantes (entre veinte y treinta) trabajan en pequeños grupos sobre la secuencia de actividades que hemos presentado en capítulo 6. Dirigidos por el profesor/investigador se plantean, desarrollan y reflexionan didácticamente sobre la estructura problematizada del tema y las distintas actividades. Al finalizar el curso se les pasará una serie de instrumentos diseñados para obtener evidencia fiable sobre las expectativas generadas por la secuencia de enseñanza propuesta para los alumnos. En concreto, nuestro diseño experimental se ha centrado en obtener evidencias que apoyen que, al finalizar los cursos de formación, los

profesores perciben que dicha forma de planificar la enseñanza de la óptica geométrica mejora:

- a) los indicadores de apropiación de los alumnos y sus actitudes, es decir, favorece su implicación, su interés y su orientación.
- b) El aprendizaje de conocimientos ricos y estructurados frente a conocimientos puntuales y aproxima a los estudiantes a las formas características de producción de conocimientos científicos.
- c) Las actitudes de los propios profesores.

El procedimiento de obtención de datos será escalonado: primero se pasará un cuestionario con preguntas abiertas y, una vez contestado y recogido, a continuación un cuestionario cerrado, donde tendrán que valorar su grado de acuerdo con enunciados concretos. En cada curso, pues, se pasará dos cuestionarios (uno abierto y otro cerrado), de este modo aumentaremos la fiabilidad de los datos.

Presentamos en primer lugar la pareja de cuestionarios abierto y cerrado **C6-p/C7-p** utilizada en los primeros cursos de formación y, posteriormente, la pareja **C8-p/C9-p** utilizada en el último.

Cuestionario C6-p. Valoración abierta de los profesores sobre la estructura problematizada de la unidad didáctica de óptica geométrica

En este curso, la enseñanza de la óptica geométrica se ha planificado según una estructura problematizada, distinta de la que suele ser habitual en los libros de texto.

Es posible que pienses que dicha estructura puede influir positiva, nada o negativamente en la enseñanza y el aprendizaje en el aula; que “da lo mismo” la forma de estructurar los temas o, por el contrario, que es un aspecto muy importante.

Nos interesa conocer tu valoración sobre esta cuestión, y que resaltes aspectos concretos de esta forma de estructurar el tema que creas que pueden incidir positivamente (si los hay) y aspectos concretos que pueden incidir negativamente (si los hay).

Gracias por tu colaboración

- a) Valoración abierta sobre la estructura problematizada
- b) Di aspectos concretos de la forma de estructurar (o directamente fomentados por ella) que creas que pueden incidir positiva/negativamente en la enseñanza-aprendizaje.

Para valorar las respuestas a esta cuestión abierta emplearemos el estadillo:

Estadillo para valorar C6-p

Consideraremos a favor de nuestra hipótesis si:

1. Manifiestan expectativas positivas sobre las potencialidades de esta forma de enseñanza, en concreto sobre:

- Su influencia en la apropiación por parte de los estudiantes, es decir, si aluden a las mejoras en la implicación, en la orientación y las actitudes de los alumnos y profesores.
- Su influencia en favorecer aprendizajes de alto nivel, de conocimientos ricos y estructurados.
- Su influencia para favorecer la aproximación a las características de la producción de conocimientos científicos.

2. Expresan características de la forma de desarrollar y estructurar los contenidos genuinas de nuestra propuesta, que inciden positivamente en la enseñanza/aprendizaje o les resultan de interés/utilidad, tales como aludir a:

- La forma como se ha iniciado el tema o a alguna actividad de inicio en la que se plantea lo que se va a estudiar y el interés que tiene.
- Algunos aspectos relacionados con la estructura problematizada del tema de forma positiva: planteamiento del problema estructurante, estrategia seguida, las recapitulaciones, las actividades prácticas como pequeñas investigaciones,...

No consideraremos la valoración a favor de nuestra hipótesis cuando:

- Únicamente hagan referencias a aspectos que no están relacionados exclusivamente con la estructura problematizada.
- Únicamente hagan referencias negativas a la estructura problematizada

El segundo instrumento, el cuestionario **C7-p**, consiste en la valoración respecto una norma (de 0 a 10) del grado de acuerdo con algunas afirmaciones realizadas. En primer lugar se les solicitaba una valoración global de la forma de estructurar el tema que se les ha presentado en el curso y, posteriormente, valoraciones de aspectos concretos que se pueden favorecer con la estructura problematizada del tema de óptica geométrica.

Cuestionario C7-p. Valoración respecto a norma de la influencia de la estructura problematizada en el aprendizaje

Los psicólogos dicen que después de haber estado 20 horas en un curso, los asistentes casi siempre valoran bien el mismo, ya que han empleado su tiempo en él o han simpatizado con el profesor. Te pedimos que no dejes llevar por estos “efectos”, si existen, y que pienses las respuestas antes de darlas.

Gracias por tu colaboración

a) Valora de 0 a 10 (0 nada de acuerdo, 10 totalmente de acuerdo) en qué medida crees que esta forma de estructurar los temas mejoraría la enseñanza y el aprendizaje de la Física ____

Valora de 0 a 10, en qué medida la forma en que se ha estructurado el tema, “estructura problematizada”, puede favorecer los siguientes aspectos:

- b) El interés de los alumnos sobre lo que se va a tratar en el tema ____
- c) La orientación de los alumnos (saber “dónde” están, qué y para qué están haciendo lo que hacen,...) ____
- d) La orientación del profesor (tener la estructura en “mente”, evitar hacer “cosas sueltas”,...) ____
- e) La evaluación con sentido, como recapitulación y reflexión sobre lo avanzado y la firmeza de dicho avance ____
- f) Oportunidades para que se puedan expresar las ideas (de alumnos y profesor) y someterlas a prueba ____
- g) Orientar y justificar la enseñanza y el aprendizaje por la comprensión y no por el examen ____
- h) Apropiación por los alumnos de formas de pensar próximas al trabajo científico ____
- i) El aprendizaje sólido, justificado, de los conocimientos ____
- j) Hacer que el profesor vea más atractiva la enseñanza ____
- k) La clarificación de objetivos del tema ____

Como se puede observar se les solicita una valoración sobre distintos aspectos de la apropiación. Algunos de ellos, en concreto d), f), g), j) y k) afectan directamente al profesor y su intención, que se comenta por sí sola, nos permitirá valorar si los profesores creen que la estructura problematizada del tema puede mejorar, no sólo el aprendizaje y las actitudes de los alumnos, sino si creen que sería mejor, también, para ellos mismos.

En las valoraciones respecto a norma, es habitual en trabajos de estas características, considerar que una valoración por encima de 7 supone estar de acuerdo con la propuesta y por debajo de 4 estar muy poco de acuerdo con ella.

Con objeto de reforzar las posibles evidencias encontradas en la pareja de cuestionarios anteriores, presentamos a continuación la pareja de instrumentos abierto y cerrado **C8-p/C9-p**, que serán aplicados con ocasión de otro curso de formación. El primero, **C8-p**, es una variación del anterior **C6-p**, consiste en una pregunta abierta razonada sobre en qué medida la enseñanza habitual favorece un aprendizaje sólido de los conceptos y modelos tratados en nuestra propuesta educativa sobre la luz y la visión.

Cuestionario C8-p. Valoración abierta de los profesores sobre la estructura problematizada de la unidad didáctica de óptica geométrica

Acabas de participar en un curso sobre la enseñanza de la óptica en la educación secundaria. Creemos que te encuentras en una situación adecuada para poder analizar la forma en que habitualmente se enseña y poder valorar sus virtudes y deficiencias. Estamos realizando un trabajo para mejorar la enseñanza de la óptica, por lo que nos interesa mucho tu opinión justificada y te agradecemos que dediques parte de tu tiempo a contestar nuestras preguntas.

Valora razonadamente en qué medida crees que la enseñanza habitual favorece un aprendizaje “de verdad” de la óptica geométrica en la educación secundaria. (Tanto si es positiva como negativa tu valoración, una forma de justificarla es identificar aspectos que, en tu opinión, son imprescindibles para el aprendizaje “de verdad” y describir la forma en que son tratados en la enseñanza habitual).

A la hora de valorarla hemos tenido en cuenta, en primer lugar, si realizaban una defensa de la enseñanza habitual y, cuando la criticaban, qué aspectos echaban de menos. Hemos analizado esta cuestión, por tanto, con el objetivo de obtener evidencias, con otro instrumento, sobre las expectativas positivas generadas por la propuesta de enseñanza problematizada en lo que respecta a la percepción de las mejoras en la apropiación de lo tratado y en las actitudes de estudiantes y profesores, en la obtención de conocimientos sólidos y en la valoración positiva del tratamiento conceptual realizado en nuestra propuesta educativa. Por lo que, en síntesis, lo que nos interesaba saber era si los profesores apoyan las características genuinas nuestra estructura problematizada analizando los aspectos que, en su opinión, consideran esenciales y que no se recogen en la enseñanza habitual.

Estadillo de valoración de C8-p

<p>Consideraremos a favor de nuestra hipótesis si:</p> <p>1. Manifiestan deficiencias en la enseñanza habitual, en concreto:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se refieren a que no favorece los indicadores de apropiación de lo tratado por los alumnos (orientación, implicación/motivación y actitudes de los alumnos y profesores) ▪ Consideran que no favorece aprendizajes de alto nivel, de conocimientos ricos y estructurados. ▪ Consideran que no favorece la aproximación al trabajo científico. <p>2. Manifiestan aspectos imprescindibles para un aprendizaje “de verdad” que son genuinos de nuestra propuesta de estructura problematizada, en concreto:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se refieren a aspectos exclusivos de la estructura problematizada (plantear problemas, elaborar modelos,...). ▪ Se refieren a la generación de expectativas positivas en los profesores y en los alumnos (orientación, implicación, actitudes positivas,...). ▪ Aluden a otros aspectos de la estructura problematizada (estrategia seguida, las recapitulaciones, las actividades prácticas como pequeñas investigaciones,...) <p>3. Manifiestan expresamente la importancia que tiene la forma en como han sido introducidos y tratados los conceptos fundamentales implicados en nuestra propuesta educativa (modelo de visión, representación idealizada de la luz, imagen óptica,...)</p>
<p>Consideraremos en contra de nuestra hipótesis si:</p> <p>Manifiestan expresamente que la enseñanza habitual favorece el aprendizaje “de verdad”, es decir:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Se refieren a que la enseñanza habitual favorece los indicadores de apropiación (orientación, implicación, actitudes) ▪ Consideran que favorece aprendizajes de alto nivel, de conocimientos ricos y estructurados ▪ Consideran que favorece la aproximación al trabajo científico ▪ Señalan ventajas como emplear menos tiempo, ser más cómoda y menos compleja para el profesor,..

Unido a este último cuestionario y para ese mismo grupo de profesores, se ha diseñado una triple valoración cerrada (**C9-p**). En primer lugar se les pide que valoren la importancia de diferentes aspectos para que los alumnos aprendan el tema de óptica geométrica que se ha desarrollado en el curso y, a continuación, se les pide que valoren cómo son contemplados dichos aspectos en la enseñanza habitual y en la enseñanza problematizada. El conjunto de aspectos a valorar se puede ordenar en tres grupos: los que hacen referencia a las características de la estructura problematizada, lo que hacen referencia a forma de introducir los conceptos de óptica implicados en el modelo de visión de Kepler y los que hacen referencia a los indicadores de apropiación.

C9-p. Valoración comparativa sobre la enseñanza habitual y la presentada en el curso.

	<i>Valora de 0 a 10 los siguientes aspectos según el criterio indicado en las columnas</i>	Importancia para comprender cómo vemos	Grado en que es adecuadamente tratado o favorecido en	
			la enseñanza habitual	los materiales del curso
De la estructura problematizada	Dedicar tiempo a plantear el interés que tiene tratar este tema, al principio			
	Plantear la cuestión ¿cómo vemos? como problema estructurante, cuya solución supone la construcción de una teoría geométrica de la luz y la visión.			
	Organizar la enseñanza de este tema con una estructura problematizada			
	Hacer que el índice o secuencia de apartados sea una estrategia posible para avanzar en el problema planteado			
Del tratamiento conceptual de la óptica geométrica	Establecer la necesidad de que llegue luz al ojo para que se produzca la visión, antes de abordar el estudio de los fenómenos ópticos.			
	Elaborar un sistema de representación geométrico idealizado de la luz.			
	Modelizar el ojo como un instrumento óptico formado por una lente y una pantalla con el que conceptualizar la imagen óptica.			
	Considerar la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción como hipótesis formuladas para explicar la visión y no como consecuencias de una determinada concepción de la naturaleza de la luz.			
	Desarrollar el tema en un contexto hipotético-deductivo, inventando un primer modelo de visión que debe ser puesto a prueba mediante su capacidad para explicar la visión indirecta, las anomalías visuales, el diseño de los instrumentos ópticos, ...			
	Plantear explícitamente algunos límites de aplicación de la teoría geométrica de la visión.			
De la apropiación	Existencia de oportunidades para expresar las ideas y someterlas a prueba.			
	Orientación de alumnos y profesores (saber qué se busca y para qué, dónde se está, qué queda por hacer, ...)			
	Plantear metas claras de aprendizaje y prever posibles obstáculos para alcanzarlas			
	Favorecer formas de pensar cercanas al trabajo científico.			
	Evaluación con sentido, como recapitulación y reflexión sobre lo avanzado y su firmeza.			
	Hacer que alumnos y profesores vean más atractiva la enseñanza.			

De acuerdo con la formulación de la segunda hipótesis, en este último instrumento, esperamos que los profesores reconozcan que el conjunto de aspectos que se presentan es muy importante para comprender cómo vemos y, por tanto, den puntuaciones de 7 o mayores que 7. Estas puntuaciones serán similares cuando valoren el grado en que estos aspectos son tratados por nuestra propuesta de enseñanza y diferirán sensiblemente de la puntuación que den al grado en que son tratados por la enseñanza habitual.

7.3.5 Visión general del diseño realizado para contrastar la segunda hipótesis

2ª Hipótesis: “La puesta en práctica de la secuencia de actividades propuesta para la enseñanza de la luz y la visión produce mejoras sustanciales respecto a la enseñanza habitual”		
DERIVACIONES. Lo que supondrá que.....	CONSECUENCIAS CONTRASTABLES Por lo que....	Instrumentos
H _{2.1} . Generará oportunidades en el aula favorecedoras de un aprendizaje con comprensión.	La observación de lo que ocurre en clase y la evaluación de los materiales producidos por los alumnos a lo largo de la secuencia, deberán mostrar oportunidades de aprendizaje.	Análisis de recapitulaciones C6-a
H _{2.2} . Producirá una mayor comprensión conceptual.	<ul style="list-style-type: none"> - Disminuirán los % de alumnos que presentan cada uno de los obstáculos a los indicadores de comprensión del modelo de visión de Kepler. - Los alumnos que sigan la secuencia de enseñanza experimental alcanzarán mejores niveles de comprensión global que los no tratados. 	Cuestionarios sobre conceptos C1-a, C2-a, C3-a, C4-a y C5-a Estadillo de asignación de nivel C7-a
H _{2.3} . Mejorará (o generará) las actitudes de los alumnos.	<ul style="list-style-type: none"> - Los alumnos que siguen la secuencia de enseñanza experimental conseguirán mejores indicadores de apropiación y actitudes que los no tratados. 	Valoración respecto a norma C8-a y Valoración abierta C9-a
H _{2.4} . Generará expectativas muy positivas sobre su potencialidad para mejorar la enseñanza y el aprendizaje en aquellos profesores que participan en cursos de formación donde pueden desarrollar, (re)elaborar y reflexionar sobre dicha secuencia.	<ul style="list-style-type: none"> - Valorarán positivamente la estructura problematizada de la secuencia de enseñanza propuesta. - Percibirán que la estructura problematizada de la secuencia de enseñanza propuesta puede producir mejoras en los indicadores de apropiación y en las actitudes de alumnos y profesores. - Valorarán positivamente el tratamiento de los conceptos. 	Valoraciones abiertas C6-p y C8-p Valoración respecto a norma C7-p y Valoración comparativa C9-p

CAPÍTULO 8

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CONTRASTACIÓN DE LA SEGUNDA HIPÓTESIS

A lo largo de este capítulo presentaremos y analizaremos los resultados obtenidos en la contrastación de la segunda hipótesis, esto es, mostraremos que los alumnos que han seguido la secuencia de enseñanza que comentamos en el capítulo 6 mejoran su aprendizaje y actitudes y que dicha secuencia genera expectativas muy positivas en los profesores que la conocen sobre las mejoras que producirá su puesta en práctica en el aula.

Como ya avanzamos anteriormente, la secuencia de enseñanza ha sido desarrollada por el autor de este trabajo y tres profesoras colaboradoras durante los cursos 2001-02, 2002-03 y 2003-2004. El desarrollo del tema tuvo una duración que osciló entre 22 y 28 sesiones de clase (cuando se incluyó el apartado de la visión del color).

8.1 Resultados que muestran que la secuencia de enseñanza genera oportunidades en el aula favorecedoras de un aprendizaje con comprensión

Ya hemos dicho que la secuencia de enseñanza que presentamos en el capítulo 6 incluye en los comentarios lo que ha pasado en las clases, tras cada actividad. En dichos comentarios se muestra parte de lo que los alumnos dicen, argumentan, debaten etc. y, por tanto, que el ambiente de las clases genera un ambiente hipotético-deductivo en el que la práctica totalidad de los alumnos se identifican. Remitimos, pues, a dicho capítulo para la descripción de lo que ocurre en las clases y presentamos en este apartado los resultados del análisis de las recapitulaciones intermedias A.17 y A.26 según el estadillo diseñado **C7-a** y ejemplos de los razonamientos y esquemas que realizan los estudiantes en estas actividades durante el desarrollo de secuencia de enseñanza.

Las recapitulaciones que vamos a analizar se han realizado durante una sesión de clase (unos 50 minutos) en la que los alumnos trabajaron de forma individual en situación de examen pero con la posibilidad de consultar su cuaderno de trabajo. En el caso de la segunda recapitulación (A.26), algunos alumnos, al requerir más tiempo para completar el trabajo, utilizaron parte de la siguiente sesión de clase. Los resultados fueron obtenidos con una muestra de 64 alumnos correspondientes a tres grupos experimentales de 3º de ESO, uno del profesor investigador y dos de profesores colaboradores implicados en el tratamiento experimental.

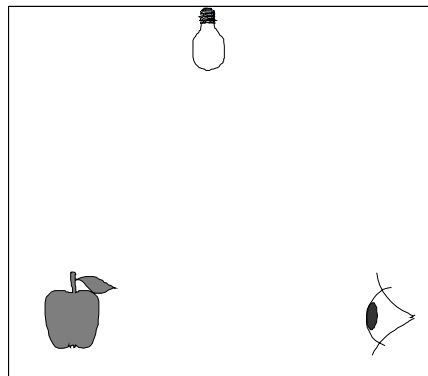
Recordamos a continuación lo enunciados de las recapitulaciones intermedias **A.17** y **A.26** analizadas que conforman el instrumento **C6-a**.

Enunciado de la primera actividad de recapitulación individual (C6-a)

A.17 A modo de recapitulación de lo tratado hasta aquí, explica cómo vemos un objeto situado en una habitación iluminada.

Para ello:

- i) Dibuja un diagrama de rayos en el cuadro del margen.
- j) Enuncia las hipótesis que hemos formulado para elaborar el modelo de visión referidas a las fuentes luminosas, a la propagación de la luz y al papel del ojo, etc.
- k) Da argumentos justificativos que apoyen esas hipótesis.
- l) Plantea los nuevos interrogantes que vamos a abordar a continuación.



Enunciado de la segunda actividad de recapitulación individual (C6-a)

A.26 Realizad una recapitulación de tema que estamos estudiando en donde se recoja:

- k) ¿qué problema hemos planteado?
- l) ¿qué estrategia hemos seguido?
- m) ¿cómo explicamos la visión directa de los objetos?
- n) ¿qué hipótesis hemos realizado respecto a las fuentes luminosas, al comportamiento de la luz y al comportamiento del ojo?
- o) ¿qué problemas vamos a abordar como consecuencia del modelo de visión directa elaborado?

Tabla 8.1a: Resultados de la valoración conceptual de las recapitulaciones

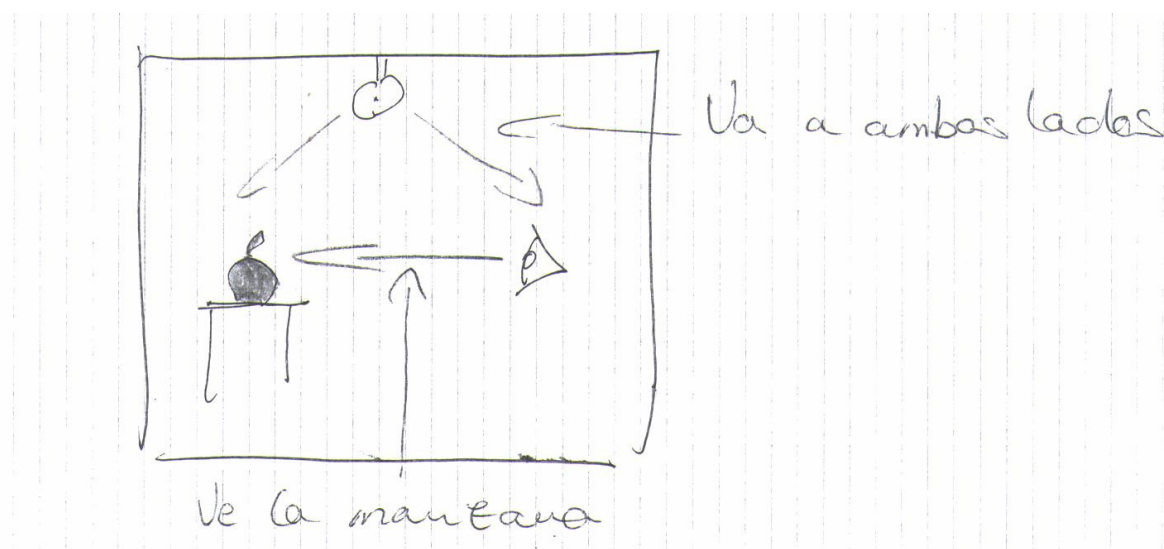
<i>Ideas que aparecen en las recapitulaciones</i>	A.17		A.26	
<i>% de alumnos que sobre la relación entre el objeto, la luz y el ojo expresan que:</i>	n= 64		n= 64	
	%	Sd	%	Sd
- El objeto es una fuente secundaria de luz.	86	4	94	3
- La luz es una entidad independiente que viaja en el espacio.	25	5	61	6
- El ojo es receptor de luz	75	5	89	4
<i>% de alumnos que sobre la representación geométrica e idealizada de la luz expresan que:</i>				
- La luz se propaga en línea recta.	63	6	60	6
- La luz no es visible en sí misma.	34	6	40	6
- Las fuentes extensas son consideradas como conjuntos de fuentes puntuales	25	5	67	6
- La luz que sale de cada punto de la fuente luminosa se representa mediante haces divergentes.	6	3	63	6
<i>% de alumnos que sobre la formación de la imagen óptica del modelo de Kepler expresan que:</i>				
- El ojo es considerado como un sistema óptico formado por una lente convergente y una pantalla.	---		87	4
- La imagen óptica se forma en la retina por concentración de haces de luz.	---		56	6
- Otros aspectos que completan el modelo de visión: la acomodación del cristalino, la apertura variable del diafragma del iris y la participación del cerebro en la sensación de la visión.	---		71	6
<i>% de alumnos en cuyos diagramas de visión:</i>				
- El ojo es receptor de rayos de luz.	63	6	17	5
- El ojo es receptor de haces de luz.	5	3	0	-
- El ojo es un sistema lente-pantalla donde se forma la imagen a partir de haces de luz (únicamente en A.26).	---		71	6
- El ojo no es receptor de luz.	33	6	11	4

Estos datos ponen de manifiesto un claro avance en la comprensión del modelo de visión ya que, desde la primera recapitulación, los estudiantes exponen cada vez más ideas básicas del modelo de visión de Kepler. En la primera recapitulación un 86 % de los alumnos se refiere a los objetos iluminados como fuentes secundarias de luz, un 75 % al ojo como receptor de luz, un 63 % a la propagación rectilínea de la luz y, en el 68 % de los diagramas de visión, el ojo es considerado receptor de luz. Comparando estos resultados con los obtenidos por los alumnos del mismo nivel, tanto antes como después de la enseñanza habitual (véase tabla 5.1 en la página 167), nos permite afirmar que ya en la primera parte del desarrollo del tema, los alumnos que han seguido nuestra secuencia de enseñanza experimentan grandes mejoras. No obstante, existen otras ideas básicas del modelo de Kepler cuyos porcentajes aún son muy escasos: por ejemplo sólo el 25 % de los alumnos se refiere

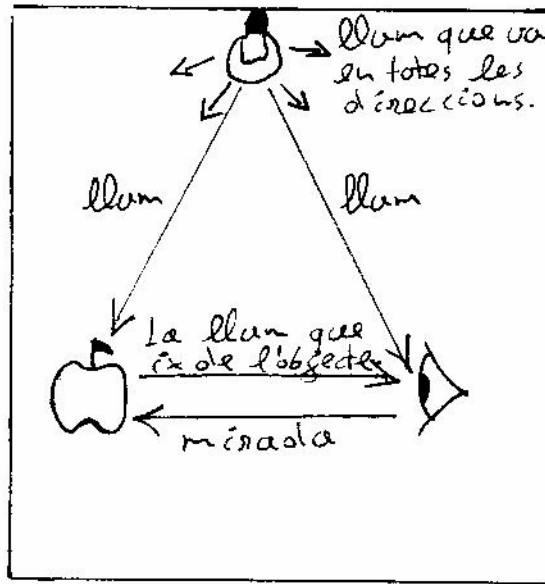
a la luz como ente independiente que viaja en el espacio o considera a las fuentes extensas como conjuntos de fuentes puntuales y únicamente el 6% representa la luz que llega al ojo mediante haces divergentes, a pesar de haber sido conceptos tratados en la secuencia de enseñanza hasta ese momento. Todos los aspectos analizados mejoran en la segunda recapitulación, incluso algunos alcanzan valores del 90%, pero sobre todo, se recuperan los porcentajes menores comentados anteriormente hasta el 61%, 67% y 63% respectivamente. Además, en esta segunda recapitulación los estudiantes consideran mayoritariamente (87%) al ojo como un sistema óptico lente-pantalla, en el 71% de los casos dibujan haces divergentes de luz para formar la imagen en la retina y, cuando dibujan diagramas que expliquen la visión de los objetos, el ojo es representado como receptor de luz por el 89% de los alumnos.

Si las mejoras observadas en los trabajos de la primera recapitulación ya eran grandes, tras la segunda recapitulación las diferencias respecto a los estudiantes no tratados son enormes incluso en los aspectos más difíciles, lo que es un indicador de que el aprendizaje no es una cuestión de "todo o nada" inmediatamente después de tratar un concepto sino que se produce paulatinamente, a lo largo de la secuencia, y que, por tanto, durante el desarrollo de la secuencia existen oportunidades reiteradas para mejorar el aprendizaje.

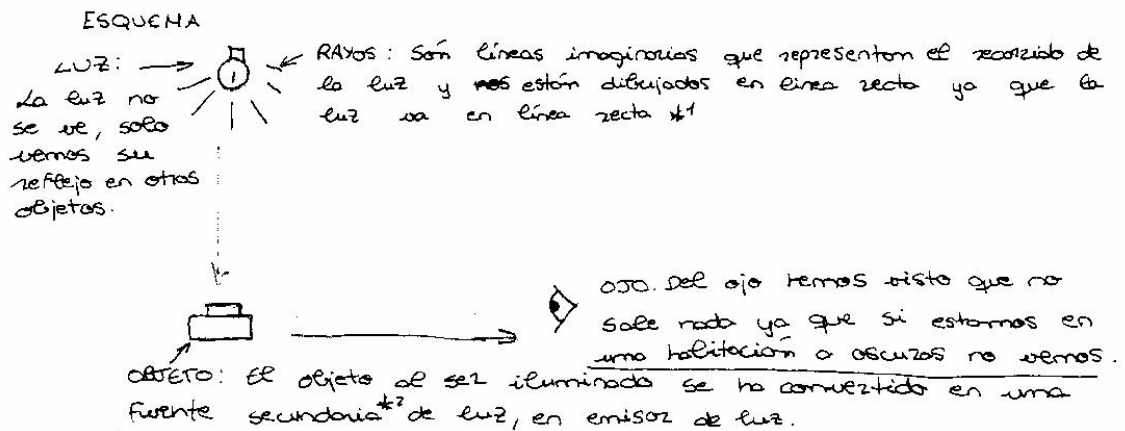
Los diagramas que realizan en la primera recapitulación reflejan mejoras respecto de los que realizan antes de la enseñanza (véase capítulo 5), sin embargo, la tercera parte de ellos no son compatibles con las metas parciales a conseguir hasta ese momento. Los dibujos siguientes son algunos ejemplos de diagramas de visión de esos estudiantes:



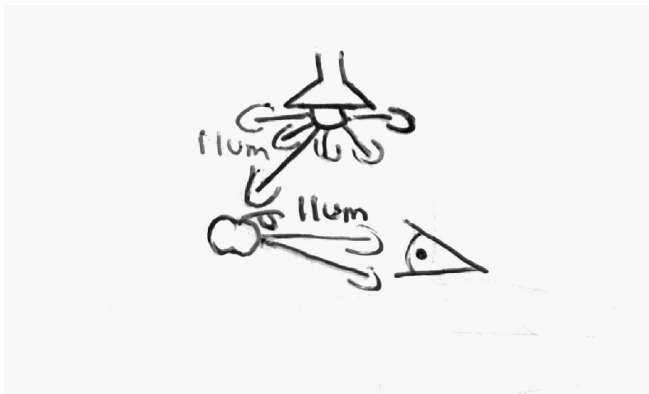
Algunos manifiestan algunas mejoras, aunque mezclan un modelo de ojo receptor de luz con uno emisor de "la mirada".



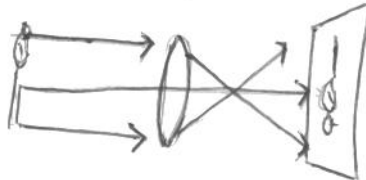
El esquema más repetido en la primera recapitulación realizado por el 63 % de los alumnos es como el que se representa a continuación:



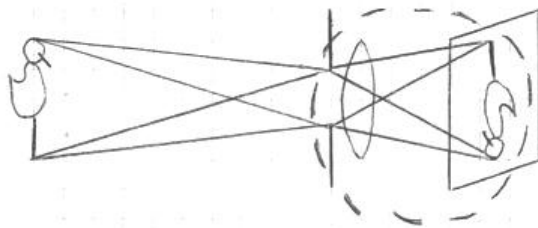
Y sólo un 6% de los casos de la primera recapitulación representa esquemas en los que señalan el haz divergente de luz:



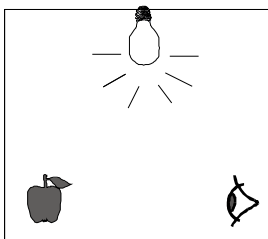
En la segunda recapitulación se mejoran los tipos de esquemas de visión que realizan, aunque algunos de ellos muestren algunas de las carencias señaladas anteriormente. En el que mostramos a continuación, aunque presenta avances indudables: el ojo es considerado un sistema óptico lente-pantalla y el objeto emisor de varios puntos de luz, se representa un solo rayo procedente de cada punto para formar la imagen en la retina, no puede ser considerado correcto.



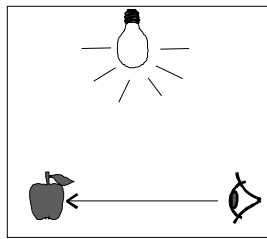
El diagrama típico (71 % de los casos) realizado por los alumnos experimentales en la segunda recapitulación es como el ejemplo siguiente:



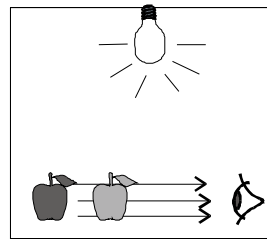
Estos esquemas y porcentajes contrastan fuertemente con los realizados por los alumnos antes de la enseñanza, como se puede observar en los esquemas siguientes recuperados aquí del capítulo 5 donde se analizaron sus ideas.



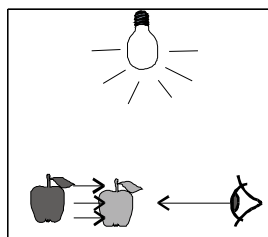
A: Vemos porque la miramos(23%)



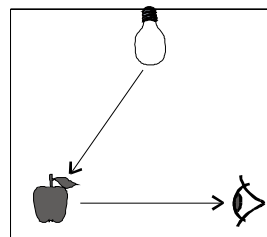
B: Vemos porque el ojo envía "la mirada" hacia la manzana (24%)



C: Vemos porque de ella sale una imagen que llega hasta el ojo (21%)



D: Vemos porque de ella sale una imagen y el ojo envía "la mirada"(21%)



E: Vemos porque la luz que sale de ella llega hasta el ojo (11%)

En la tabla siguiente mostramos el resto de los aspectos valorados del estadillo de observación de las recapitulaciones

Tabla 8.1b: Resultados del grado de orientación de los alumnos y análisis cuantitativo de la calidad del texto en las recapitulaciones intermedias

	A.17 n = 64		A.26 n = 64	
	%	Sd	%	Sd
<i>% de alumnos que en las recapitulaciones intermedias manifiestan orientación (expresan el problema planteado, la estrategia seguida, nuevos problemas abiertos,..)</i>	53	6	66	6
<i>% de alumnos que en las recapitulaciones intermedias escriben frases con sentido físico:</i>				
- Ninguna frase.	3	2	0	-
- Entre 1 y 6 frases.	49	6	8	3
- Entre 6 y 10 frases.	42	6	20	5
- 10 o más frases.	7	3	72	6
Nº medio de frases con sentido físico por alumno	5,7	2,2	11,1	3,6
<i>% de alumnos que en las recapitulaciones intermedias escriben frases argumentadas:</i>				
- Ninguna frase.	26	5	20	4
- Una o dos frases.	50	6	34	6
- Entre 3 y 5 frases.	23	2	38	6
- Más de 5 frases.	2	1	8	3
Nº medio de frases argumentadas por alumno	1,6	1,4	2,6	2,2

Al analizar estos datos también se observa una mejoría paulatina a lo largo del desarrollo de la secuencia didáctica, tanto en el nº de frases que indican apropiación como en el nº de frases con sentido físico y en el nº de frases de tipo justificativo/argumentativo.

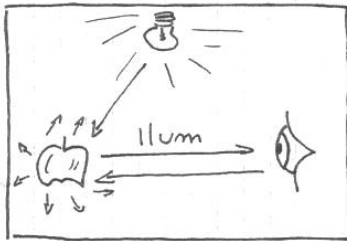
Para ilustrar estos resultados y clarificar el criterio de catalogación de las frases, exponemos a continuación ejemplos de fragmentos de las recapitulaciones de los alumnos transcritas y valoradas.

Fragmento 1: Ejemplo de comentario de la segunda recapitulación en el que el alumno manifiesta orientación.

Al començar el tema nos planteamos una serie de problemas para realizarlos y contestar nuestras preguntas. ¿Cómo vemos? ¿Qué tenemos en nuestro ojo? ¿Qué pasa cuando vemos de cerca o de lejos? ¿Sale algo del ojo cuando vemos un objeto?

"... Al comenzar el tema nos planteamos una serie de problemas para realizarlos y contestar nuestras preguntas: ¿Cómo vemos?, ¿Qué tenemos en nuestro ojo?, ¿Qué pasa cuando vemos de cerca o de lejos?, ¿Sale algo del ojo cuando vemos un objeto?..."

Fragmento 2. Un ejemplo de la primera recapitulación donde el alumno manifiesta sensación de aprendizaje



(B) Abans pensavem que veïem la poma perquè la pereta la il·luminava. També pensavem que veïem la poma pel simple fet de que l'ull la mirava.

Mai vam pensar que la poma emetia llum cap a l'ull i que per això la veïem, però sempre em tingut clar que la llum es propagava en línia recta.

(C) La veritat és que no estavem completament en lo cert. La conclusió que vam pendre és que; la ~~llum~~ peret emetia llum cap a la poma i aquesta l'emetia cap a l'ull, i per això la podem veure. O siga, tots els cosos que reben llum, la puen. És com si fos una pilota, la vam passant fins que tots l'han tocat. Per això, amb una oscuritat total, quasi mai ens trovem, perquè a la mínima font de llum, il·lumina, (aunque siga molt poc), els objectes del voltant.

"...Antes pensábamos que veíamos la manzana porque la bombilla la iluminaba. También pensábamos ojo la miraba. Nunca pensábamos que la manzana emitía luz

hacia el ojo y que por eso la veíamos, pero siempre hemos tenido claro que la luz se propagaba en línea recta.

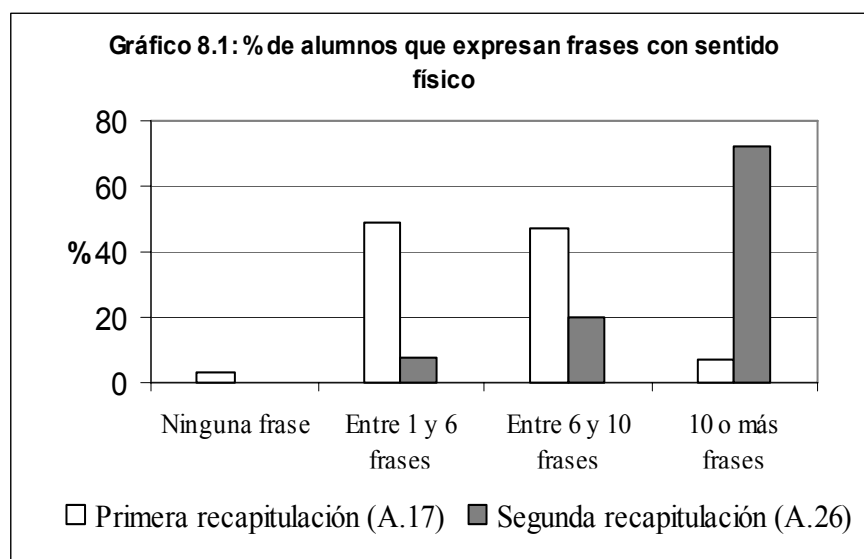
La verdad es que no estábamos completamente en lo cierto. La conclusión que tomamos es que la bombilla emitía luz hacia la manzana y ésta la emitía hacia el ojo, y por eso la podemos ver. O sea, todos los cuerpos que reciben luz la pasan. Es como si fuera una pelota, la van pasando hasta que todos la han tocado. Por eso, en la oscuridad total, casi nunca nos encontramos, porque una mínima fuente de luz ilumina (aunque sea muy poco) a los objetos de alrededor.

Fragmento 3: Un ejemplo donde el alumno manifiesta orientación al plantear nuevos interrogantes al finalizar la primera recapitulación.

*¿Com funciona l'ull?
 ¿De quines parts esta format?
 ¿Que desempeña cada part de l'ull?
 'genció'*

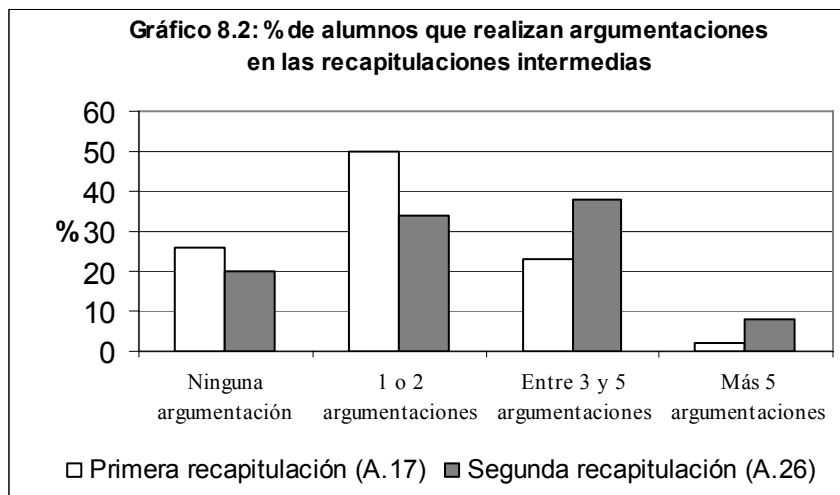
"...¿Cómo funciona el ojo?, ¿De qué partes está formado?, ¿Qué función desempeña cada parte del ojo?"

Por otro lado, el nº de frases con sentido físico que escriben en las recapitulaciones intermedias es un indicador importante para mostrar que en el desarrollo de la secuencia de enseñanza se generan oportunidades para aprender con comprensión. La gráfica siguiente nos muestra la distribución del nº de frases escritas en ambas recapitulaciones.



Para poder valorar de un modo contextualizado la gráfica anterior, hemos agrupado el nº de frases en los mismos intervalos utilizados por Verdú (2004) en su amplio estudio que incluye centenares de alumnos que han sido instruidos dentro de una enseñanza problematizada y otros tantos instruidos convencionalmente. Los resultados obtenidos en nuestros grupos experimentales y en el tema objeto de esta investigación, se separan muy ampliamente del nº medio de frases con sentido de los alumnos no tratados y son similares a los obtenidos con alumnos experimentales en otros temas. Mientras que el nº medio de frases con sentido en la primera recapitulación es de 5,7 y en la segunda de 11,1, en los alumnos con enseñanza convencional sólo es de 3,0. Además, que el nº de frases con sentido aumenta sensiblemente durante el desarrollo del tema viene avalado porque más del 70% de los alumnos experimentales de 3º de ESO escriben más de 10 frases de este tipo en la segunda recapitulación.

El nº de frases con sentido ha sido completado con un análisis de las ideas expresadas con justificación o argumentación. En la gráfica siguiente, representamos la distribución del nº de argumentos utilizados en ambas recapitulaciones intermedias para analizar su evolución.



Se observa claramente como en la segunda recapitulación disminuye el grupo de alumnos que realizan pocas argumentaciones conforme aumenta el porcentaje de los que realizan más. Mientras que en la primera recapitulación la mayoría de los alumnos escribe 1 o 2 frases argumentadas, en la segunda, la mayoría de los estudiantes escribe entre 3 y 5 frases de este tipo. Para ilustrar estos resultados, clarificar el criterio de su catalogación, y mostrar que en desarrollo de la secuencia de

enseñanza se generan ocasiones para el aprendizaje con comprensión, exponemos a continuación algunos ejemplos de fragmentos de las recapitulaciones de los alumnos transcritas y valoradas.

Ejemplo nº 1. En el siguiente fragmento encontramos una argumentación sobre una de las hipótesis del modelo de visión más trascendentes y que los alumnos utilizan con más frecuencia como es el considerar los objetos iluminados como fuentes luminosas:

En aquesta practica es pot demostrar que dels objectes no opacs quan li arriben llum reflecteix llum però difusa.

De la llanterna ixen raigs de llum arriben a l'objecte no opac que es una cartulina de color groga, de la cartulina es reflecta la llum i en el sostre apareix el color de la cartulina.

Conclusió:
Tots els objectes il·luminats emeten llum, excepte el negre.

La llum que emeten és difusa i cap a totes les direccions.

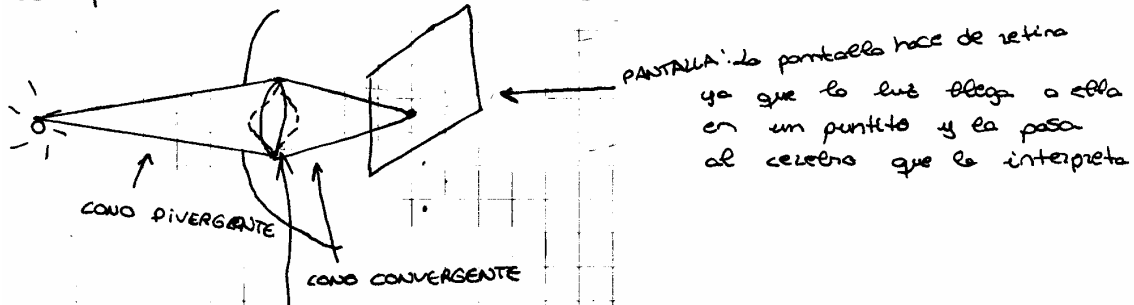
"Con esta práctica se puede demostrar que de los objetos no opacos (debe decir no transparentes) cuando les llega luz reflejan luz pero difusa. De la interna salen rayos de luz (que) llegan al objeto no opaco (no transparente) que es una cartulina amarilla, de la cartulina se refleja la luz y en el techo aparece el color de la cartulina. Conclusión: Todos los objetos iluminados emiten luz, excepto el negro. La luz que emiten es difusa, sale hacia todas las direcciones."

En este fragmento, el alumno justifica la emisión de luz de los cuerpos iluminados apoyándose en la observación de una experiencia de clase.

Ejemplo nº 2. En el siguiente fragmento encontramos una argumentación sobre la modelización del ojo como sistema óptico lente-pantalla.

DJO

El ojo recibe la información con la luz



LENTE - CRISTALINO: hace de cristalino la lente y su función es ~~para~~ transformar el caño divergente de luz que llega en caño convergente, también tiene la misión de emitir en la retina solo un punto de luz por lo que se contrae o estira.

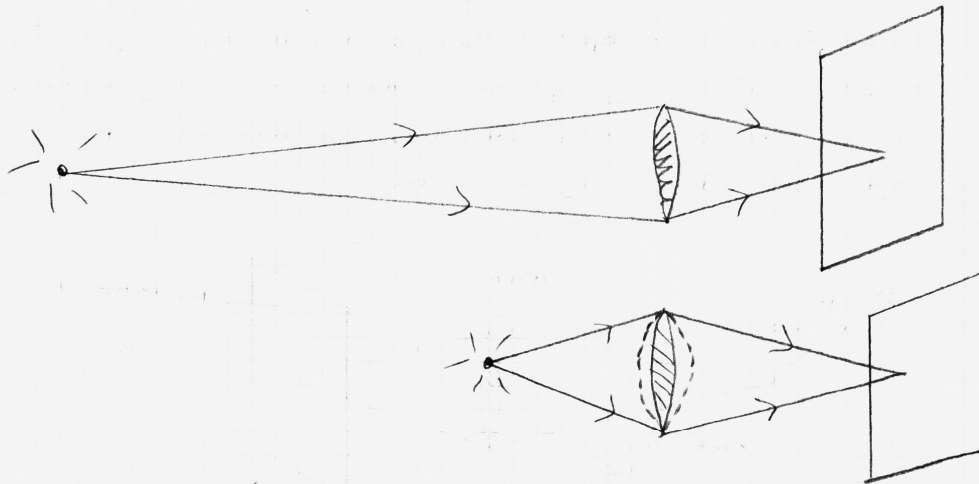
Hicimos esto con una pantalla (retina), lente (cristalino) y una bombilla y como no se podía contraer la lente como el cristalino a lo que hacíamos era alejar la pantalla

En este fragmento el alumno describe papel de la retina asimilándolo con una pantalla y el del cristalino como una lente convergente, pero apoyándose en el esquema, en el que ha dibujado un cristalino de curvatura variable, explica la función de acomodación del ojo por analogía al funcionamiento óptico de un sistema lente-pantalla. La transcripción de la última frase es:

"Hicimos esto con una pantalla (retina), lente (cristalino) y una bombilla y como no se podía contraer la lente como (lo hace) el cristalino, lo que hacíamos era alejar la pantalla".

Ejemplo nº 3. En el siguiente fragmento el alumno argumenta, de forma más clara que en el caso anterior, sobre la acomodación del ojo, relacionando el concepto de imagen óptica del modelo de visión de Kepler y las experiencias realizadas con lentes convergentes.

En la pantalla, ^{si} veíamos un punto nítido, decíamos que el objeto estaba bien enfocado, y si por el contrario no se veía claro, el objeto se encontraba desenfocado. Nosotros podíamos mover la pantalla hasta enfocar bien, pero en el interior de nuestro ojo no podemos desplazar la retina, por lo que ~~to~~ unos músculos hacen curvar más o menos el cristalino. Con esto se consigue hacer el haz convergente más o menos cerca.



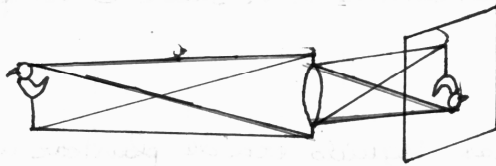
Cuanto más cerca esté un objeto de nuestro ojo, más le cuesta enfocarlo puesto que el ángulo del haz convergente es más amplio y por lo tanto se junta en punto más alejado. Si utilizamos un lente más curvada reduciremos la distancia y por ello el cristalino de hace más curvo o menos dependiendo de la distancia a la que se encuentren los objetos.

En este fragmento, cuya argumentación principal transcribimos a continuación, el alumno se apoya en trazados de rayos y en el modelo de Kepler para explicar la acomodación del ojo para la visión de objetos cercanos.

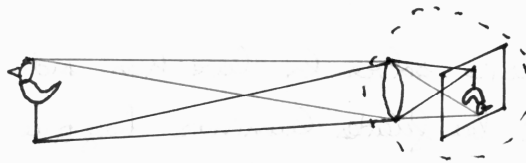
"... Nosotros podíamos mover la pantalla hasta enfocar bien, pero en el interior de nuestro ojo no podemos desplazar la retina, por lo que unos músculos hacen curvar más o menos el cristalino. Con esto se consigue hacer el haz convergente más o menos curvo." ...

Ejemplo nº 4. En el fragmento siguiente se argumenta, apoyándose en el modelo de visión de Kepler, la función del diafragma del iris.

El comportamiento del ojo es parecido al experimento que hicimos que consistía en poner una bombilla y delante un objeto. Hacemos el haz convergente de la luz entre por una lente y salga reflejado en una pantalla. La figura del objeto sale reflejado al revés.



El ojo lo que hace es que el diafragma del iris regula inconscientemente (dilatando más o menos la pupila)



la cantidad de luz que entra en el ojo humano.

En estos esquemas el alumno traza haces divergentes hasta la lente del cristalino. En el segundo dibujo más estrechos para representar que el diafragma del iris se ha contraído. La imagen que dibuja en la pantalla es la misma en ambos casos y explica que la función del iris es "...regula inconscientemente la cantidad de luz que entra en el ojo".

Podemos concluir que en el desarrollo de la secuencia de enseñanza se generan oportunidades para aprender con comprensión ya que el análisis pormenorizado de las recapitulaciones revela que los alumnos experimentales:

- a) Expresan por escrito, y en cada recapitulación más, las características básicas del modelo de visión.

- b) Dibujan diagramas de visión que se alejan de los esquemas alternativos encontrados en los estudiantes antes de la enseñanza.
- c) Escriben frases que permiten afirmar que se sienten cada vez más orientados expresando el problema al que se enfrentan, alguna característica de la estrategia seguida o los problemas abiertos que quedan por resolver.
- d) Escriben cada vez un mayor número de frases con sentido físico y mucho mayor que los alumnos sin tratamiento que se recogen en el trabajo de Verdú (2004). Un valor medio de 5,7 frases por alumno en la primera recapitulación y 11,1 frases en la segunda frente a 3 frases en alumnos que han seguido enseñanza convencional.
- e) El número de alumnos que expresan ideas argumentadas, justificadas o que utilizan funcionalmente el modelo de Kepler aumenta en cantidad y complejidad a lo largo del tema.

8.2 Resultados que muestran que los alumnos tratados mejoran la comprensión conceptual

8.2.1 Resultados que muestran la superación de los obstáculos para la comprensión del modelo de Kepler

Recordemos que habíamos identificado y secuenciado “grandes pasos necesarios” o metas parciales para llegar a la comprensión genuina del modelo de visión de Kepler. Del mismo modo, habíamos descrito indicadores de comprensión asociados a cada una de dichas metas parciales, que hemos utilizado para valorar la información obtenida de los cuestionarios de los alumnos (ver apartado 4.2 en página 95 y siguientes).

A continuación presentamos, para cada una de las metas parciales, los porcentajes de alumnos que tienen obstáculos (ideas, razonamientos, dibujos,...) cuya superación es necesaria para conseguir la meta parcial correspondiente. Cuando se ha medido un mismo obstáculo en distintas situaciones, incluimos también, en esas tablas, el valor medio de los porcentajes de alumnos que lo presentan.

Las características de las distintas muestras de alumnos que hemos utilizado para esta comparación son:

ESO-1: 71 estudiantes de ESO (13-15 años) de un centro público, antes de recibir enseñanza sobre óptica (curso 2000-2001).

ESO-2: 183 estudiantes de ESO (13-15 años), 98 de 2º de ESO de un centro privado y 85 de 3º de ESO de un centro público, después de recibir enseñanza habitual de la óptica geométrica por un período comprendido entre 10 y 16 sesiones con un profesor y una profesora con interés por la enseñanza, que participan habitualmente en actividades formativas, pero que no llevaban a cabo una enseñanza de estructura problematizada. Las respuestas se recogieron en una sesión habitual de clase en situación de examen menos de una semana después de terminar el tema (curso 2002-03).

BAC-3: 59 estudiantes de 2º curso de bachillerato de cuatro centros públicos, después de la enseñanza habitual de la óptica (2000-2001). Los alumnos recibieron instrucción en óptica geométrica durante períodos comprendidos entre 20 y 24 sesiones

ESO-4: 147 estudiantes de ESO de entre 13 y 15 años (126 de 3º de ESO y 21 de 2º de ESO) después de la instrucción durante un período comprendido entre 22 y 28 sesiones con una estructura problematizada como la propuesta en el capítulo 6, pertenecientes a 10 grupos de dos IES de la provincia de Alicante y que fue impartida por el profesor/ investigador y 3 profesoras colaboradoras (cursos 2001-02, 2002-03 y 2003-04). Las tres profesoras colaboradoras habían asistido a cursos de formación con el profesor investigador o formaban parte del equipo que diseñó la unidad didáctica. El profesor investigador asesoró a las profesoras colaboradoras en varias ocasiones durante el desarrollo de la secuencia de enseñanza.

ESO-5: 28 estudiantes de Física y Química de 4º ESO (15-16 años) que respondieron el cuestionario el curso siguiente a la puesta en práctica del tratamiento experimental (curso 2003-2004).

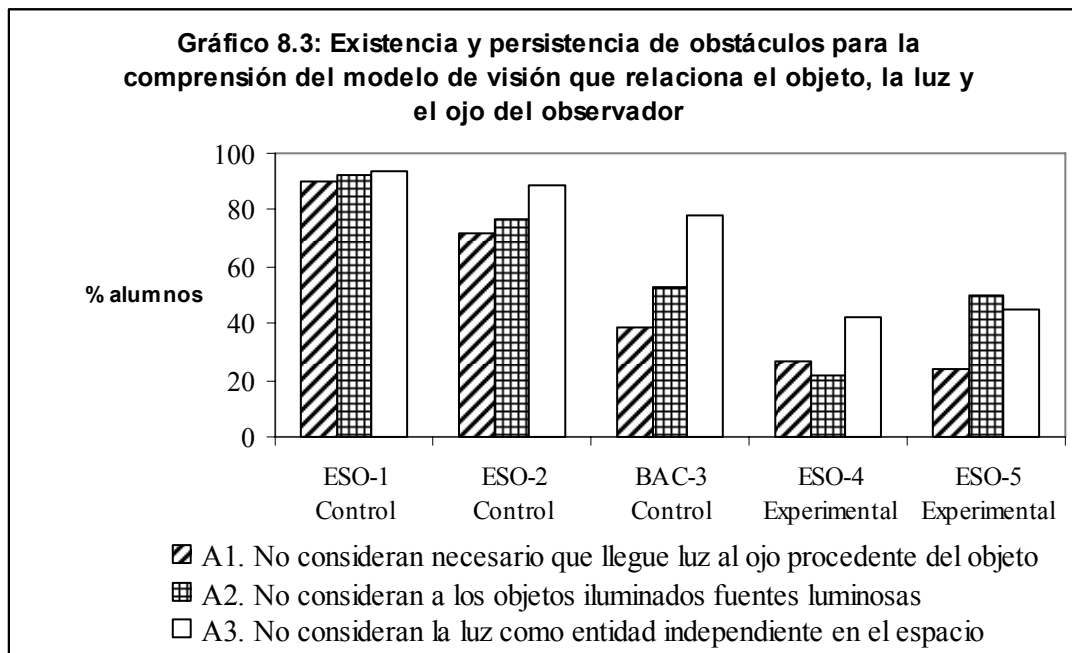
En lo sucesivo, las muestras **ESO-1**, **ESO-2** y **BAC-3** las consideraremos grupos de control, la muestra **ESO-1** será tomada como referencia para comparar las mejoras de nuestra secuencia respecto a la situación antes de la enseñanza y las muestras **ESO-4** y **ESO-5** grupos experimentales.

La composición de los cuestionarios que respondieron cada uno de estos grupos de alumnos se puede consultar en las tablas 7.1 y siguientes a partir de la página 299 y los enunciados de cada una de las cuestiones en el anexo 1.

Tabla 8.1: Comparación de los obstáculos para la primera meta parcial: la adquisición de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo del observador

<i>A. Obstáculos que indican que no se dispone de un modelo en el que se relaciona el objeto, la luz y el ojo del observador:</i>	<i>Grupos de control</i>						<i>Grupos experimentales</i>			
	<i>Antes</i>		<i>Después de la enseñanza</i>				<i>Final del tratamiento</i>		<i>Al curso siguiente</i>	
	ESO-1 n =71 % Sd		ESO-2 n= 183 % Sd		BAC-3 n=59 % Sd		ESO-4 n=147 % Sd		ESO-5 n=28 % Sd	
A₁. No consideran necesario que llegue luz al ojo procedente del objeto:										
- Para ver directamente.	89	4	60	4	34	6	14	3	0	-
- Para ver en un espejo.	92	3	83	3	36	6	19	3	14	7
- Para ver un objeto sumergido.	92	3	---		47	6	47	4	57	9
- Para verlo en oscuridad total.	85	4	---		---		---		---	
% medio de existencia o persistencia del obstáculo A₁	90	3	72	3	39	6	27	4	24	8
A₂. No consideran a los objetos iluminados fuentes luminosas, por lo que:										
- No señalan que los objetos emitan luz al ser iluminados.	92	3	78	3	53	6	31	4	50	9
- No citan objetos iluminados como ejemplos de fuentes luminosas.	-----		76	3	-----		13	3	-----	
% medio de existencia o persistencia del obstáculo A₂	92	3	77	3	53	6	22	3	50	9
A₃. No consideran la luz como una entidad física que viaja en el espacio, por lo que:										
- Creen que sólo existe luz en las fuentes luminosas o en sus proximidades.	99	1	86	3	70	6	27	4	39	9
- Creen que la luz desaparece cuando se apaga la fuente luminosa.	89	4	92	2	85	5	57	4	50	9
% medio de existencia o persistencia del obstáculo A₃	94	3	89	2	78	5	42	4	45	9

En el gráfico siguiente visualizamos las diferencias entre los porcentajes medios de los alumnos de grupos de control y experimentales sobre la existencia o persistencia de obstáculos al indicador de comprensión evaluado en la tabla anterior.



La tabla y gráfica anteriores muestran claramente una gran disminución de los porcentajes de existencia o persistencia de todos los obstáculos para conseguir el primer paso para la comprensión del modelo de visión de Kepler en los alumnos de los grupos experimentales. Así, por ejemplo, el 90% de alumnos de ESO antes de la enseñanza y el 72% después de la enseñanza habitual piensan que es posible la visión de los objetos sin que llegue luz al ojo del observador (A_1), mientras que este porcentaje decrece drásticamente hasta el 27 % después de la instrucción experimental, un porcentaje claramente menor, incluso, que el de los alumnos de bachillerato (39 %) después de terminar un tema sobre óptica. Resultados similares se obtienen al comparar los porcentajes medios de alumnos que no consideran a los objetos iluminados como fuentes luminosas (A_2) ni a la luz como una entidad física independiente del ojo y de la fuente que viaja en el espacio (A_3).

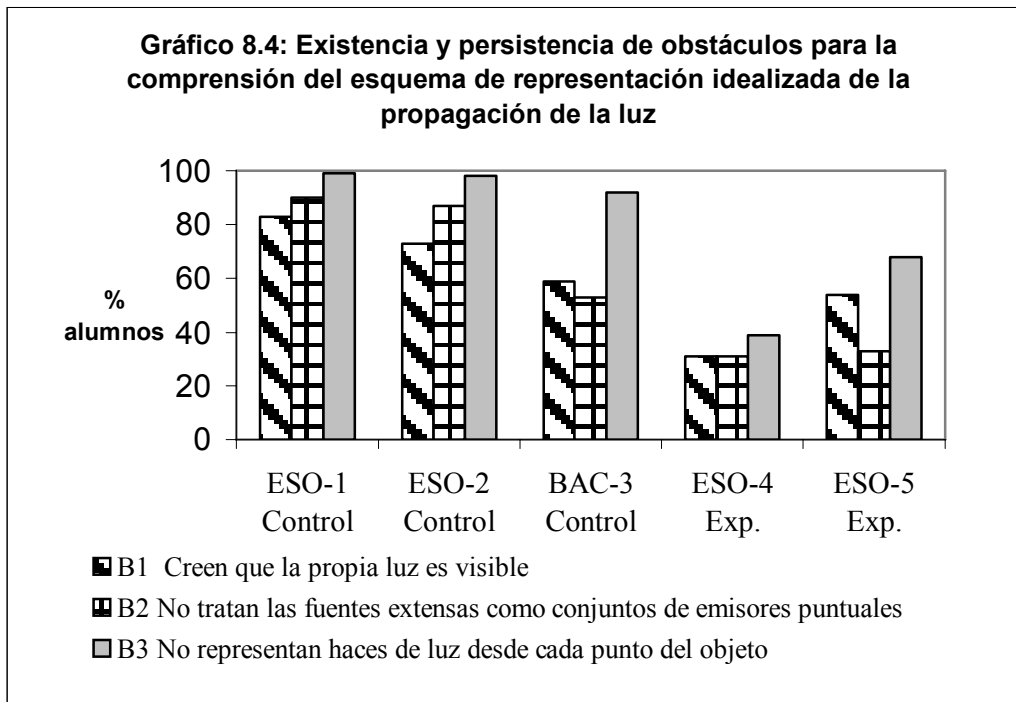
Es necesario resaltar que las diferencias a favor de los grupos experimentales se mantienen incluso un año después de haber recibido instrucción. Las diferencias a favor de este grupo experimental (un año después, muestra ESO-5) son enormes (estadísticamente significativas, $\alpha \ll 0,01$) respecto al grupo de control de ESO que ha recibido instrucción y continúan siendo claramente favorables (excepto en A_2) respecto al grupo de Física de 2º curso de Bachillerato ($\alpha < 0,05$, que tienen una edad media tres años mayor que la que tenía el grupo experimental cuando recibió instrucción) inmediatamente después del tema de óptica. Cuando los cuestionarios se pasan inmediatamente después de la enseñanza (muestra ESO-4), las diferencias son estadísticamente significativas en todas las comparaciones ($\alpha < 0,01$).

De la misma forma en que hemos procedido con los resultados de los obstáculos del primer indicador de comprensión del modelo de visión de Kepler, presentamos a continuación las tablas y gráficas para la comparación de los porcentajes de alumnos que presentan obstáculos para disponer de un esquema de representación idealizado de la propagación de la luz potencialmente explicativo/predictivo.

Tabla 8.2: Comparación de los obstáculos para la segunda meta parcial: La disponibilidad de un esquema de representación idealizado de la luz y potencialmente explicativo/predictivo

<i>B. Obstáculos que indican que no se dispone de un esquema de representación idealizado de la luz potencialmente explicativo-predictivo:</i>	<i>Grupos de control</i>						<i>Grupos experimentales</i>			
	<i>Antes</i>		<i>Después de la enseñanza</i>				<i>Final del tratamiento</i>		<i>Al curso siguiente</i>	
	ESO-1 n = 71 % Sd		ESO-2 n= 183 % Sd		BAC-3 n = 59 % Sd		ESO-4 n = 147 % Sd		ESO-5 n= 28 % Sd	
B₁. Creen que la propia luz es visible.	83	4	73	3	59	6	31	4	54	9
B₂. No consideran a las fuentes extensas de luz como conjuntos de emisores puntuales:										
- Al explicar la visión directa de un objeto.	83	4	88	2	59	6	33	4	32	9
- Al representar la luz difundida por un objeto.	96	2	94	2	88	4	44	4	61	9
- Al explicar la visión de un objeto en un espejo.	87	4	94	2	47	6	38	4	36	9
- Al explicar la formación de la imagen en una pantalla.	92	3	73	3	19	5	7	2	4	4
% medio de existencia o persistencia del obstáculo B₂.	90	3	87	2	53	6	31	4	33	9
B₃. No representan haces divergentes de luz emitidos desde cada punto del objeto:										
- Al explicar la visión directa de un objeto.	100	-	97	1	97	2	42	4	71	9
- Al explicar la visión de un objeto en un espejo.	100	-	98	1	97	2	35	4	64	9
- Al explicar la visión de un objeto sumergido en agua.	100	-	----		97	2	53	5	93	5
- Al explicar la formación de una imagen en una pantalla.	100	-	99	1	93	3	26	4	50	9
- Al predecir la sombra y penumbra.	94	3	-----		76	6	----		64	9
% medio de existencia o persistencia del obstáculo B₃.	99	1	98	1	92	4	39	4	68	9

En el gráfico 8.2 se representan los porcentajes medios de los alumnos de grupos de control y experimentales que tienen obstáculos que impiden disponer de un esquema de representación idealizado de la propagación de la luz acorde con el modelo de visión de Kepler.



Si tomamos como referencia lo que piensan los alumnos de ESO antes de la enseñanza de la óptica, vemos que la enseñanza habitual deja los obstáculos prácticamente inalterados. Podemos afirmar que la enseñanza habitual del tema analizado sirve de muy poco. Es verdad que en los grupos de ESO de control se ha dedicado menos tiempo a la enseñanza de la óptica (12 horas frente a 22 horas en los grupos experimentales), pero las mejoras obtenidas en esos alumnos son prácticamente nulas. La situación mejora algo en los alumnos de 2º curso de Bachillerato, inmediatamente después de tratar el tema de óptica, pero más de la mitad tienen obstáculos de las tres categorías en esta meta parcial y más del 90 % no representa haces divergentes de luz desde cada punto del objeto, un aspecto crucial para que el modelo de visión pueda tener carácter predictivo.

Las diferencias a favor del grupo experimental inmediatamente después del tratamiento (ESO-4) respecto los grupos de control del mismo nivel son enormes (nivel de significación $\alpha \ll 0,001$), y se mantienen, aunque menos pronunciadas

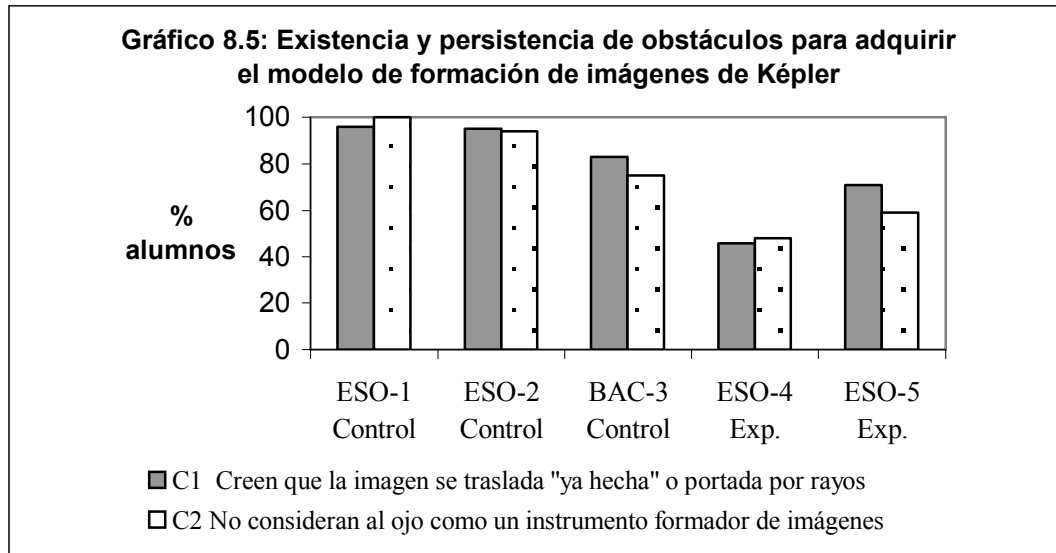
(pero significativas para $\alpha < 0,001$) un año después del tratamiento. Debe resaltarse, a modo de ejemplo, que sólo un 32 % de los alumnos experimentales de 3º de ESO (ESO-4) no dibujan haces divergentes de luz desde cada punto del objeto visible, frente al 92 % de los alumnos de Física de 2º curso de Bachillerato que muestran esta carencia fundamental. No obstante, un año después del tratamiento, los alumnos siguen pensando en las fuentes extensas como conjuntos de emisores puntuales, pero el 68 % no dibuja haces divergentes de luz, lo que indica que dicho aspecto es difícil de asumir, al menos para alumnos de ESO.

A continuación presentamos las tablas y gráficas sobre los obstáculos para conseguir la tercera meta parcial: adquirir un modelo de formación de imágenes con capacidad explicativa y predictiva (el modelo de Kepler).

Tabla 8.3: Comparación de los obstáculos para la tercera meta parcial: adquirir el modelo de formación de imágenes de Kepler

<i>C. Obstáculos que indican que no se concibe la imagen la imagen óptica y su formación según el modelo de Kepler:</i>	<i>Grupos de control</i>						<i>Grupos experimentales</i>			
	Antes		Después de la enseñanza				Final del tratamiento		Al curso siguiente	
	ESO-1 n = 71 % Sd		ESO-2 n= 183 % Sd	BAC-3 n=59 % Sd			ESO-4 n=147 % Sd		ESO-5 n=28 % Sd	
C₁. Creen que la imagen se traslada “ya hecha” desde el objeto o que los rayos son portadores de cada uno de los puntos de la imagen, lo que se manifiesta por:										
. No realizar correctamente los esquemas de formación de la imagen que se ve:										
- Al mirar a un espejo.	100	-	99	1	97	2	54	4	93	5
- Al mirar hacia un objeto sumergido.	100	-	----		95	3	60	5	96	4
- Al mirar a una pantalla donde se ve la imagen formada por una lente convergente.	100	-	98	1	86	5	27	4	50	9
. Considerar que la imagen que se ve en una pantalla:										
- se mueve con la pantalla.	97	2	95	2	78	5	45	4	75	8
- existe aunque se quite la lente.	91	3	95	2	69	6	60	4	64	9
- se ve la mitad al tapar media lente.	90	4	80	3	73	6	29	4	46	9
% medio de existencia o persistencia del obstáculo C₁	96	2	95	2	83	5	46	4	71	9
C₂. No consideran al ojo como un instrumento óptico formador de imágenes, por lo que:										
- No explican la percepción de la forma y el tamaño de los objetos que vemos a partir de la imagen retiniana.	-		97	1	53	6	41	4	61	9
- El ojo no participa como receptor de luz en los trazados gráficos de formación de la imagen en un sistema lente-pantalla.	100	-	90	2	97	2	55	4	57	9
% medio de existencia o persistencia del obstáculo C₂	100	-	94	2	75	6	48	4	59	9

Para facilitar la comparación de los porcentajes en el gráfico 8.3 se representan los porcentajes medios de los alumnos de los grupos de control y experimentales sobre la existencia o persistencia de cada uno de los obstáculos para adquirir el modelo de formación de imágenes de Kepler.



La tabla y gráfica anteriores muestran claramente una disminución de los porcentajes de existencia y persistencia de los obstáculos para la comprensión de la imagen óptica que se deriva del modelo de visión de Kepler en los alumnos de los grupos experimentales. De nuevo se constata que la mejora que se produce en los alumnos de ESO que han seguido una enseñanza convencional es prácticamente nula ya que los porcentajes de alumnos que tienen obstáculos para comprender esta meta parcial son similares en ambos grupos y cerca del 100 % en muchos de los aspectos medidos. Así, por ejemplo, el 96% de alumnos de ESO antes de la enseñanza y el 95% después de la enseñanza habitual creen, por término medio, según la situación analizada, que la imagen óptica se traslada entera "ya hecha" o bien que cada rayo es portador de cada uno de sus puntos, mientras que este porcentaje se reduce hasta el 46% después de la instrucción experimental, incluso es claramente menor que el obtenido con alumnos de bachillerato (83%). Semejantes diferencias (con significación de $\alpha \ll 0,01$) encontramos entre los alumnos experimentales de ESO. inmediatamente después de la enseñanza, respecto a los alumnos de control del mismo nivel, cuando se comparan los porcentajes de alumnos que no consideran al ojo como un instrumento óptico formador de imágenes. Las diferencias en los porcentajes de ambos obstáculos cuando se comparan los grupos de control de ESO con el experimental un año después de la instrucción, aunque más pequeñas, siguen

siendo considerables (significativas para $\alpha < 0,01$). Al comparar los alumnos experimentales inmediatamente después del tratamiento y un año después, se observan diferencias menores en los porcentajes de presencia de obstáculo que las observadas en la comparación con los grupos de control. Incluso existen diferencias significativas ($\alpha < 0,05$) entre los alumnos de ESO un año después del tratamiento y los alumnos de ESO experimentales un año después del tratamiento.

Para ilustrar estos resultados, presentamos a continuación ejemplos de algunos diagramas y explicaciones de alumnos de los diferentes grupos comparados.

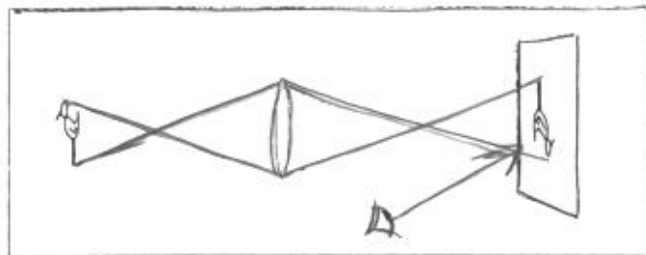
a) Ejemplo de diagrama y explicación sobre la formación de la imagen óptica de un alumno experimental inmediatamente después de la enseñanza (ESO-4) que ha adquirido el modelo de Kepler.

a) Explica com creus que es forma la imatge que veiem en la pantalla. Completa este esquema de la forma que millor represente les teues idees.

Des del punt
ix un feix que
arriba a la
lent: el conver-
geix i forma
altre punt en
la pantalla que
ix un feix cap a l'ull.

El alumno acompaña el dibujo de formación de la imagen que ve en una pantalla con la explicación: "Desde el punto (objeto) sale un haz (de luz) que llega a la lente: lo converge y forma otro punto en la pantalla, (del) que sale un haz (de luz) hacia el ojo".

b) Ejemplos típicos de los alumnos de los grupos ESO-1 y ESO-2.

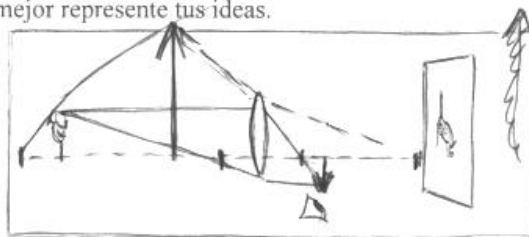


El alumno dibuja un rayo que sale del ojo y los rayos que salen de cada punto se doblan en el aire. No escribe ninguna explicación a su diagrama.

c) Ejemplo de la muestra BAC-3. El esquema y explicaciones que presentamos a continuación revela un aprendizaje memorístico típico en los alumnos de Bachillerato después de la enseñanza de la óptica geométrica.

10. Con una lente como la de una lupa, podemos ver la imagen de un objeto iluminado sobre una pantalla. (esta experiencia es similar a ver la imagen de una diapositiva en una pantalla)

a) Explica cómo crees que se forma la imagen que vemos en la pantalla. Completa este esquema de la forma que mejor represente tus ideas.



Dependerá del foco de la lupa, podrá ser una imagen invertida o derecha, aumentada o disminuida, real o virtual

b) Si alejamos la pantalla de esa posición, ¿qué cambios crees que se producen en la imagen?

El alumno acompaña la siguiente explicación al esquema de formación de la imagen: *"Dependerá del foco de la lupa, podrá ser una imagen invertida o derecha, aumentada o disminuida, real o virtual"*

Como se observa en el diagrama, el alumno, para trazar los rayos que expliquen la formación de la imagen que se ve al mirar a la pantalla, ha necesitado dibujar un eje óptico, puntos focales, incluso ha dibujado una flecha típica para representar objeto e imagen. En palabras de Viennot, esta panoplia de elementos ópticos aprendidos de forma algorítmica no permite realizar un trazado correcto.

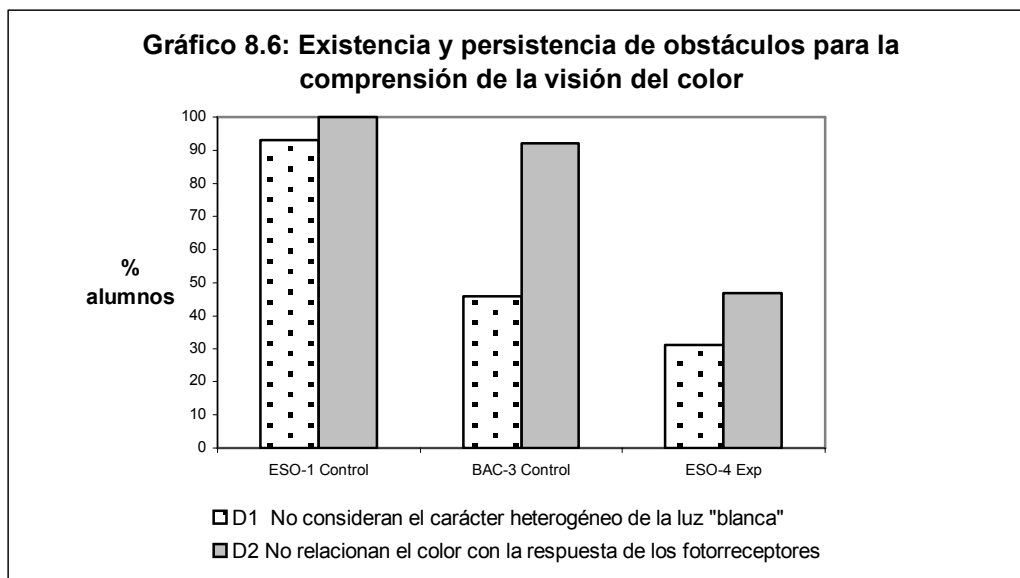
Por último presentamos los resultados obtenidos sobre la concepción del color. Recordemos que las cuestiones del anexo 1 (C-10 y C-11) sobre esta meta parcial pretenden valorar si los alumnos hacen referencia al carácter heterogéneo de la luz blanca cuando ésta atraviesa un filtro de color y si mencionan la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos según el tipo de luz incidente. Estos obstáculos sólo se han medido en los alumnos de control de ESO antes de la instrucción y en los de Bachillerato después de acabar el tema de óptica y, en los alumnos experimentales de ESO, inmediatamente después de acabar la secuencia experimental y con una muestra menor que en los apartados anteriores.

Tabla 8.4: Comparación de los obstáculos para la cuarta meta parcial: concebir el color como una sensación elaborada a partir de la respuesta de los fotorreceptores al tipo de luz incidente

<i>D. Obstáculos que evidencian que el color no se concibe como una sensación que se obtiene como una respuesta de los fotorreceptores retinianos al tipo de luz incidente:</i>	<i>Grupos de control</i>			<i>Grupos experimentales</i>		
	<i>Antes</i>		<i>Después de la enseñanza</i>		<i>Final del tratamiento</i>	<i>Al curso siguiente</i>
	ESO-1 n = 71 % Sd	ESO-2 n= 183 % Sd	BAC-3 n=59 % Sd	ESO-4 n=102 % Sd	ESO-5 n=28 % Sd	
D₁ . No considerar el carácter heterogéneo de la luz “blanca”.	93 3	---	46 6	31 5	---	
D₂ . No relacionar el color con la diferente respuesta de los fotorreceptores retinianos a la luz incidente.	100 -	---	92 4	47* 7	---	

* Este porcentaje corresponde a una muestra de 47 alumnos

Para facilitar la comparación de los porcentajes en el gráfico 8.4 se representan los porcentajes de los alumnos de los grupos de control y experimentales sobre la existencia o persistencia de obstáculos a la concepción del color.



Aunque somos conscientes de que la visión del color recibe escasa, si alguna, atención en la enseñanza secundaria, resulta llamativo que sólo la mitad de los alumnos de Bachillerato (54 %) haga mención al carácter heterogéneo de la luz blanca (sin considerar si su respuesta es correcta o no) al explicar las cuestiones

citadas anteriormente, y “doloroso” que un 92 % no se refiera ni siquiera a la existencia de fotorreceptores retinianos sensibles a tres tipos de luces diferentes. Esto es un indicador que confirma lo que hemos encontrado en los apartados anteriores: se enseña una óptica sin considerar el ojo/persona que ve. Esto hace que el aprendizaje no llegue a ser funcional: los estudiantes, después de la enseñanza habitual, son incapaces de explicar o hacer predicciones en situaciones sencillas de visión. En cambio, las dos terceras partes y más de la mitad, respectivamente, de los alumnos de 3º de ESO tratados se refieren al carácter heterogéneo de la luz blanca y a la existencia de fotorreceptores distintos en el ojo al responder a las cuestiones citadas.

8.2.2 Resultados que muestran una mejora en el nivel de comprensión global después del tratamiento

Ya hicimos referencia en el diseño experimental a la insatisfacción que causa en los investigadores el tener datos parciales sobre cuestiones, es decir, el tener porcentajes de alumnos que han respondido de una u otra forma a cada una de las numerosas cuestiones que forman parte habitualmente de un diseño experimental. Se echa en falta información global sobre lo que sabe un alumno sobre el tema.

Como hemos descrito en el apartado 7.3.2 de las páginas 298 y siguientes, por nuestra parte, hemos tratado de resolver este problema identificando cinco niveles globales de comprensión sobre el tema (“el modelo de visión de Kepler”) y asignando a cada alumno uno de dichos niveles mediante el instrumento **C7-a** El procedimiento empírico para asignar los niveles entre tres expertos ya fue descrito en la páginas 304-307.

Los resultados obtenidos al adscribir a los estudiantes a uno de estos niveles de comprensión se muestran en la tabla 8.5. Se indica también en esta tabla el nivel medio de cada muestra después de la enseñanza y el porcentaje de alumnos que adquieren un nivel funcional (nivel 3 y 4):

Tabla 8.5: Niveles de comprensión del modelo de visión de Kepler alcanzado por los alumnos de grupos experimentales y de control

	Grupos de control, después de la enseñanza habitual				Grupos experimentales, inmediata y un año después del tratamiento			
	ESO-2 n= 183		BAC-3 n=59		ESO-4 n=147		ESO-5 n=28	
	%	Sd	%	Sd	%	Sd	%	Sd
Nivel 0	58	4	20	5	12	3	0	-
Nivel 1	36	4	31	6	16	3	32	9
Nivel 2	6	2	46	6	38	4	57	9
Nivel 3	0	-	3	2	29	4	11	6
Nivel 4	0	-	0	-	5	2	0	-
Nivel medio	0,5	0,5	1,3	0,8	2,0	1,0	1,8	0,6
% con nivel funcional	0	-	3	2	34	4	11	6

Las diferencias que se observan en los porcentajes del nivel de comprensión entre los alumnos de control y los experimentales son tan evidentes (sólo el 3 % de los alumnos de 2º de Bachillerato alcanzan el nivel que consigue el 34 % de los alumnos tratados de 3º de ESO!) que el análisis estadístico con la "t de Student" no aporta información complementaria (las diferencias son claramente significativas). Sin embargo la "t de Student" se ve afectada por el tamaño de las muestras y cabe preguntarse si unas diferencias en el nivel medio de 1,5 o de 0,7 son importantes desde el punto de vista educativo. Para cuestiones de este tipo se está extendiendo el uso del parámetro estadístico "tamaño del efecto" (TE o Δ) (Casado et al., 1998; Coe, 2000). Dicho parámetro suministra una indicación de la magnitud del efecto producido por un tratamiento entre dos grupos distintos, independientemente de su tamaño. Nos indica el número de desviaciones estándar "ponderada" que se separan las medias de dos grupos. Su cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$\Delta = \frac{M_2 - M_1}{\sigma_{ponderada}}, \text{ donde } M_2 \text{ y } M_1 \text{ representan las medias de las muestras y } \sigma_{ponderada} \text{ es}$$

un valor estimado a partir de las desviaciones estándar de las muestras, según la siguiente expresión:

$$\sigma_{ponderada} = \sqrt{\frac{(N_2 - 1)\sigma_2^2 + (N_1 - 1)\sigma_1^2}{N_2 + N_1 - 2}}, \text{ donde } N_2 \text{ y } N_1 \text{ son los tamaños de las}$$

muestras y σ_2 y σ_1 sus desviaciones estándar.

La siguiente tabla resume la interpretación de los valores de Δ :

Table 8.6: Interpretations of effect sizes

(<http://www.cem.dur.ac.uk/ebeuk/research/effectsize/ESbrief.htm>)

Effect Size	Percentage of control group who would be below average person in experimental group (P_{Δ})	Rank of person in a control group of 29 who would be equivalent to the average person in experimental group
0.0	50%	15
0.1	54%	13
0.2	58%	12
0.3	62%	11
0.4	66%	10
0.5	69%	9
0.6	73%	8
0.7	76%	7
0.8	79%	6
0.9	82%	5
1.0	84%	5
1.2	88%	3
1.4	92%	2
1.6	95%	2
1.8	96%	1
2.0	98%	1 (or 1 st out of 44)
2.5	99%	1 (or 1 st out of 160)
3.0	99.9%	1 (or 1 st out of 740)

Según afirman Black y Harrison (2000, p.26): "*Los tamaños del efecto típicos en las investigaciones analizadas están entre 0,4 y 0,7: un tamaño del efecto de 0,4 significaría que el alumno medio involucrado en una innovación conseguiría el mismo logro que un alumno en el 35 % superior de aquellos no implicados en la innovación*". Para Cohen (1988), si el valor del *tamaño del efecto* de la diferencia de dos medias es de 0,2 podemos hablar de un tamaño del efecto pequeño (poco eficaz), medio si vale 0,5 (moderadamente eficaz) y grande para valores superiores a 0,8 (muy eficaz).

El tamaño del efecto producido por el tratamiento experimental, en los niveles de comprensión es el siguiente:

Tabla 8.7: Tamaño del efecto del tratamiento experimental y % de alumnos de control por debajo del alumno "medio" del grupo experimental

	Δ	P_{Δ}
Comparación de los niveles medios de los alumnos de ESO tratados con los alumnos de ESO de control (después de la enseñanza)	1,96	97 %
Comparación de los niveles medios de los alumnos de ESO tratados con los alumnos de Física de 2º de Bachillerato de control (después de la enseñanza)	0,74	77 %

En las gráficas siguientes se pueden visualizar las diferencias entre las muestras y las consecuencias de esos valores de tamaño del efecto sobre las distribuciones de los niveles de comprensión comparadas:

Gráfico 8.7: Comparación de las distribuciones de los niveles de comprensión de las muestras de ESO experimental y de control

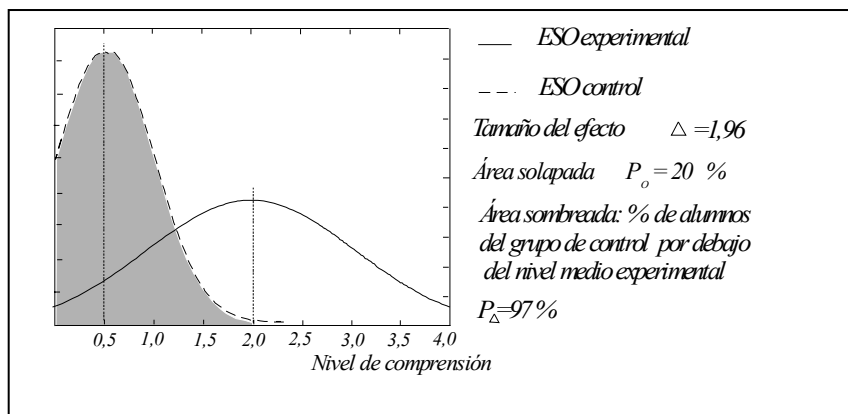
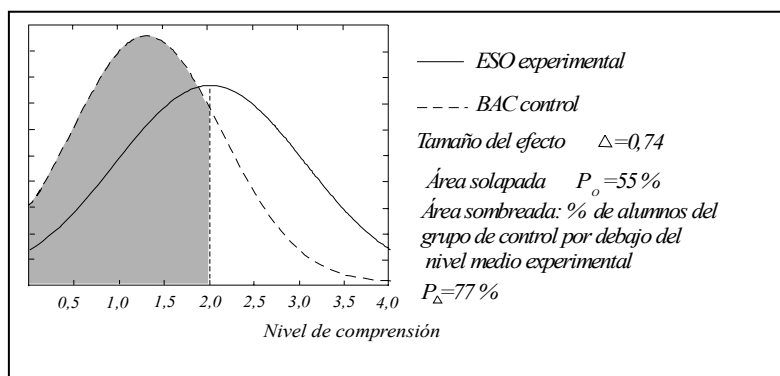


Gráfico 8.8; Comparación de las distribuciones de los niveles de comprensión de las muestras de bachillerato y experimental



De las tablas y gráficas anteriores se deduce que el efecto del tratamiento experimental es enorme respecto a los alumnos de ESO que han recibido enseñanza habitual. ¡El 97 % de los alumnos de control está por debajo del nivel del alumno medio del grupo experimental! El tamaño del efecto respecto a alumnos de 2º de

Bachillerato es muy grande: el 77 % de los alumnos que han dado el tema de óptica en 2º de Bachillerato se encuentra por debajo del nivel alcanzado por el alumno medio de ESO tratado.

Estos resultados no requieren más comentarios, excepto añadir que alcanzar los niveles funcionales (3 y 4) no es fácil, los resultados experimentales son mucho mejores que los habituales, pero sólo lo alcanza el 34 % de los alumnos y lo conservan un año después el 11 % (frente a sólo un 3 % de los de Bachillerato inmediatamente después de la enseñanza). Así pues, la eficacia del tratamiento experimental, medida por el tamaño del efecto sobre el nivel global de comprensión, es muy grande ($\Delta = 1,96$) o grande ($\Delta = 0,74$) según lo comparemos con los grupos de ESO o de Física de Bachillerato.

No obstante, podría pensarse que al tratarse de un aprendizaje exigente (sólo el 34 % alcanza un nivel funcional) puede generar actitudes negativas en los alumnos de 3º de ESO, lo que podría traducirse en un rechazo a la asignatura que, en consecuencia, no sería elegida el curso siguiente. De ser así, nuestro objetivo principal de conseguir que los alumnos se interesen y aprendan Física se vería debilitado, precisamente, por nuestra intención de que aprendieran, "de verdad", el tema experimental.

Por ello, merecen una atención especial los resultados sobre las actitudes de los alumnos que se presentan a continuación.

8.3 Resultados que muestran que los alumnos tratados obtienen mejores indicadores de apropiación y actitudes

De acuerdo con el diseño experimental realizado presentamos en primer lugar los resultados obtenidos con el cuestionario C8-a referidos a la auto-percepción de los alumnos experimentales y de control expresada mediante la valoración respecto a norma (de 0 a 10) de proposiciones relacionadas con indicadores de apropiación (Verdú, 2004). Dicha valoración se recogió de una manera anónima e individual, al finalizar la enseñanza de la óptica.

Tabla 8.8: Resultados que muestran la apropiación y actitudes de los alumnos de ESO después de la enseñanza

Valora de 0 a 10 tu grado de acuerdo con las siguientes afirmaciones (0 = nada de acuerdo; 10 = totalmente de acuerdo)	Grupo experimental n =127 M (Sd)	Grupo de control n =173 M (Sd)	t dif.	Δ
a) El índice del tema y su desarrollo me ha permitido sentirme orientado, es decir, saber lo que estaba haciendo en todo momento y para qué lo hacía	7,4 (2,1)	5,6 (2,9)	6,24	0,71
b) A lo largo del tema he tenido oportunidades de expresar lo que pensaba sobre lo que estábamos tratando y resolver mis dudas	8,5 (2,1)	6,4 (2,8)	7,42	0,85
c) Tengo la sensación de que iba haciendo actividades, una tras otra, sin saber muy bien por qué las hacía	2,4 (2,9)	4,7 (3,5)	6,21	0,72
d) La organización del tema sobre luz y visión me ha permitido aprender "de verdad" y no a repetir cosas de memoria	8,3 (1,9)	5,7 (3,0)	9,17	1,04
e) La organización del tema me ha permitido darme cuenta sobre cómo trabajan los científicos y cómo avanzar en la elaboración de teorías	7,5 (2,2)	5,8 (2,9)	5,77	0,66
f) Lo que hemos tratado es muy difícil, creo que no he entendido nada "de verdad"	1,5 (2,6)	3,9 (3,5)	6,81	0,78
g) Esta forma de organizar la enseñanza ha contribuido a que me guste menos la asignatura	1,5 (2,6)	3,5 (3,4)	5,20	0,59
h) Si el curso próximo eligiera la asignatura de FQ, me gustaría que los temas se organizaran como éste"	8,0 (2,6)	5,3 (3,4)	7,79	0,89
i) Lo que hemos tratado no es fácil, pero la forma de trabajar y evaluar me ha ayudado a comprender mejor los conceptos (sobre la luz y la visión)	8,4 (2,1)	6,0 (2,9)	8,31	0,95
j) Creo que lo aprendido en este tema ha hecho que cambie algunas de las ideas que tenía (sobre la luz y la visión)	8,7 (2,1)	6,8 (2,8)	6,72	0,77

(*) Las diferencias son significativas a favor del grupo experimental con $\alpha < 0'001$, en todos los casos

Los valores de la "t de Student" para la diferencia de las medias en grupos independientes y los tamaños del efecto (Δ) son enormemente favorables para el grupo experimental, por lo que podemos afirmar que las actitudes en los alumnos experimentales son más positivas que las de los grupos de control. Las diferencias deben valorarse, además, teniendo en cuenta que los profesores de los grupos de control no generaban, ni mucho menos, rechazo, como se ve en el ítem **b)**. Así, se encuentran más orientados [ítems **a)** y **c)**] y tienen mayor sensación de aprendizaje [ítems **d)**, **f)** y **j)**] que los de control. En concreto, según Δ , el alumno medio del grupo

que ha sido instruido con una enseñanza problematizada se muestra tan poco de acuerdo con "haber estado haciendo actividades una tras otra sin saber muy bien por qué las hacía" como el 33 % mejor del grupo de control [ítem **c**] y tiene una sensación de "haber aprendido de verdad" [ítem **d**] como la que tiene el 14 % superior del grupo de control.

Respecto a la percepción de dificultad, algo muy importante en 3º de ESO, el alumno experimental medio se encuentra tan poco de acuerdo con el ítem **f** ("lo que hemos tratado es muy difícil, creo que no he entendido nada de verdad") como lo está el 24 % mejor del grupo de control; y tan de acuerdo con "lo que hemos tratado no es fácil, pero la forma de trabajar y evaluar me ha ayudado a comprender mejor los conceptos", como el 16 % superior del grupo de control.

Hemos dicho que, felizmente, ninguna de las formas de enseñar de los profesores genera rechazo hacia la asignatura, pero no ocurre lo mismo con el entusiasmo. Así, las diferencias son significativas en el ítem **h** ($\alpha < 0,001$): al alumno medio del grupo experimental le gustaría que, en el curso siguiente, la enseñanza de los temas fuera igual que la que ha recibido, en la misma medida que al 17 % superior del grupo de control ($\Delta = 0,89$, véase tabla 8.8).

Estas conclusiones se ven reforzadas con los resultados obtenidos en las preguntas abiertas del cuestionario **Ca-9**.

Tabla 8.9: Resultados sobre la presencia de indicadores de apropiación en las respuestas de los estudiantes a preguntas abiertas sobre el tema tratado (C9-a)

<i>Al responder abiertamente sobre ...</i>	<i>Grupo experimental n = 127 % Sd</i>	<i>Grupo de control n = 137 % Sd</i>
A) Qué aspecto o aspectos fundamentales tratábamos de comprender en el tema de óptica (luz y visión), los alumnos:		
<ul style="list-style-type: none"> Señalan el problema ¿cómo vemos? como el aspecto fundamental que tratamos de comprender en este tema. 	76 4	31 4
<ul style="list-style-type: none"> Señalan otros aspectos del tema: fisiología del ojo, comportamiento de la luz, anomalías visuales, color, formación de imágenes,... 	20 3	18 3
<ul style="list-style-type: none"> No contesta o da una respuesta sin significado. 	4 1	51 4
B) Qué interés puede tener el estudio realizado en el tema de óptica (luz y visión), los alumnos:		
<ul style="list-style-type: none"> Señalan alguno o varios de los siguientes aspectos: la comprensión de las anomalías visuales, la corrección de las anomalías visuales, la construcción de aparatos ópticos, ... 	26 4	2 1
<ul style="list-style-type: none"> No contestan o dan una respuesta sin relación con el interés del tema. 	74 4	98 1
C) Las características de la forma de organizar la enseñanza que creen que han contribuido a favorecer el aprendizaje, los alumnos:		
<ul style="list-style-type: none"> Señalan alguna o varias de las características genuinas de la enseñanza problematizada: el planteamiento de un problema estructurante, el índice como estrategia, el interés del mismo, el trabajo en grupos, la realización de recapitulaciones, las discusiones de clase, las experiencias de clase, la conexión con la vida real,... 	42 4	2 1
<ul style="list-style-type: none"> No contestan o no señalan ninguna característica de la enseñanza problematizada. 	58 4	98 1

Las actitudes muy positivas mostradas en la tabla 8.8 se ven reflejadas también en las respuestas espontáneas de los estudiantes. Así, los alumnos de los grupos experimentales se sienten más orientados e implicados que los de los grupos de control (saben qué se está tratando, por qué y para qué): un 76 % de los primeros expresa que con el estudio de este tema se trataba de comprender “cómo vemos”, frente a un 31 % de los segundos y, sólo un 4 % no acierta a expresar aspectos fundamentales estudiados en el tema frente a la mitad, 51 %, del grupo de control.

Al ser preguntados sobre qué interés puede tener el estudio del tema, el 26 % del grupo experimental se refiere a aspectos propios del tema, mientras que sólo lo hace un 2 % del grupo de control.

Por último, cabe resaltar que un 42 % de los alumnos del grupo experimental se refiere a alguna o a varias características de la estructura problematizada como facilitadoras de su aprendizaje, es decir, sienten que dicha forma de organizar la instrucción les ayuda a aprender. En cambio, sólo el 2 % de los alumnos del grupo de control cita alguna de estas características.

Los grandes porcentajes de respuestas en blanco o sin referencia clara a lo que se les solicitaba hay que achacarlo, como ya comentamos en el diseño experimental, a las limitaciones de los estudiantes de estas edades para expresarse en cuestiones abiertas abstractas como estas. Cabe comentar que los estudiantes del grupo experimental, más que los de control, ante la cuestión del interés del tema suelen responder con referencias a aspectos personales o de sus estudios en general, que no hemos considerado a favor de nuestra hipótesis. Así, hemos encontrado algunas frases como: *"el estudio del tema me ha resultado interesante"*, *"el estudiar este tema me permitirá tener mejores notas"*, etc. Cuando se les pide que citen características de la forma de organizar la enseñanza que más han contribuido en el aprendizaje del tema, con alguna frecuencia los estudiantes se refieren a aspectos del profesor o de sus relaciones con los compañeros que tampoco hemos a favor de la hipótesis. Algunos ejemplos de este tipo de respuestas son: *"el profesor explicaba bien"*, *"estudio con una compañera que me ayuda"*, etc.

En definitiva, podemos afirmar que la autopercepción de apropiación y las actitudes hacia la enseñanza de la óptica, medida tanto mediante valoración respecto a norma como mediante cuestiones abiertas directas, sin comparar con experiencias pasadas, es mucho mejor en los alumnos que han recibido instrucción problematizada. En particular, los alumnos de 2º y 3º de ESO tratados tienen una mayor sensación de orientación y aprendizaje, y actitudes más positivas hacia la asignatura que los no tratados.

8.4 Resultados que muestran que los profesores formados adquieren expectativas muy positivas sobre su potencialidad para mejorar la enseñanza y el aprendizaje

Presentamos en primer lugar los resultados obtenidos con una muestra de 31 profesores en activo que asistieron a sendos cursos de 30 horas de duración, realizados en el CEFIRE de Benidorm y en el ICE de la Universidad de Alicante durante el curso 20001-02 relativos a los cuestionarios **C6-p** y **C7-2**. Recordemos que estos cuestionarios solicitaban de los profesores una valoración abierta sobre la estructura problematizada experimental y una valoración respecto a norma de la influencia de diferentes aspectos de dicha estructura.

Tabla 8.10: Resultados de la valoración abierta sobre la estructura problematizada del tema experimental (instrumento C6-p)

Al “valorar abiertamente la estructura problematizada” y al expresar “aspectos concretos de la forma de estructurar (o directamente fomentados por ella) que puedan incidir positiva/negativamente en la enseñanza/aprendizaje”, los profesores:	n = 31	
	%	Sd
1. Manifiestan expectativas positivas sobre las potencialidades de esta forma de enseñanza por:	100	-
▪ Su influencia para favorecer la apropiación por parte de los estudiantes: aluden a las mejoras en la implicación, en la orientación y en las actitudes de los alumnos y profesores.	84	7
▪ Su influencia para favorecer aprendizajes de alto nivel, de conocimientos ricos y estructurados.	39	9
▪ Su influencia para favorecer la aproximación a las características de la producción de conocimientos científicos.	26	8
2. Expresan características de la forma de desarrollar y estructurar los contenidos genuinas de nuestra propuesta, que inciden positivamente en la enseñanza/aprendizaje o les resultan de interés/utilidad:	77	8
▪ Se refieren a la forma de iniciar el tema (plantear el problema, tratar su interés,...).	58	9
▪ Ídem a otros aspectos relacionados con la estructura problematizada del tema de forma positiva: estrategia seguida, las recapitulaciones, las actividades prácticas como pequeñas investigaciones,...	65	9
3. Expresan 1 y/o 2	100	-
4. Manifiestan expectativas neutras o negativas	0	-
▪ Únicamente hacen referencias a aspectos que no están relacionados exclusivamente con la estructura problematizada.	0	-
▪ Hacen referencias negativas a la estructura problematizada.	0	-

Aunque los datos de la tabla anterior hablan por sí solos de la valoración positiva de los profesores que asistieron a cursos de formación en óptica, donde tuvieron ocasión de conocer la estructura problematizada de la unidad didáctica elaborada, los siguientes comentarios extraídos de algunos cuestionarios revelan con más claridad sus expectativas positivas y algunas de las dificultades que encuentran en su puesta en práctica.

Cuestionario 4: *"Considero positivo plantear el tema como un problema y desarrollarlo siguiendo un índice que refleja las etapas, necesarias, que se tienen que tratar para llegar a la solución" ... "Así, se favorece la participación del alumno y que expresen las ideas que tienen. Quizás una parte de ellos se puedan interesar por su estudio si ven la finalidad del mismo y su utilidad"*

Cuestionario 6: *"Me gusta mucho estructurar de este modo los temas porque pienso que el alumno aprende de forma más significativa"... "Pero, en el aspecto negativo, creo que se necesita demasiado tiempo para impartir el tema y no sé si sería posible impartir todos los temas."*

Cuestionario 9: *"Valoro positivamente la forma de introducir el tema, aunque a la hora de su puesta en práctica el profesor debe dominar muy bien el tema y tener algunos años de rodaje..."*

En estos extractos se puede comprobar que, como norma general, los profesores suelen incluir como aspectos negativos la necesidad de emplear más tiempo para comprender el tema en profundidad y la de una adecuada formación del profesorado. Así pues, desde nuestra perspectiva, más que ser considerados inconvenientes para aprender "de verdad", son una simple constatación de las condiciones que deben darse en el proceso de enseñanza-aprendizaje alejado de la visión enciclopédica y, por ende superficial, de los programas educativos.

Tabla 8.11: Resultados de la valoración respecto a norma de profesores en activo sobre la influencia de la estructura problematizada del tema experimental en el aprendizaje (instrumento C7-p)

(Enunciado) Los psicólogos dicen que después de haber estado 20 horas en un curso, los asistentes casi siempre valoran bien el mismo, ya que han empleado su tiempo en él o han simpatizado con el profesor. Te pedimos que no dejes llevar por estos “efectos”, si existen, y que pienses las respuestas antes de darlas.		
Gracias por tu colaboración		
Valora de 0 a 10 (0 nada de acuerdo, 10 totalmente de acuerdo) en qué medida crees que	n = 31	
	M	Sd
a) Esta forma de estructurar los temas mejoraría la enseñanza y el aprendizaje de la Física.	7,9	0,7
La forma en que se ha estructurado el tema, “estructura problematizada”, puede favorecer los siguientes aspectos:		
b) El interés de los alumnos sobre lo que se va a tratar en el tema	7,7	1,3
c) La orientación de los alumnos (saber “dónde” están, qué y para qué están haciendo lo que hacen,...)	7,9	1,3
d) La orientación del profesor (tener la estructura en “mente”, evitar hacer “cosas sueltas”,...)	8,3	1,2
e) La evaluación con sentido, como recapitulación y reflexión sobre lo avanzado y la firmeza de dicho avance	7,7	1,2
f) Oportunidades para que se puedan expresar las ideas (de alumnos y profesor) y someterlas a prueba	8,3	1,0
g) Orientar y justificar la enseñanza y el aprendizaje por la comprensión y no por el examen	8,0	1,3
h) Apropiación por los alumnos de formas de pensar próximas al trabajo científico	7,9	1,3
i) El aprendizaje sólido, justificado, de los conocimientos	7,8	1,0
j) Hacer que el profesor vea más atractiva la enseñanza	8,1	1,2
k) La clarificación de objetivos del tema	8,1	0,8

Tanto los resultados de la cuestión abierta **C6-p**, como las valoraciones de la cerrada **C7-p** son favorables a nuestra hipótesis y son coherentes con los resultados obtenidos por profesores que han seguido cursos de formación en otros temas con estructura problematizada (Verdú, 2005; Martínez Sebastián, 2003). Es de destacar que el 100% de los profesores expresa expectativas positivas hacia las potencialidades de esta forma de enseñanza y el 84 % hace referencia a su influencia en la mejora de los indicadores de apropiación (orientación, implicación/motivación y actitudes). Un 77% reconocen interesantes algunas características genuinas de la estructura

problematizada y ningún profesor manifiesta expresamente expectativas neutras o negativas.

Por lo que respecta a la valoración respecto a norma realizada por los mismos grupos de profesores, en la tabla anterior, se observa que ninguna afirmación es valorada con una puntuación menor que 7, siendo de más de 8 puntos algunas afirmaciones importantes que hacen referencia a la percepción que tienen sobre la capacidad de la estructura problematizada para mejorar, especialmente, la orientación y sus actitudes. Debemos resaltar que los profesores valoran muy positivamente el efecto de la estructura problematizada del tema sobre ellos mismos (aspecto d, f y j), incluso considerando que haría más atractiva la enseñanza (aspecto j) y que les clarifica los objetivos del tema (aspecto k).

Estos primeros resultados obtenidos con los profesores asistentes a sendos cursos de formación sobre óptica geométrica en el curso 2001-02, han sido confirmados en otro curso de 30 horas, realizado en 2004, utilizando otros cuestionarios ya comentados **C8-p** y **C9-p**, cuyos resultados presentamos a continuación. Recordemos que estos dos nuevos cuestionarios son una variación de los anteriores y solicitan de los profesores una valoración abierta sobre en qué medida la enseñanza habitual favorece un aprendizaje "de verdad" y una triple valoración comparativa, respecto a norma, de la importancia de diferentes aspectos para comprender el tema y el grado como son tratados por la enseñanza habitual y por nuestra propuesta experimental.

Tabla 8.12: Resultados de la valoración abierta de profesores en activo sobre la medida en que la enseñanza habitual favorece el aprendizaje “de verdad” de la óptica (al final de un curso sobre el tema experimental)

Al valorar en qué medida la enseñanza habitual favorece un aprendizaje “de verdad” en óptica geométrica, los profesores:	Óptica n = 25	
	%	Sd
1. Manifiestan deficiencias en la enseñanza habitual.	100	-
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se refieren a que no favorece los indicadores de apropiación de lo tratado por los alumnos (orientación, implicación/motivación y actitudes de los alumnos y profesores). 	28	9
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consideran que no favorece aprendizajes de alto nivel, de conocimientos ricos y estructurados. 	100	-
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consideran que no favorece la aproximación al trabajo científico. 	12	6
2. Manifiestan aspectos imprescindibles para un aprendizaje “de verdad” que son genuinos de nuestra propuesta de estructura problematizada.	92	5
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se refieren a aspectos exclusivos de la estructura problematizada (plantear problemas, elaborar modelos,...). 	64	10
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se refieren a la generación de expectativas positivas en los profesores y en los alumnos (orientación, implicación, actitudes positivas,...). 	40	10
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aluden a otros aspectos de la estructura problematizada (estrategia seguida, las recapitulaciones, las actividades prácticas como pequeñas investigaciones,...). 	20	8
3. Manifiestan 1 y/o 2.	100	-
4. Manifiestan expresamente la importancia que tiene la forma en como han sido introducidos y tratados los conceptos fundamentales implicados en nuestra propuesta educativa (modelo de visión, representación idealizada de la luz, imagen óptica,...).	52	10
5. Manifiestan expresamente que la enseñanza habitual favorece el aprendizaje “de verdad”.	0	-
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se refieren a que la enseñanza habitual favorece los indicadores de apropiación (orientación, implicación, actitudes). 	0	-
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consideran que favorece aprendizajes de alto nivel, de conocimientos ricos y estructurados. 	0	-
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consideran que favorece la aproximación al trabajo científico. 	0	-
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Señalan ventajas como emplear menos tiempo, ser más cómoda y menos compleja para el profesor,... 	0	-

Recogemos a continuación algunos de los comentarios registrados en algunas respuestas de los profesores cuyas críticas a la enseñanza habitual de la óptica geométrica no dejan lugar a dudas:

Extracto profesor 1: "En la enseñanza habitual se presenta el tema a los alumnos sin plantearse para qué se va a estudiar ni para qué va a servir"... "Se suelen presentar conclusiones y exponerlas en lugar de plantear problemas y resolverlos",... "No se

presenta un modelo de visión, no se sabe cómo vemos pero, sin embargo, se explica que vemos imágenes de una u otra manera”...

Extracto profesor 2: *“...No creo que la enseñanza habitual favorezca el aprendizaje de verdad, más bien parecen actos de fe” ... “En los libros de texto se suelen presentar las leyes de la reflexión y de la refracción sin más” ... “Se habla de lentes que convergen o divergen la luz, se nombran las anomalías visuales y su corrección pero sin analizar previamente el funcionamiento del ojo y se trazan rayos que constantemente invitan a pensar que la luz es esos rayos que dibujamos”...*

Extracto profesor 16: *“Me he dado cuenta del lío mental que tenía en la cabeza, lo que quiere decir que aprendí las cosas sin entender la causa principal, de donde surgen, ...”... “Incluso cuando preparé las oposiciones me dejé estos temas porque no entendía los principios de la óptica”...*

En tres cuestionarios aparecen, también, referencias a la necesidad de emplear más tiempo para impartir los temas con esta estructura problematizada, pero estas referencias son más bien una queja al sistema educativo que una crítica al tipo de enseñanza propugnado. Como ejemplo:

Extracto profesor 24: *“Si tenemos en cuenta que empiezan a ver algo de óptica en 4º de ESO y que el tiempo es escaso y los conocimientos justos, es evidente que el aprendizaje no es de verdad” ... “La metodología propugnada en este curso es adecuada, pero supone dedicarle horas que no siempre sobran....”*

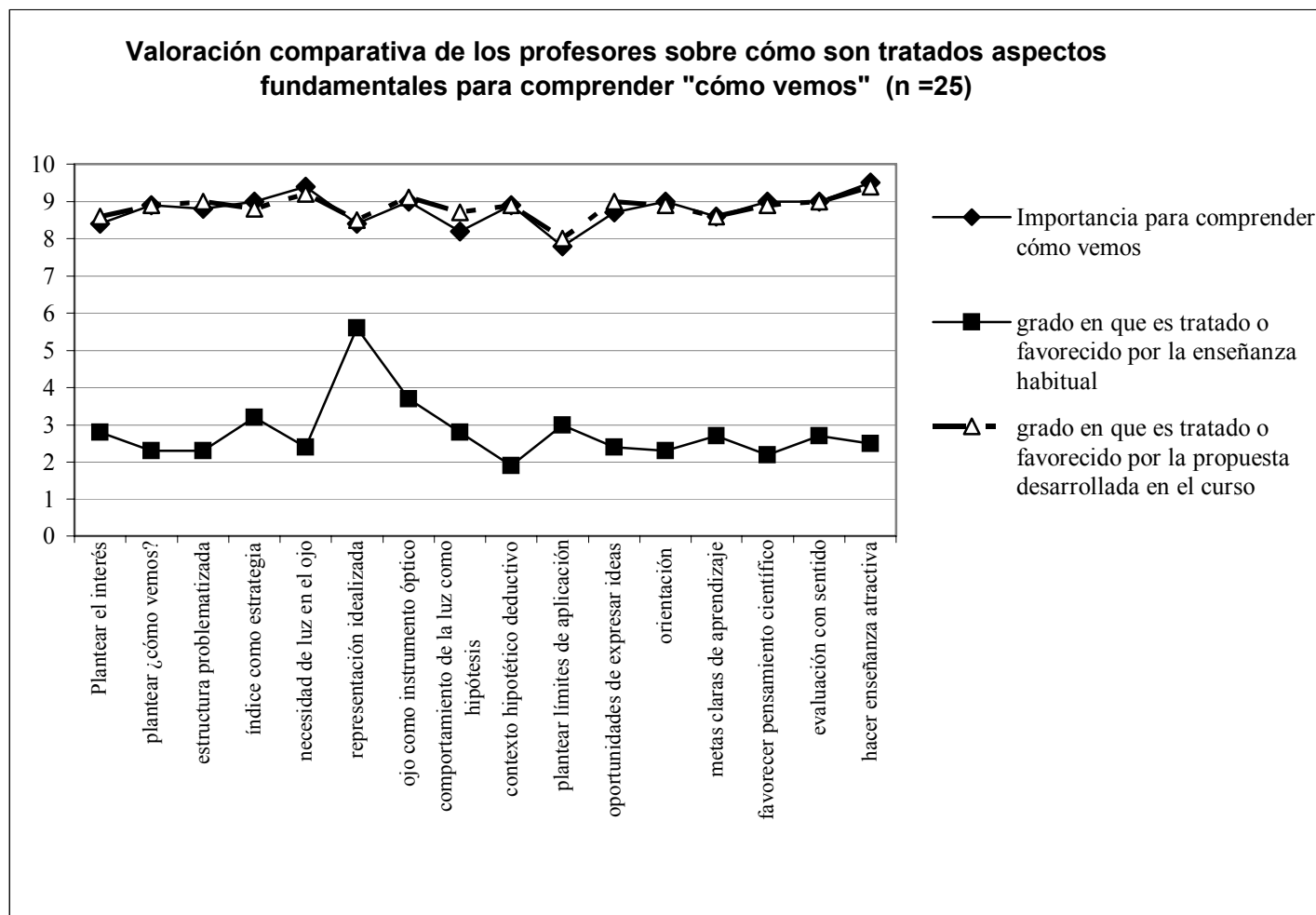
Extracto profesor 21: *... “Por falta de tiempo, exceso de materia en la programación,... no se permite un estudio cualitativo de la óptica, paso a paso, siguiendo una estructura problematizada como la vista en este curso” ...*

En la tabla siguiente mostramos los resultados de la valoración comparativa, respecto a norma, de la enseñanza habitual y la enseñanza problematizada, del cuestionario **C9-p**.

Tabla 8.13: Resultados de la valoración comparativa de profesores en activo sobre la enseñanza habitual y la propuesta experimental (n = 25, año 2004).

	<i>Valora de 0 a 10 los siguientes aspectos según el criterio indicado en las columnas.</i>	Importancia para comprender cómo vemos		Grado en que es adecuadamente tratado o favorecido en			
		M	Sd	la enseñanza habitual		los materiales del curso	
				M	Sd	M	Sd
De la estructura problematizada	Dedicar tiempo a plantear el interés que tiene tratar este tema, al principio.	8,4	1,4	2,8	1,7	8,6	1,1
	Plantear la cuestión ¿cómo vemos? como problema estructurante, cuya solución supone la construcción de una teoría geométrica de la luz y la visión.	8,9	1,2	2,3	1,9	8,9	0,9
	Organizar la enseñanza de este tema con una estructura problematizada.	8,8	1,0	2,3	1,4	9,0	0,8
	Hacer que el índice o secuencia de apartados sea una estrategia posible para avanzar en el problema planteado.	9,0	1,2	3,2	2,0	8,8	1,1
Del tratamiento conceptual de la óptica geométrica	Establecer la necesidad de que llegue luz al ojo para que se produzca la visión, antes de abordar el estudio de los fenómenos ópticos.	9,4	0,8	2,4	2,1	9,2	1,0
	Elaborar un sistema de representación geométrico idealizado de la luz.	8,4	1,4	5,6	2,7	8,5	1,0
	Modelizar el ojo como un instrumento óptico formado por una lente y una pantalla con el que conceptualizar la imagen óptica.	9,0	1,1	3,7	2,6	9,1	0,8
	Considerar la propagación rectilínea, la reflexión y la refracción como hipótesis formuladas para explicar la visión y no como consecuencias de una determinada concepción de la naturaleza de la luz.	8,2	1,6	2,8	2,1	8,7	1,3
	Desarrollar el tema en un contexto hipotético-deductivo, inventando un primer modelo de visión que debe ser puesto a prueba mediante su capacidad para explicar la visión indirecta, las anomalías visuales, el diseño de los instrumentos ópticos, ...	8,9	1,0	1,9	1,7	8,9	0,9
	Plantear explícitamente algunos límites de aplicación de la teoría geométrica de la visión.	7,8	1,5	3,0	2,4	8,0	1,7
De la apropiación	Existencia de oportunidades para expresar las ideas y someterlas a prueba.	8,7	1,2	2,4	1,9	9,0	1,0
	Orientación de alumnos y profesores: saber qué se busca y para qué, dónde se está, qué queda por hacer,...	9,0	1,0	2,3	2,0	8,9	0,9
	Plantear metas claras de aprendizaje y prever posibles obstáculos para alcanzarlas.	8,6	1,1	2,7	2,1	8,6	1,3
	Favorecer formas de pensar cercanas al trabajo científico.	9,0	1,0	2,2	1,9	8,9	1,1
	Evaluación con sentido, como recapitulación y reflexión sobre lo avanzado y su firmeza.	9,0	1,0	2,7	2,4	9,0	1,0
	Hacer que alumnos y profesores vean más atractiva la enseñanza.	9,5	0,8	2,5	2,0	9,4	0,8

Gráfico 8.7: Valoración comparativa de los profesores activo sobre la enseñanza habitual y propuesta experimental (al final de un curso de 30 horas)

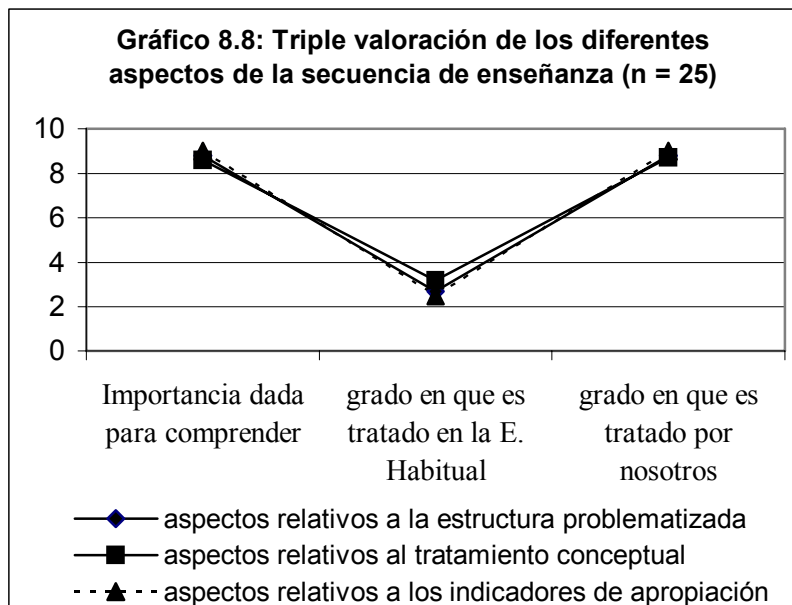


Un análisis menos pormenorizado, pero clarificador, de estos datos se ofrece en la siguiente tabla, en donde reflejamos la media aritmética de las valoraciones de cada grupo de afirmaciones.

Tabla 8.14: Valoración media comparativa sobre la enseñanza habitual y la presentada en el curso.

Aspecto a valorar	Importancia para comprender cómo vemos		Grado en que es adecuadamente tratado o favorecido en			
	M	Sd	la enseñanza habitual		los materiales del curso	
			M	Sd	M	Sd
Aspectos referidos a la estructura problematizada	8,8	1,2	2,7	1,7	8,8	1,0
Aspectos referidos al tratamiento conceptual de la óptica geométrica	8,6	1,2	3,2	2,3	8,7	1,1
Aspectos referidos a la apropiación (orientación, implicación, actitudes)	9,0	1,0	2,5	2,0	9,0	1,0

Otra forma de visualizar esta valoración comparativa de los valores medios de los diferentes aspectos se muestra en la gráfica siguiente.



Las tablas de datos y las gráficas anteriores reflejan claramente que la valoración que los profesores dan a la importancia que tienen distintos aspectos para la comprensión del modelo de visión de Kepler coincide, prácticamente, con la valoración que dan al tratamiento recibido en nuestra propuesta y alcanza valores próximos a 9 puntos.

Dicho de otro modo, aquello que los profesores consideran altamente importante para aprender es tratado en nuestra propuesta de enseñanza de manera muy adecuada según su propia valoración. En cambio, las valoraciones que asignan a la enseñanza habitual suelen ser menores de 3 puntos, expresando claramente la enorme separación entre lo que sería deseable y lo que se suele hacer.

Estos resultados son coincidentes con los obtenidos anteriormente con otros instrumentos y reflejan, fuera de toda duda, que los profesores valoran positivamente los aspectos genuinos de la estructura problematizada del tema, perciben que dicha forma de planificar la enseñanza de la óptica geométrica en la ESO produciría mejoras en los aspectos relacionados con la apropiación (orientación, implicación/motivación y actitudes de alumnos y profesor), aún si cabe, mejor que otros aspectos, y reconocen adecuados la estrategia y el tratamiento de los conceptos ópticos implicados en la enseñanza del modelo de visión de Kepler que hemos elaborado en este trabajo de investigación.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los resultados obtenidos durante los seis años que ha durado este proyecto de investigación nos permiten afirmar las siguientes conclusiones:

1. Es posible planificar la enseñanza sobre la luz y la visión en la ESO con una estructura problematizada. El protocolo seguido se ha mostrado, una vez más, eficaz para elaborar secuencias problematizadas de enseñanza/aprendizaje. En nuestro caso, nos ha permitido:
 - a) Plantear las cuestiones “¿cómo vemos?, ¿cómo podemos ver mejor?” como problema estructurante en torno al cual organizar la enseñanza de la óptica geométrica para los niveles de la Educación Secundaria Obligatoria.
 - b) Unido a lo anterior, identificar como objetivo clave el que los alumnos se apropien de un modo funcional del modelo de visión de Kepler, un modelo que se ha mostrado con suficiente poder explicativo y predictivo para ser adecuado en la enseñanza secundaria, tanto en la E.S.O. como en el Bachillerato.
 - c) Identificar las metas parciales que es necesario alcanzar para apropiarse del modelo de visión de Kepler y los obstáculos previsibles que hay que superar (cuadro 3.4, página 83).
 - d) Diseñar una estrategia para avanzar en el problema planteado, de forma que la secuencia de enseñanza se desarrolle con la lógica de un plan de investigación (cuadro 3.5, página 87).
2. Hemos mostrado la relevancia didáctica de las metas parciales y los obstáculos asociados para la mejora de la enseñanza, ya que hemos probado que:
 - a) Los alumnos tienen ideas y razonamientos erróneos sobre las metas parciales para comprender cómo vemos similares a las encontradas en nuestro estudio de planificación (cuadro 3.4, página 83), que deben contemplarse si deseamos que se

apropien del modelo de visión de Kepler. De forma breve, el pensamiento de los estudiantes antes de la instrucción, que se deriva de nuestro estudio es: creen que la visión es un proceso activo del ojo en el que no es necesario que llegue luz al ojo procedente del objeto que es visto, tanto en situaciones de visión directa como indirecta. Como consecuencia, admiten que se puede ver en oscuridad total y que sólo existe luz en las fuentes primarias o en sus alrededores. No disponen de una concepción geométrica e idealizada de la luz, por lo que opinan que la propia luz es visible, no consideran a las fuentes extensas como conjuntos de fuentes puntuales, ni utilizan las consecuencias geométricas de la propagación rectilínea de la luz al predecir fenómenos ópticos. Cuando explican fenómenos de visión indirecta o la formación de imágenes creen que la imagen emana "ya hecha" y/o es portada por los rayos de luz. Por último, el color tiende a ser interpretado como una propiedad del cuerpo o de la propia luz. Muchas ideas y razonamientos son persistentes a la enseñanza habitual ya que, aunque con leves mejoras, forman parte del pensamiento de los estudiantes de ESO después de la enseñanza de la óptica geométrica e incluso en los alumnos de 2º curso de bachillerato con tres años más de instrucción en Física y Química.

- b) La enseñanza habitual no contempla los obstáculos que hemos identificado para comprender cómo vemos y tiene un marcado carácter aproblemático. El análisis de nuestros resultados con profesores, libros de texto habituales y exámenes de selectividad muestra un alto grado de coherencia, que explicaría la persistencia de los mismos. Tanto los profesores como los libros de texto habituales presentan carencias para la comprensión de los conceptos fundamentales del modelo de visión de Kepler. Por ejemplo, es revelador que en la totalidad de las muestras de profesores, el uso de haces de luz en los trazados gráficos y el concepto de imagen óptica, que ya constatamos que son obstáculos para los alumnos de ESO y Bachillerato después de la enseñanza, sean incompatibles con el citado modelo.
- c) Por otro lado, tanto profesores como los libros de texto, presentan la enseñanza de forma aproblemática y empirista con ausencia de problema estructurante y de secuencia de apartados que responda a una lógica problematizada. Por el contrario, predomina el orden jerárquico de los conceptos en el que el comportamiento de la luz (propagación rectilínea, reflexión, refracción, etc.) se presenta como aplicación de leyes empíricas y no como hipótesis formuladas para explicar los fenómenos ópticos y la visión. En consonancia con estas conclusiones, el análisis de los exámenes de selectividad ha revelado que rara vez se demandan explicaciones relacionadas con la visión sino, más bien al contrario, que la mayoría de las

cuestiones son de repetición de algoritmos, numéricas o simplemente memorísticas. Los exámenes de selectividad son, así pues, un reflejo de la enseñanza a la que van dirigidos. Esta coherencia es lo que nos hace pensar que las modificaciones en la enseñanza de la óptica son difíciles y precisan de medidas de formación del profesorado y cambios en los currículos oficiales que se orienten hacia la comprensión de los conceptos claves de modelo de visión de Kepler.

3. La puesta en práctica en el aula con alumnos de segundo y tercer curso de ESO de una secuencia de enseñanza con estructura problematizada (véase capítulo 6, página 205), basada en las conclusiones del estudio realizado en la primera parte de esta investigación, produce mejoras sustanciales respecto a la enseñanza habitual. En concreto, la aplicación de esta secuencia de enseñanza ha mostrado que:

a) En el desarrollo de la secuencia de enseñanza se generan oportunidades para aprender con comprensión ya que, tanto la observación de los trabajos de clase como las actividades de recapitulación intermedias, ponen de manifiesto que los alumnos, a lo largo de la secuencia, se alejan de los esquemas alternativos encontrados en los estudiantes de los grupos de control, muestran síntomas de sentirse cada vez más orientados expresando el problema al que se enfrentan y la estrategia seguida o los problemas abiertos que quedan por resolver, y sus trabajos reflejan un aumento de la capacidad de realizar argumentaciones sólidamente fundamentadas.

b) Produce una mejora sustancial en la comprensión conceptual, lo que se manifiesta por una drástica reducción de los porcentajes de los alumnos que presentan obstáculos en cada uno de los indicadores de comprensión. Si tomamos como referencia lo que piensan los alumnos de ESO antes de la enseñanza de la óptica, vemos que la enseñanza habitual deja los obstáculos prácticamente inalterados. Podemos afirmar que la enseñanza habitual del tema analizado sirve de muy poco. Es verdad que en los grupos de ESO de control se ha dedicado menos tiempo a la enseñanza de la óptica (12 horas frente a 22 horas en los grupos experimentales), pero las mejoras obtenidas en esos alumnos son prácticamente nulas. La situación mejora algo en los alumnos de 2º curso de Bachillerato, inmediatamente después de tratar el tema de óptica, pero en algunos indicadores de comprensión los porcentajes de alumnos que presentan alguno de los obstáculos son del mismo orden que en las muestras, por ejemplo, más del 90 % no representa haces divergentes de luz desde cada punto del objeto, un aspecto crucial para que el modelo de visión pueda tener

carácter predictivo. En los aspectos más básicos también se obtienen grandes diferencias sobre los alumnos del mismo nivel, así, el 90 % de los alumnos de ESO antes de la instrucción y el 72 % después de la enseñanza habitual piensan que es posible la visión sin que llegue luz al ojo del observador, mientras que este porcentaje decrece hasta el 27 % en los alumnos de los grupos experimentales, incluso un año después del tratamiento. Disminuciones similares se producen en los porcentajes de alumnos que presentan obstáculos para la comprensión de un esquema de representación geométrico e idealizado de la propagación de la luz acorde con el modelo de Kepler, para la comprensión de la imagen óptica y para la visión del color. Pero esta mejora en la comprensión conceptual se revela más trascendente porque el porcentaje de alumnos que alcanza, globalmente, un nivel de comprensión funcional del modelo de visión de Kepler es muy superior a los que lo alcanzan en la enseñanza habitual, incluso cuando se compara con los alumnos de 2º curso de bachillerato. La eficacia del tratamiento experimental medida por el tamaño del efecto sobre el nivel global de comprensión es enorme ($\Delta = 1,96$) o muy grande ($\Delta = 0,74$) según lo comparemos con los alumnos de ESO o con los de Bachillerato después de la enseñanza habitual. No obstante, destacamos que sólo la tercera parte de los alumnos de ESO tratados alcanzan un nivel de comprensión funcional y, de ellos, sólo la tercera parte lo conserva al año siguiente (frente a un escaso 3 % de los alumnos de bachillerato). Estos datos son una muestra de que los obstáculos para la comprensión del modelo de Kepler están fuertemente arraigados en el pensamiento de los estudiantes y la óptica geométrica se revela como una rama de la Física difícil de comprender en la enseñanza secundaria obligatoria y donde la investigación didáctica deberá profundizar en las causas de estas dificultades para mejorar estos resultados.

- c) Genera expectativas más positivas en los alumnos que han sido instruidos en dicha secuencia, un aspecto crucial en estos niveles básicos de la enseñanza secundaria. Podemos afirmar que la auto-percepción de la apropiación y las actitudes hacia la asignatura, medida mediante valoración respecto a norma, sin comparar con experiencias pasadas, es mucho mejor en los alumnos que han recibido instrucción problematizada que en los grupos de control. En general, los alumnos tratados tienen se sienten más orientados, tienen sensación de avance, de haber aprendido "de verdad", expresan que les gustaría que se enseñara así el curso próximo, etc.

- d) Genera expectativas muy positivas sobre su potencialidad para mejorar la enseñanza y el aprendizaje en aquellos profesores que participan con nosotros en cursos donde pueden desarrollar, (re)elaborar y reflexionar sobre dicha secuencia de enseñanza. Los profesores valoran muy positivamente el tratamiento de los conceptos y las características genuinas de la estructura problematizada, es más, aquello que los profesores consideran altamente importante para aprender es tratado en nuestra propuesta de enseñanza de manera muy adecuada según su propia valoración. En cambio, la separación de estas valoraciones con las que asignan a la enseñanza habitual es enorme, con diferencias próximas a 6 puntos sobre 10.

En definitiva, tenemos suficiente y variada evidencia empírica, tanto en lo referente a los profesores como a los alumnos y a los libros de texto, que apoyan la validez del trabajo realizado para mejorar la enseñanza de la óptica geométrica en el nivel de la Enseñanza Secundaria Obligatoria por lo que la secuencia de enseñanza experimental, cuyas actividades y comentarios se incluyen en el capítulo 6 (pag. 205), podría generalizarse en las aulas contando con la adecuada formación del profesorado.

Las perspectivas abiertas por este proyecto se centran en su extensión a los alumnos de Física de 2º curso de bachillerato, donde cabe esperar, lógicamente, que los logros sean incluso mayores. Particularmente interesante sería estudiar la evolución de los alumnos que llegan a esta asignatura tras haber sido instruidos en la óptica (en la ESO) con esta misma secuencia problematizada. En este caso, estamos convencidos de que la recuperación de un nivel funcional de comprensión sería realmente rápida y que el avance cuantitativo que debe hacerse en dicho curso plantearía muchas menos dificultades.

Por otro lado, tenemos el problema de la generalización de la propuesta en las aulas. Los resultados obtenidos con profesores que siguen cursos de formación con nosotros muestran una acogida muy favorable de nuestra secuencia de enseñanza, pero ¿la ponen en práctica con sus alumnos? Conseguir que los profesores en activo se conviertan en "colaboradores" (tal como las tres profesoras que han impartido grupos experimentales), es decir, que formen equipos de trabajo con un profesor-investigador experto es una de las perspectivas a explorar en la investigación didáctica de las ciencias experimentales. El autor de este trabajo y el grupo de investigación didáctica de la Universidad de Alicante está inmerso, en estos momentos, en el desarrollo de esta última perspectiva.

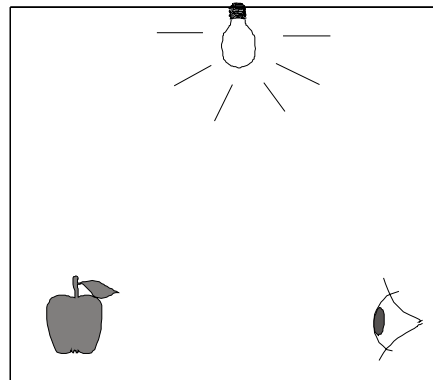
ANEXOS

ANEXO 1. Conjunto de cuestiones utilizadas para contrastar la existencia y persistencia de obstáculos para la comprensión del modelo de visión de Kepler. Cuestionarios C1-a, C2-a, C3-a, C4-a y C5-a

C-1 En una habitación iluminada una persona ve una manzana.

a) Después de leer con atención las siguientes frases, señala con una **X** cuál es para tí la mejor explicación sobre cómo vemos la manzana:

- Vemos porque la miramos.
- Vemos porque el ojo envía “la mirada” hacia la manzana.
- Vemos porque de ella sale una imagen (o una especie de reflejo) que llega hasta el ojo.
- Vemos porque de ella sale una imagen y el ojo envía “la mirada”.
- Vemos porque la luz que sale de ella llega hasta el ojo.
- Si no estás de acuerdo con ninguna de las anteriores completa la frase: Vemos porque



b) Dibuja en el esquema anterior las líneas y rayos de luz que consideres necesarios para aclarar tus ideas.

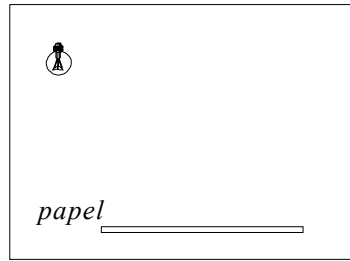
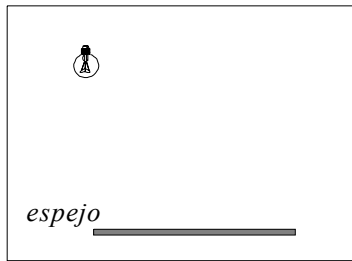
C-1.1 a) Explica cómo podemos ver un objeto.

b) Explica también por qué al ver un objeto reconocemos si es de mayor o menor tamaño, o si es de una forma u otra. Dibuja esquemas que ayuden a comprender tus razonamientos

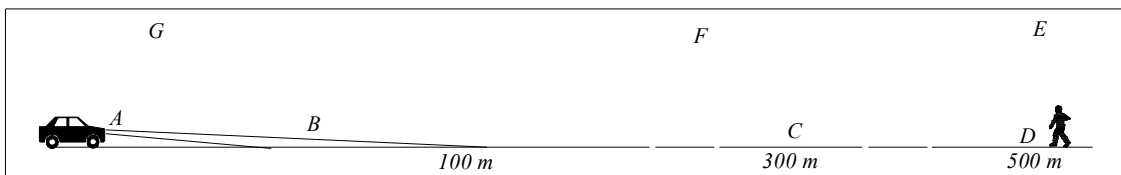
C-2. Imagina una habitación cerrada en la que no hay ningún objeto luminoso, es decir, en **total oscuridad**. Señala con una **X** las afirmaciones que consideres correctas:

- Se pueden ver los ojos de algunos animales (gatos, búhos,...).
- Se pueden ver los objetos muy pulidos (espejos, metales,...).
- Se puede ver pero con mucha dificultad, no nítidamente.
- Las personas no pueden ver pero algunos animales (gatos, búhos,...) sí.
- Ni las personas ni los animales pueden ver nada.

C-3. Explica qué le ocurre a la luz de una bombilla cuando llega a un espejo y cuando llega a un papel. Dibuja en los esquemas siguientes los rayos de luz que consideres para aclarar tus ideas.



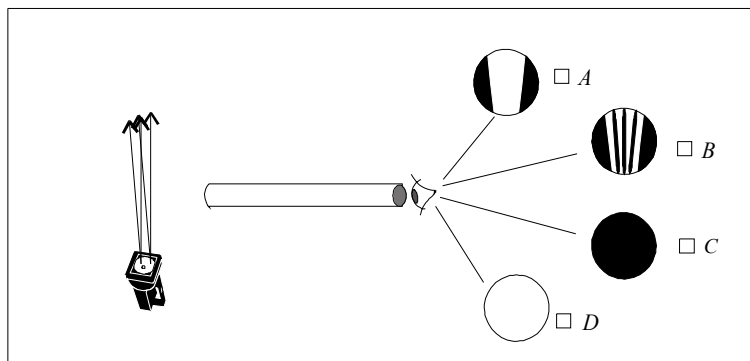
C-4. El esquema representa a una persona que en una noche oscura ve, a lo lejos, un coche con los faros encendidos



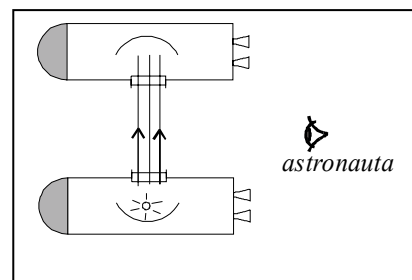
a) Indica las zonas dónde crees que hay luz:

b) Cuando se apagan los faros del coche ¿dónde crees que está, ahora, la luz que había en esas zonas?

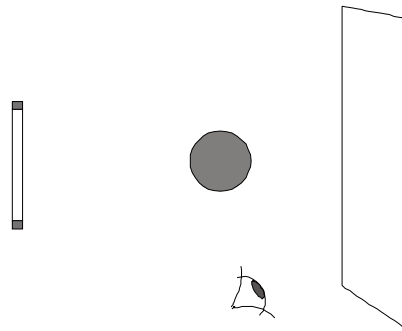
C-5. En una habitación de paredes negras cuya única fuente de iluminación es una linterna, una persona mira a través de un tubo hacia el haz de luz de la linterna. ¿Qué verá en esta situación? Señala con una X la opción que creas correcta.



C-5.1 ¿Qué verá el astronauta de la figura (representado con un ojo) cuando mira hacia el haz de luz que se emite por una de las naves y se refleja en la otra?



C-6. Un tubo fluorescente está encendido y es la única fuente de iluminación de la habitación. Situamos delante de él una pelota, ¿cómo será (en tamaño, forma, color,...) la sombra que se ve en la pared? Dibújala y acompaña este esquema de los rayos que consideres para justificar tu respuesta.



C-7. El dibujo representa una persona que ve la imagen de un pájaro al mirar a un espejo.

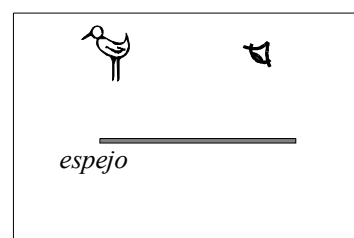
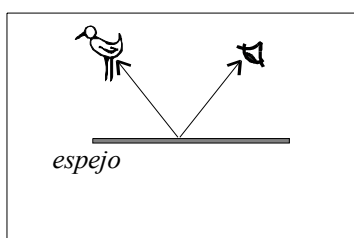
a) Después de leer con atención las siguientes frases, señala con una X cuál es para tí la mejor explicación sobre cómo vemos su imagen al mirar al espejo.

- El ojo envía “la mirada” que rebota en el espejo y llega al pájaro.
- Una imagen del pájaro llega al espejo, rebota y llega hasta el ojo.
- Una imagen del pájaro llega hasta el espejo y se queda en él. El ojo envía “la mirada” a esa imagen en el espejo.
- Una parte de la luz que sale de cada punto del pájaro rebota en el espejo y llega hasta el ojo.
- Si no estás de acuerdo con ninguna de las anteriores completa la frase: Vemos la imagen del pájaro porque

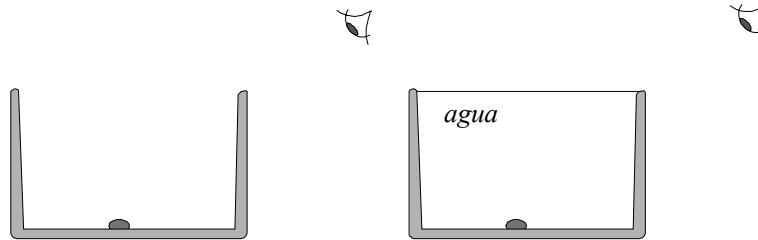


b) Dibuja en el esquema anterior las líneas o los rayos de luz que consideres conveniente para aclarar tus ideas.

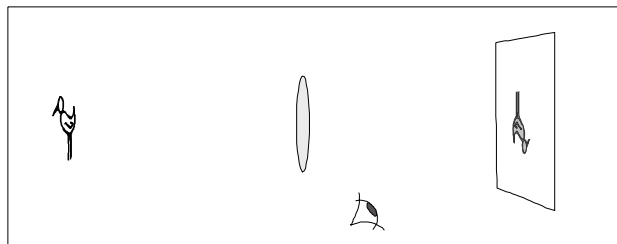
C-7.1 Una persona que no ha estudiado óptica realiza el esquema siguiente para explicar cómo vemos al mirar a un espejo plano. Con lo que has aprendido en clase indica las razones por las que está equivocada y realiza un esquema mejor.



C-8. Desde la posición donde se encuentra el “ojo” no se puede ver el objeto del fondo de recipiente, pero si se llena con agua sí puede verse. Explica este fenómeno y dibuja un diagrama que lo explique.



C-9. Con una lente como la de una lupa, podemos ver la imagen de un objeto iluminado sobre una pantalla. (en el esquema se representa este fenómeno que es similar al que ocurre cuando usamos un proyector y podemos ver la imagen de una diapositiva en una pantalla)



a) Explica cómo crees que se forma la imagen que vemos en la pantalla. Dibuja en este esquema los rayos que creas necesarios.

b) Si alejamos la pantalla de esa posición, ¿qué cambios crees que se producirán en la imagen? Señala con una X la respuesta que creas correcta:

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Se verá de mayor tamaño. | <input type="checkbox"/> No se verá |
| <input type="checkbox"/> Se verá de menor tamaño. | <input type="checkbox"/> Se verá de igual tamaño |
| <input type="checkbox"/> Otra respuesta: | |

c) Si quitamos la lente, ¿qué cambios crees que se producirán en la imagen? Señala con una X la respuesta que creas correcta:

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> La imagen seguirá existiendo pero no se verá | <input type="checkbox"/> La imagen seguirá existiendo y se verá |
| <input type="checkbox"/> Otra respuesta: | <input type="checkbox"/> No existirá la imagen |

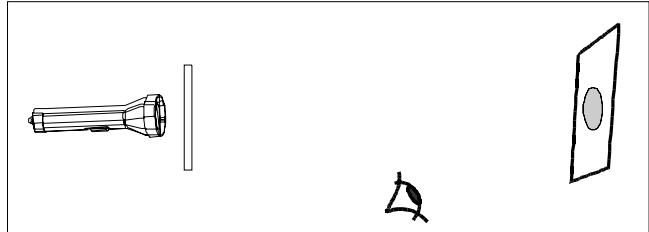
d) Si tapamos la mitad superior de la lente con un cuerpo opaco, ¿qué cambios crees que se producirán en la imagen? Señala con una X la respuesta que creas correcta:

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Sólo se formará la mitad superior de la imagen | <input type="checkbox"/> Se formará la imagen entera pero menos luminosa |
| <input type="checkbox"/> Sólo se formará la mitad inferior de la imagen | <input type="checkbox"/> Otra respuesta: |

C-10. Explica por qué crees que vemos el diferente color de los objetos.

C-11 Al interponer un filtro azul ante el haz de luz de una linterna, podemos ver una mancha azul sobre una pantalla, en dónde antes veíamos una mancha blanca.

Explica en este fenómeno, el papel que realiza el filtro.



C-12. Cita algunos fenómenos relacionados con la luz y la visión que la óptica geométrica no sea capaz de explicar.

ANEXO 2: Secuencia didáctica presentada a los profesores para su análisis
(instrumento C4-p). Tema de Óptica Geométrica del libro de Física y Química de 4º de
ESO de Cañas et al. (1995)

9 ENERGÍA Y ONDAS (II). LA LUZ



Para los antiguos filósofos griegos, el fuego era un elemento de la naturaleza, y la luz se consideraba «fuego visual». Las tinieblas no se entendían como simples ausencias de luz; eran unos vapores negros que emanaban de las profundidades y generaban demonios y espíritus. Es comprensible el terror que desataban los eclipses: ¿sería un castigo divino?, ¿una demostración del poder del reino de las tinieblas?

La cultura científica ha ahuyentado esos terrores. Los científicos esperan con impaciencia esas situaciones en que la Luna, al interponerse entre el Sol y la Tierra, proyecta su sombra sobre nosotros y facilita el estudio de la corona del Sol, nuestra principal fuente de luz. Pero ¿qué es la luz?, ¿por qué vemos las cosas?, ¿de dónde proceden los colores?

PARA EMPEZAR: EXPLORA TUS IDEAS

¿Cuál es la trayectoria correcta de los rayos de luz?



De los siguientes objetos, el único visible en una habitación perfectamente oscura sería:

- Un espejo.
- Una superficie coloreada.
- Un alambre al rojo.
- Un tubo de neón desconectado.



¿Cómo se vería la palabra SOL cuando se refleja en un espejo?



Cuando se miran a través de un trozo de vidrio rojo, las hojas verdes de una planta:

- Parecen casi negras.
- Son casi invisibles.
- Se ven con su color natural.
- Toman un aspecto azulado.



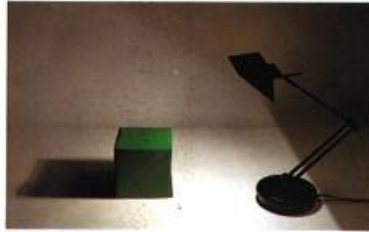
Las respuestas que has dado revelan tu visión personal. Las páginas siguientes te ofrecerán una visión científica. Vuelve a esta página cuando termines el capítulo. Justifica siempre tu respuesta.

1. LA LUZ Y SU PROPAGACIÓN

Fuentes de luz

Las cosas que emiten luz se llaman fuentes luminosas. El Sol, una vela o la bombilla de una lámpara son fuentes de luz.

Vemos las cosas cuando la luz se desplaza desde ellas hasta nuestros ojos. Algunas veces procede del propio objeto luminoso, pero otras es difundida por los objetos aunque no sean luminosos. Al recibir la luz, absorben parte de ella, pero otra parte la difunden en todas direcciones. La Luna y los otros planetas no son luminosos. Los vemos porque reflejan la luz del Sol hasta nuestros ojos.



La luz llega hasta nuestros ojos o desde una fuente de luz o difundida o desviada por los objetos.

Propagación de la luz

Si de una campana en la que se encuentra luciendo una bombilla extraemos el aire con una bomba de vacío, sigue enviando luz. A diferencia del sonido, la luz no necesita un medio material para propagarse. Por eso nos llega luz desde el Sol.

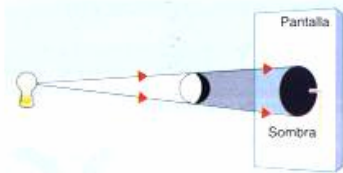


Precisamente es en el vacío donde la luz se propaga a la velocidad máxima: casi trescientos millones de metros cada segundo. A pesar de todo, la luz del Sol tarda ocho minutos en llegar a la Tierra.

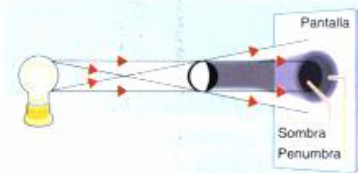
Un rayo de luz es la línea de luz más delgada que podemos obtener. Un haz de luz es un conjunto de rayos que se dirigen en la misma o en aproximadamente la misma dirección. Los rayos de luz se propagan siguiendo una línea recta.

Un ejemplo de haz de luz es el láser. Se trata de una luz muy intensa, de un solo color, que se propaga a través de grandes distancias sin dispersarse.

Una consecuencia de la propagación rectilínea de la luz es la formación de **sombras**.



Si colocamos una pelota de tenis entre una lámpara eléctrica pequeña y una pantalla blanca podemos ver una sombra oscura y nítida.



Si cambiamos la lámpara y colocamos una lámpara mayor, aparecen una zona de sombra total y otra de sombra parcial, llamada penumbra.

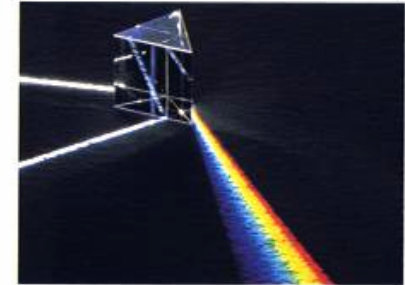
Se forman sombras cuando algunos rayos de luz siguen viajando en línea recta mientras otros rayos son detenidos por el objeto. El tipo de sombra depende del tamaño de la fuente de luz.

La luz es una onda

La propagación de la luz se puede explicar mediante un movimiento ondulatorio, similar al que se forma sobre la superficie de un estanque al caer una piedra, pero con la peculiaridad de que no necesita un medio material para su propagación.

La luz pertenece al grupo de las **ondas electromagnéticas**, al que también pertenecen las ondas de radio y televisión, las microondas, los rayos infrarrojos, los ultravioleta o los rayos X. Todas las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío a la misma velocidad.

La luz blanca es en realidad una mezcla de ondas de distinta longitud de onda. Si dejamos pasar un fino haz de luz blanca a través de un prisma transparente (de vidrio o de plástico) y recogemos el haz procedente del prisma en una pantalla blanca, observamos que la luz se ha descompuesto en colores; por orden: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, indigo y violeta.

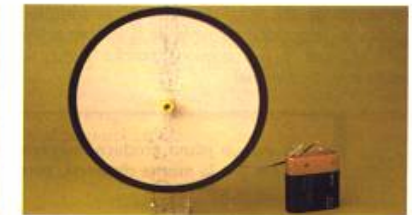


El motivo de esta descomposición es que en el vacío la luz de todos los colores viaja a la misma velocidad, pero en otros medios la luz de cada color se propaga a una velocidad diferente. Así, cuando la luz blanca atraviesa el prisma, la diferencia en las velocidades de propagación de cada color produce un cambio en la dirección, lo que motiva la separación de los diferentes colores. La secuencia de colores recibe el nombre de **espectro visible**.

El violeta es el que más disminuye de velocidad, por lo que se separa un ángulo mayor. El rojo disminuye menos de velocidad y, por tanto, se desvía un ángulo menor.



En el disco de la figura se han colocado algunos colores del espectro visible de la luz blanca.



Cuando el disco se hace girar, los colores se mezclan y producen la sensación de blanco.

La suma de colores del espectro produce de nuevo **luz blanca**.

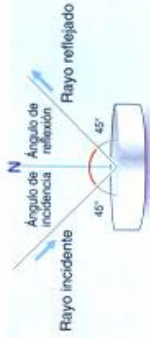
Los filtros de colores se han utilizado desde hace siglos en las vidrieras de las catedrales. Funcionan absorbiendo algunos colores y dejando pasar otros.



Un filtro verde, por ejemplo, colocado en el camino de los rayos de luz que atraviesan un prisma, absorbe los otros colores de la luz blanca que lo atraviesa.

2. REFLEXIÓN

Leyes de la reflexión



El rayo de luz que incide sobre el espejo se llama **rayo incidente**. El ángulo que forma este rayo con la normal se llama **ángulo de incidencia**, y el ángulo con el que la luz se refleja es el **ángulo de reflexión**.

Cuando la luz incide sobre un espejo, cambia de dirección y continúa propagándose por el mismo medio en que llegó. Se dice que se refleja.

El ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en el mismo plano.

Espejos planos

Javier sujeta la máquina con su mano derecha, pero en el espejo lo hace con la izquierda. La imagen aparece invertida lateralmente. El reflejo se ve al otro lado del espejo, a la misma distancia.

Los rayos de luz se reflejan hacia el ojo como si procedieran de detrás del espejo, pero realmente no vienen de ahí. Si colocamos una cámara fotográfica en la posición aparente de la imagen reflejada, el papel no se impresiona, porque la imagen no es real, sino **virtual**.



Un espejo plano produce imágenes virtuales del mismo tamaño que el objeto y a la misma distancia, pero invertidas lateralmente.

Espejos curvos

Tomamos dos cucharas bien pulimentadas y observamos nuestra imagen reflejada por ambos lados.

La parte interna de la cuchara (cóncava) forma una imagen pequeña e invertida, pero al aproximarnos mucho, la imagen aparece ampliada y hacia arriba.

La parte externa (convexa) forma siempre una imagen menor que la real y hacia arriba.



Los espejos curvos se dividen en **cóncavos** y **convexos**. Cumplen las mismas leyes de reflexión que los espejos planos.

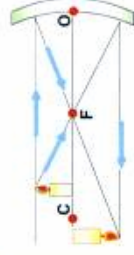
Espejos cóncavos

Los rayos de luz reflejados por un espejo cóncavo tienden a converger.



El **foco (F)** es el punto en el que los rayos que inciden paralelos al eje se encuentran después de reflejarse en el espejo. El **centro de curvatura (C)** es el centro de la esfera que describe el espejo. La **distancia focal** es la mitad del radio de curvatura.

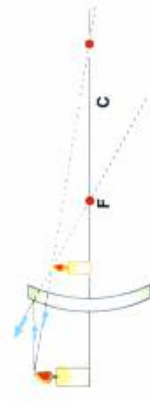
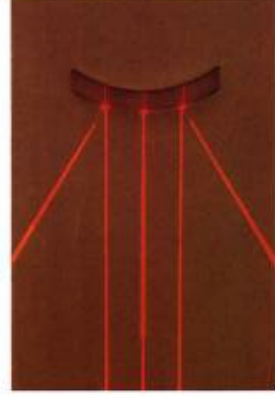
Los rayos que llegan paralelos al eje pasan por el foco tras reflejarse. Los rayos procedentes del foco, una vez reflejados, emergen paralelos al eje.



Si el objeto está entre el foco **F** y el espejo, la imagen se forma detrás del espejo (virtual) y aparece aumentada y derecha.

El tamaño y la disposición (derecha o invertida) de las imágenes reflejadas por un espejo cóncavo dependen de la posición del objeto con relación al foco del espejo.

Espejos convexos



Los rayos reflejados por un espejo convexo son divergentes. Se unen en un foco virtual.

La imagen del objeto queda detrás del espejo, es decir, es una imagen virtual.

La imagen de un espejo convexo es siempre virtual, hacia arriba, más pequeña y detrás del espejo.

3. REFRACCIÓN

Cambios en la dirección de los rayos de luz

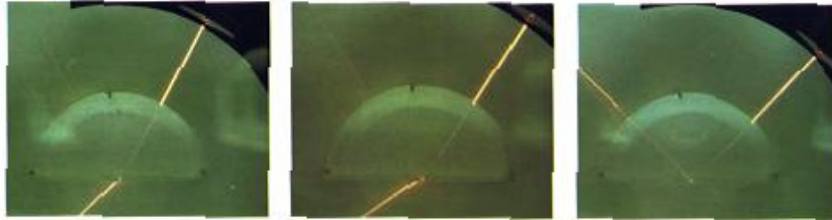
Los rayos de luz se desvían cuando pasan de una sustancia (como el aire) a otra sustancia (como el agua) en la que se mueven a distinta velocidad. Se dice que se **refractan**.

Cuando el rayo pasa de un medio menos denso a otro más denso se acerca a la normal (perpendicular a la superficie de separación de ambos medios), y si el paso es de un medio más denso a otro menos denso se aleja de la normal.



Cuando la luz pasa oblicuamente de un medio a otro en el que tiene distinta velocidad, experimenta un cambio de dirección. Este fenómeno se llama **refracción**.

Reflexión total



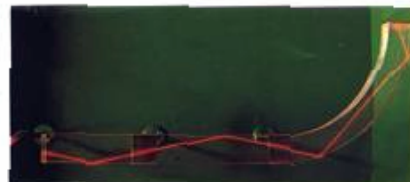
Si un rayo de luz se lanza hacia el centro de un bloque semicircular, la mayor parte de la luz se refracta en la cara recta y pasa a su través. Pero hay un rayo de luz débil que se refleja en la superficie.

A medida que el ángulo de incidencia aumenta el ángulo de refracción también aumenta, pero la intensidad del rayo refractado se hace menor. Al mismo tiempo, el rayo reflejado se hace más intenso.

Llega un momento en el que el ángulo de refracción es de 90° . El ángulo de incidencia correspondiente se llama **ángulo límite**. Si el ángulo de incidencia aumenta más, el rayo de luz experimenta **reflexión total**.



Si el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite se produce reflexión total.



En la fibra óptica se conduce la luz mediante reflexiones totales.

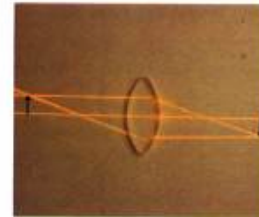
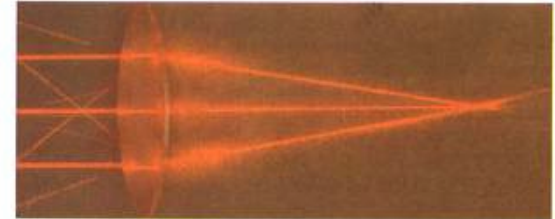
4. LENTES

Una lente es una pieza fabricada con un material transparente cuya misión es formar imágenes de objetos reales. Las que son más gruesas en el centro que en los bordes se denominan **convexas** o **lentes convergentes**, por hacer converger la luz (concentran los rayos). Las que son más delgadas en el centro que en los bordes se llaman **cóncavas** o **lentes divergentes**, por hacer diverger la luz (abren los rayos).

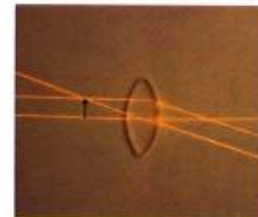
Lentes convergentes

Las lentes convergentes concentran los rayos de luz. El lugar en el que los rayos paralelos al eje principal coinciden tras atravesar la lente se llama **foco principal**.

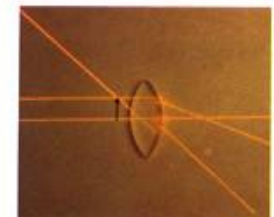
La distancia entre el centro óptico y el foco principal se llama **distancia focal**. La distancia focal está relacionada con la capacidad de la lente para desviar la luz.



Si el objeto está a la izquierda del foco, se forma una imagen real y hacia abajo. Su tamaño varía con la distancia al foco.



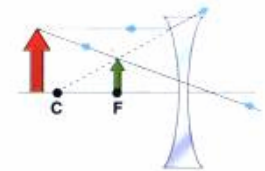
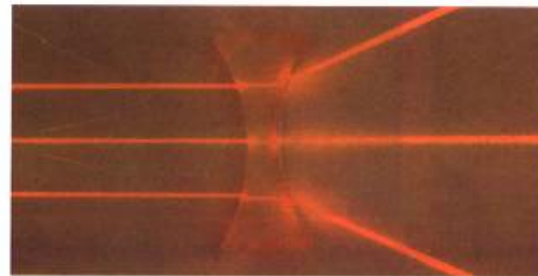
Cuando el objeto está en el foco, los rayos abandonan la lente paralelos entre sí y la imagen se forma en el infinito.



Si el objeto está entre el foco y la lente, los rayos divergen y no se cortan; en consecuencia, la imagen formada es virtual.

Lentes divergentes

Las lentes divergentes tienden a dispersar los rayos de luz. El **foco principal (F)** de una lente convergente es el punto del que parecen proceder los rayos que inciden paralelos al eje principal después de refractarse (foco virtual).



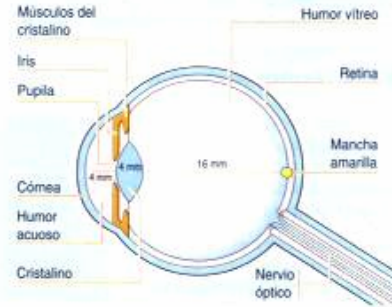
La imagen es siempre virtual, hacia arriba, más pequeña y del mismo lado de la lente que el objeto.

5. EL OJO Y LOS INSTRUMENTOS ÓPTICOS

El ojo

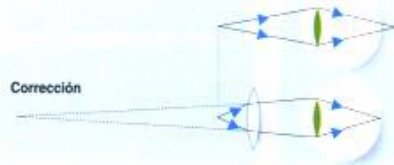
La luz que llega al ojo de un observador entra en el ojo a través de la **pupila**, atraviesa el **crystalino** (que actúa como una lente), los **humores acuoso y vítreo** (medios transparentes) y alcanza la **retina**. Sobre la retina se forma una imagen del objeto que se mira.

La retina está tapizada de células sensibles a la luz que transforman las señales luminosas en impulsos nerviosos. El **nervio óptico** transmite al cerebro las sensaciones recibidas por la retina, y allí son tratadas las informaciones captadas por nuestros dos ojos. Percibimos una imagen única, en relieve. Por la marcha de los rayos la imagen que se obtiene sobre la retina es real e invertida.



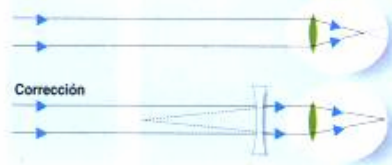
Defectos de visión

HIPERMETROPIA



Hipermetropía: Se pueden ver los objetos distantes, pero no enfocar los objetos cercanos. Esto significa que los rayos de luz de un objeto próximo se enfocan detrás de la retina. Unas gafas con lentes convergentes corrigen este problema.

MIOPÍA



Miopia: Se pueden ver claramente los objetos cercanos, pero no enfocar los objetos distantes. Esto significa que los rayos de luz procedentes de un objeto distante se enfocan delante de la retina. El problema se soluciona con lentes divergentes.

Imágenes en una cámara oscura

La cámara tiene un pequeño agujero o una lente en un extremo y una pantalla en el otro.



Una cámara fotográfica tiene una lente en un extremo y una película fotográfica en el otro.



En la cámara oscura, la imagen es real, está invertida de izquierda a derecha y hacia abajo. Tiene la misma forma y color que el objeto.

6. MEZCLAS DE COLORES

Colores por adición



Las imágenes que observamos en una pantalla de televisión se obtienen variando las intensidades de tres **colores primarios: rojo, azul y verde**.



Si iluminamos a la vez una pantalla con focos de colores **rojo, azul y verde** de la misma intensidad luminosa, obtendremos **luz blanca** en la pantalla.

Mezclando luces de colores **rojo, azul y verde** podemos obtener cualquier otro color. Si las luces de estos tres colores primarios se unen, dan **blanco**.

Colores por sustracción

Tomemos tres filtros (plásticos coloreados transparentes) de **colores secundarios: uno cian, otro magenta y otro amarillo**. Si los superponemos por parejas sobre una pantalla iluminada, observamos que los filtros **cian y amarillo** producen el color **verde**, los filtros **amarillo y magenta** producen **rojo**, y con el **cian y magenta** obtenemos **azul**.



Al superponer los tres filtros a la vez no pasa luz: obtenemos el negro.

Si observas, con ayuda de una lupa, la siguiente serie de fotografías, podrás comprobar que la foto de color es una superposición de puntos cian, magenta y amarillo.



Imagen en cian.

Imagen en magenta.

Imagen en amarillo.

Imágenes superpuestas.

La impresión en colores y las mezclas de pigmentos se basan en el proceso de **sustracción de colores**. La sustracción de todos produce el **negro**.

ANEXO 3: Relación de libros de texto utilizados en el cuestionario C6-L

Primer ciclo de ESO:

- Akal (Madrid), 1995. Terán, C., et al. 1^{er} Ciclo. *Ciencias de la Naturaleza*.
- Bruño (Madrid), 1997. Panadero, J.E. et al. 2º ESO. *Ciencias de la Naturaleza*.
- Ecir (Valencia), 1997. García, M., et al. 2º ESO. Proyecto Avizor. *Ciencias de la Naturaleza*.
- Ecir (València), 1998. Caamaño, A., et al. Projecte Gaia12-16. Credit 3. *Ciències de la Natura*.
- Edebé (Barcelona), 1997. Maijal. 2º ESO. *Ciencias de la Naturaleza*.
- Everest (León), 1998. Sánchez, F., et al., 2º ESO. *Ciencias de la Naturaleza*.
- Octaedro (Barcelona), 1996. Azcona, R., et al. 1º ESO. *Ciencias de la Naturaleza*.
- Santillana-Vorammar (Madrid). 1997. Arribas, E., et al. 2º ESO. *Ciencias de la Naturaleza*.
- SM (Madrid), 1997. Del Carmen, L., et al. 2º ESO. *Ciències de la Natura*.
- Vicens-Vives (Barcelona), 1998. Boixaderas N., et al. Entorno 2. *Ciencias de la Naturaleza*.

Segundo ciclo de ESO:

- Akal (Madrid), 1995. Terán, S., et al., 4º ESO. *Física y Química*.
- Algaida (Sevilla), 1994. De Manuel, E., et al. 4º ESO. *Técnicas Experimentales de Laboratorio*.
- Ecir (Valencia), 1996. Sendra, F., et al., Proyecto Avizor 4º ESO. *Física y Química*.
- Ecir (Valencia), 2000. Peidró, J., et al. 2º Ciclo. *Laboratorio de Física y Química*.
- Edelvives (Zaragoza), 1995. España, J.A., et al. 4º ESO. *Física y Química*.
- Editex (Madrid), 1994. Antón, J.L., et al. 3º ESO. *Ciencias de la Naturaleza (Física y Química)*.
- Everest (León), 1997. Fidalgo, J.A., et al. 4º ESO. *Física y Química*.
- Marfil (Alcoy), 1999. Doménech, J.L., et al. 4º ESO. *Física y Química*.
- McGraw-Hill (Madrid), 1995. García, J., et al. 4º ESO. *Física y Química*.
- McGraw-Hill (Madrid), 1999. López, J., et al. 4º ESO. *Técnicas Experimentales de Laboratorio*.
- Santillana (Madrid), 1995. Martín, j., et al. 4º ESO. *Física y Química*.
- SM (Madrid), 1995. Cañas, A., et al. 4º ESO. *Física y Química*.

Bachillerato

- Anaya (Madri), 2001. Satoca, j. et al., 2º curso. *Física*.
- Bruño (Madrid), 1998. Gisbert, M., et al., 2º curso. *Física*.
- Castellnou (Barcelona), 1997. Caturla, E., et al.,. *Física 2*
- Ecir (Valencia), 1998. Enciso, E., et al., 2º curso. *Física*.
- Everest (León), 1998. Fidalgo, J.A., et al., 2º curso. *Física*.
- Marfil (Alcoy), 1997. Benedito, J. et al., 1º curso. *Física y Química*.
- McGraw-Hill (Madrid), 1997. Peña, A., et al., 2º curso. *Física*.
- Octaedro (Barcelona), 1996. Solbes, J., et al., et al., 2º curso. *Física*.
- Oxford (Navarra), 2000. Barrio, j. 2º curso. *Física*.
- SM (Madrid), 1997. Lara, C., et al., 2º curso. *Física*.

ANEXO 4. Relación de cuestiones de selectividad analizadas en el instrumento C7-S

Distrito universitario de Andalucía

Junio de 2003

Cuestión. a) Si queremos ver una imagen ampliada de un objeto, ¿qué tipo de espejo tenemos que utilizar? Explique, con ayuda de un esquema, las características de la imagen formada.

b) La nieve refleja casi toda la luz que incide en su superficie ¿Por qué no nos vemos reflejados en ella?

Distrito universitario de Aragón

Junio de 2001

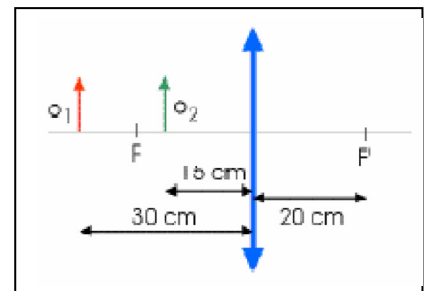
Problema. Uno de los defectos más comunes del ojo humano es la miopía.

- Explica en qué consiste este defecto ¿Con qué tipo de lente puede corregirse?
- Un cierto ojo miope es incapaz de ver nítidamente objetos a más de 0,5 m de distancia (punto remoto) ¿Cuántas dioptrías tiene?

Junio de 1998

Problema. a) Calcula las posiciones y tamaños de las imágenes dadas por la lente de la figura de los objetos O_1 y O_2 , ambos de altura $y = 1$ cm.

b) Comprueba gráficamente tus resultados mediante trazados de rayos.

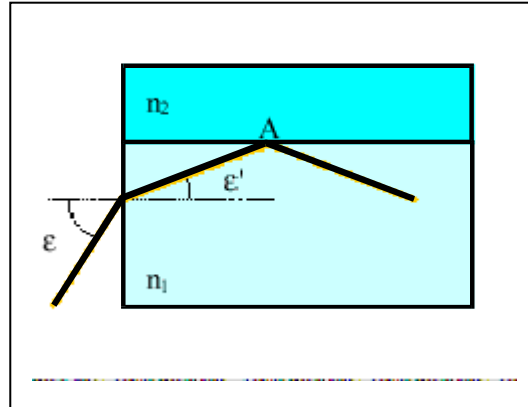


Junio 1999

Problema. a) (sin relación con la óptica geométrica)

b) Un rayo de luz incide desde el aire ($n = 1$) sobre un bloque de vidrio de índice de refracción $n_1 = 1,5$, con un ángulo de incidencia $\varepsilon = 30^\circ$. Calcula el ángulo de refracción ε' .

c) Después, el rayo alcanza el punto A de separación con otro vidrio



diferente, donde se observa que se produce reflexión total ¿Qué valor debe tener, como máximo, el índice de refracción n_2 de este segundo vidrio?

Septiembre de 2002

Cuestión. Un objeto O, de 10 cm de altura, está situado a 1 m del vértice de un espejo esférico convexo, de 2m de radio de curvatura.

- Calcula la posición y tamaño de la imagen.
- Comprueba gráficamente tus resultados mediante un trazado de rayos.

Septiembre de 2003

Cuestión. Una lupa se emplea para poder observar con detalle objetos de pequeño tamaño.

- Explica el funcionamiento óptico de una lupa: ¿Qué tipo de lente es, convergente o divergente?, ¿Dónde debe situarse el objeto a observar? La imagen que se produce, ¿es real o virtual? ¿derecha o invertida?
- Dibuja un trazado de rayos que explique gráficamente el proceso de formación de imagen de una lupa?

Distrito universitario de Canarias

Junio de 2002

Cuestión. Explica en qué consisten la miopía y la hipermetropía. ¿Qué lentes se usan para su corrección?

Septiembre de 2002

Cuestión. Explica razonadamente cómo es la imagen que se obtiene en un espejo convexo.

Problema. La potencia de una lente es de 5 dioptrías.

- a) Si a 10 cm a su izquierda se coloca un objeto de 2 mm de altura, hallar la posición y el tamaño de la imagen.
- b) Si dicha lente es de vidrio ($n = 1,5$) y una de sus caras tiene un radio de curvatura de 10 cm ¿Cuál es el radio de curvatura de la otra? ¿De qué tipo de lente se trata?

Junio de 2003

Problema. El ojo normal se asemeja a un sistema óptico formado por una lente convergente (el cristalino) de +15 mm de distancia focal. La imagen de un objeto lejano (en el infinito) se forma sobre la retina, que se considera como una pantalla perpendicular al eje óptico. Calcula:

- a) La distancia entre la retina y el cristalino.
- b) La altura de la imagen de un árbol de 16 m de altura, que está a 100 m del ojo.

Junio de 1998

Problema. Se coloca un objeto de 10 cm de altura a 0,2 m de una lente biconvexa de 2 dioptrías.

- a) Obtén gráficamente la posición y el tamaño de la imagen que resulta. ¿Es real o virtual?
- b) Calcula analíticamente dichos posición y tamaño.

Cuestión. Disponiendo de un prisma de cuarzo, indica qué le ocurre a un rayo de luz blanca que incide con cualquier ángulo en una de sus caras, justificando físicamente los fenómenos que ocurren.

Cuestión. a) Explique qué son una lente convergente y una lente divergente. ¿Cómo están situados los focos objeto e imagen en cada uno de ellos?

b) ¿Qué es la potencia de una lente y en qué unidades se acostumbra a expresar?

Distrito universitario de Cantabria

Junio de 1998

Cuestión. a) ¿Qué se entiende por foco y distancia focal en un espejo esférico cóncavo y en uno convexo?

b) ¿Cómo será la imagen que proporciona un espejo esférico cóncavo de un objeto situado entre el centro de curvatura y el foco del espejo? Se utilizarán diagramas de rayos para responder a esta cuestión.

Septiembre de 1998

Cuestión. a) ¿Qué se entiende por foco objeto y foco imagen de una lente convergente y una divergente?

b) Describe el funcionamiento de algún instrumento óptico sencillo que utilice lentes convergentes y/o divergentes.

Junio de 1999

Cuestión. A una persona con el mismo defecto óptico en ambos ojos se le colocan unas gafas de -2 dioptrías en cada lente (cristal) ¿Qué defecto tiene y cómo se corrige?

Septiembre de 2000

Cuestión. a) Define el concepto de foco de un espejo circular convexo.

b) ¿Cómo será la imagen que dé un objeto situado delante de un espejo convexo? Indicar recurriendo a una construcción de diagrama de rayos, si la imagen es real o virtual, invertida o no y de mayor o menor tamaño.

Junio de 2001

Cuestión. a) ¿Qué entiendes por reflexión total y ángulo límite?

b) El índice de refracción del diamante es de 2,5 y el del vidrio, 1,4 ¿Cuál es el ángulo límite entre el diamante y el vidrio?

Septiembre de 2002

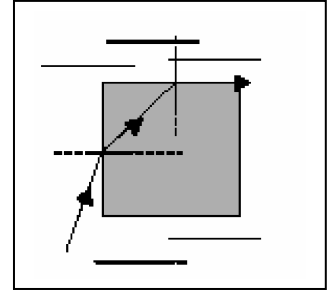
Cuestión. a) Describe algún espejo que pueda formar tanto imágenes reales como imágenes virtuales ¿De qué depende que se formen unas u otras?

b) ¿Por qué un espejo plano sólo puede formar imágenes virtuales?

Septiembre de 2003

Cuestión. a) Explica en qué consiste la reflexión total
¿Puede ocurrir cuando la luz pasa del aire al agua?

b) Un rayo monocromático incide en la cara vertical de un cubo de vidrio de índice de refracción $n' = 1,5$. El cubo está sumergido en agua ($n = 4/3$) ¿Con qué ángulo debe incidir para que en la cara superior del cubo haya reflexión total?



Distrito universitario de Extremadura

Junio 1988

Cuestión. Dibuja la imagen de un objeto situado delante de un espejo esférico cóncavo cuando el objeto se encuentra entre el foco y el centro de curvatura.

Junio 1999

Problema. Delante de un espejo cóncavo cuyo radio de curvatura es de 0,4 m se sitúa un objeto de 0,05 m de altura a una distancia de 0,6 m del centro óptico. Calcula:

- La distancia focal del espejo.
- La posición y tamaño de la imagen.
- Representa gráficamente el problema.

Junio 2001

Cuestión. Determina gráfica y analíticamente la posición y el tamaño de la imagen de un objeto de 0,03 m de altura, situado sobre el eje óptico a 0,4 m del centro de un espejo convexo de distancia focal 0,1 m.

Distrito universitario de Castilla-León

Junio 1998

Cuestión. Realizando las construcciones gráficas oportunas, deduce qué características tiene la imagen que se forma en un espejo cóncavo esférico cuando el objeto se halla:

- Entre el foco y el vértice del espejo.
- A una distancia mayor que el radio de curvatura del espejo.

Septiembre 1999

Cuestión. Utilizando las oportunas gráficas de construcción de imágenes.

- a) Deduzca qué características comunes poseen las imágenes producidas por las lentes delgadas divergentes y los espejos convexos.
- b) ¿Para qué posiciones del objeto se manifiestan estas características comunes?

Razone las respuestas.

Junio 2001

Cuestión. Dibuje un esquema con la formación de las imágenes en un microscopio. Describa su funcionamiento. Analice las características de las imágenes formadas por sus lentes. ¿De qué factores depende el aumento?

Distrito universitario de Castilla La Mancha

Junio 1998

Cuestión. Supongamos que deseas hacerte una foto a ti mismo y, para ello, te colocas con la cámara de fotografiar delante de un espejo a 5 m de él ¿A qué distancia debes enfocar la cámara para que la fotografía salga nítida?

Junio 1999

Cuestión. Un foco luminoso puntual se encuentra situado en el fondo de un estanque lleno de agua de $n = 4/3$ y a 1 m de profundidad. Emite luz en todas las direcciones. En la superficie del agua se forma un círculo luminoso de radio R. Explica brevemente este fenómeno y calcula el radio R del círculo luminoso.

Junio 2001

Cuestión. Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de 30° ¿Qué ángulo formará entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul?

Datos: $n_{\text{rojo}} = 1,612$; $n_{\text{azul}} = 1,671$; $n_{\text{aire}} = 1$.

Junio 2002

Cuestión. La reflexión total solamente se produce cuando la luz pasa de un medio de mayor a otro de menor índice de refracción. Explica por qué.

Septiembre 2002

Cuestión. Un espejo esférico cóncavo tiene un radio de curvatura de 40 cm. Halla la imagen de un objeto situado a 30 cm del espejo. Indicar las características de la imagen obtenida.

Junio 2003

Cuestión. Dada una lente delgada convergente, obtener de forma gráfica la imagen de un objeto situado entre el foco y la lente. Indicar las características de dicha imagen.

Distrito universitario de Madrid

Septiembre de 1999

Cuestión. Una fuente luminosa emite luz monocromática de longitud de onda en el vacío $\lambda_0 = 6 \cdot 10^{-7}$ m (luz roja) que se propaga en el agua de índice de refracción $n = 1,34$. Determine:

- a) La velocidad de propagación de la luz en el agua,
- b) (sin relación con la óptica geométrica)

Datos: Velocidad de la luz en el vacío $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹.

Junio 2002.

Cuestión. Un objeto luminoso se encuentra delante de un espejo esférico cóncavo. Efectúe la construcción geométrica de la imagen e indique su naturaleza si el objeto está situado a distancia igual, en valor absoluto, a:

- a) La mitad de la distancia focal del espejo.
- b) El triple de la distancia focal del espejo.

Problema. Un sistema óptico centrado está formado por dos lentes delgadas de igual distancia focal ($f = 10$ cm) separadas 40 cm. Un objeto lineal de altura 1 cm se coloca delante de la primera lente a una distancia de 15 cm. Determine:

- a) La posición, el tamaño y la naturaleza de la imagen formada por la primera lente.

- b) La posición de la imagen final del sistema, efectuando su construcción geométrica.

Junio 2003.

Cuestión. Un rayo de luz que viaja en el vacío incide sobre un prisma de vidrio plano. El ángulo que forma el rayo con la normal a la superficie es 30° . Determine:

- La velocidad de la luz en el vidrio y
- El ángulo de refracción.

Datos: velocidad de la luz en el vacío $c = 3 \cdot 10^8$ m/s e índice de refracción del vidrio, $n = 1,45$.

Septiembre 2003.

Cuestión. La luz de 600 nm de longitud de onda en el aire, pasa de este medio al diamante (índice de refracción $n = 2,4$). Obtenga:

- (sin relación con la óptica geométrica).
- (sin relación con la óptica geométrica).
- El ángulo crítico para la reflexión total entre el diamante y el aire.

Problema. Por medio de un espejo cóncavo se quiere proyectar la imagen de un objeto de tamaño 1 cm sobre la pantalla plana, de modo que la imagen sea invertida y de tamaño 3 cm. Sabiendo que la pantalla ha de estar colocada a 2 cm del objeto, calcule:

- Las distancias del objeto y de la imagen al espejo, efectuando la construcción geométrica.
- El radio del espejo y la distancia focal.

Junio de 1998

Cuestión. a) Indica las diferencias que, a su juicio, existen entre los fenómenos de refracción y de dispersión de la luz. ¿Puede un rayo de luz monocromático sufrir ambos fenómenos?

b) ¿Por qué no se observa dispersión cuando la luz blanca atraviesa una lámina de vidrio de caras plano-paralelas?

Problema. Un objeto luminoso de 2 mm de altura está situado a 4m de distancia de una pantalla. Entre el objeto y la pantalla se coloca una lente

esférica delgada L, de distancia focal desconocida, que produce sobre la pantalla una imagen tres veces mayor que el objeto.

- a) Determina la naturaleza de la lente L, así como su posición respecto al objeto y la pantalla.
- b) Calcula la distancia focal, la potencia de la lente L y efectúe la construcción geométrica de la imagen.

Distrito universitario de Murcia

Junio de 1998

Problema. Se tiene una lente cóncava con radios de curvatura de 20 y 40 cm. Su índice de refracción es de 1,8. Un objeto de 3 mm se coloca a 50 cm de la lente. Calcula:

- a) La potencia óptica de la lente.
- b) Dónde se forma la imagen.
- c) El tamaño de la imagen.

Junio de 1999

Problema. Una lente bicóncava simétrica posee una potencia óptica de -2 dioptrías y está formada por un plástico con un índice de refracción de 1,8. Calcule:

- a) La velocidad de la luz en el interior de la lente.
- b) Los radios de curvatura de la lente.
- c) Dónde hemos de colocar un objeto para que el tamaño de su imagen sea la mitad que el del objeto.

Septiembre de 1999

Cuestión. Determina el ángulo crítico para la reflexión total entre el agua y el aire. Índice de refracción del agua 1,33.

Septiembre de 2003

Problema. Se tiene una lente biconvexa con un índice de refracción $n = 1,5$ con ambos radios de curvatura iguales a 10 cm. Calcule:

- a) las distancias focales de la lente.
- b) La posición del objeto para que la imagen tenga el mismo tamaño que el objeto.
- c) La velocidad de la luz en el interior de la lente.

Distrito universitario de La Rioja

Junio de 1998

Problema. Un objeto situado a 8 cm de un espejo esférico cóncavo produce una imagen virtual 10 cm detrás del espejo.

- a) Si el objeto se aleja hasta 25 cm del espejo, ¿dónde estará la imagen?
- b) ¿Qué puedes decir de ella?

Septiembre de 1998

Cuestión. Un rayo de luz láser de longitud de onda $5,20 \cdot 10^{-7}$ m incide en un bloque de vidrio.

- a) ¿Puedes describir los fenómenos que ocurren?
- b) Si el ángulo de incidencia es de 45° y el de refracción 30° ¿puedes calcular el índice de refracción del vidrio?
- c) Con el índice de refracción calculado ¿podrías decir cómo calcularías el ángulo límite y cuál es su valor?

Junio de 1999

Problema. Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de 30° .

- a) ¿Qué ángulo formarán entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul, componentes de la luz blanca, si los valores de los índices de refracción del vidrio para estos colores son, respectivamente, $n_{\text{rojo}} = 1,612$ y $n_{\text{azul}} = 1,671$.
- b) (sin relación con la óptica geométrica).

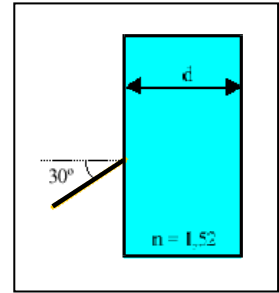
Septiembre de 1999

Cuestión. Una loseta de vidrio con un índice de refracción de 1,5 se sumerge en agua con un índice de refracción de 1,33. La luz dentro del agua incide sobre el vidrio. Hallar el ángulo de refracción si el ángulo de incidencia es 60° .

Cuestión. Cuando se habla del ojo como instrumento óptico, aparecen dos puntos importantes: el punto próximo y el punto remoto. Explica clara y brevemente qué son y qué importancia tienen.

Junio de 1999

Problema. Un estrecho haz de luz de frecuencia $V = 5 \cdot 10^{14}$ Hz incide sobre un cristal de índice de refracción $n = 1,52$ y anchura d . El haz incide desde el aire formando un ángulo de 30° (ver figura). Se pide:



- (sin referencia con la óptica geométrica).
- Enuncia la ley de Snell para la refracción.
- ¿Cuál será el ángulo que forma el haz de luz cuando atraviesa el cristal y entra de nuevo en el aire?

Cuestión. ¿Cuál es la distancia focal de una lente de cuarzo que tiene una potencia de 4,5 dioptrías?

Junio de 2000

Cuestión. Un objeto de 4 cm de altura, se coloca delante de un espejo cóncavo de 40 cm de radio de curvatura. Determinar la posición, tamaño y naturaleza de la imagen en los dos casos siguientes: 1) cuando el objeto se encuentra a 60 cm del espejo, y 2) cuando se encuentra a 10 cm.

Septiembre de 2000

Cuestión. Un telescopio utiliza un espejo cóncavo esférico de 8 m de radio de curvatura. Hallar la posición y el diámetro de la imagen de la Luna que formará este espejo. La luna tiene un diámetro de $3,5 \cdot 10^6$ m y dista $3,8 \cdot 10^8$ m de la Tierra.

Junio de 2001

Cuestión. Enfrente de un espejo convexo de 40 cm de radio de curvatura y a 25 cm de él se encuentra un objeto perpendicular a su eje de 0,5 cm de altura. Determinar la posición y el tamaño de la imagen.

Septiembre de 2001

Problema. Una vela encendida está colocada a 30 cm delante de una lente convergente de 15 cm de distancia focal, que, a su vez, está delante de otra lente convergente de 10 cm de focal. La distancia entre las lentes es de 50 cm. Calcular el tamaño y la posición de la imagen final.

Cuestión. Una persona hipermétrope tiene el punto próximo a 0,60 m ¿qué tipo de lente correctora utilizará para poder leer con claridad un libro situado a 0,30 m? Justifica tu respuesta.

Septiembre de 2003

Problema. Una lente divergente se emplea para formar una imagen virtual de un objeto real. El objeto se coloca a 80 cm a la izquierda de la lente, y la imagen se localiza a 40 cm a la derecha de la lente. Determinar la distancia focal de la lente. Si el objeto tiene un tamaño de 3 cm ¿qué tamaño tendrá la imagen?

Distrito universitario del País Vasco

Junio 2002

Problema. Una superficie de vidrio ($n_v = 1,50$) tiene sobre ella una capa de agua ($n_a = 1,33$). Un rayo luminoso monocromático que se propaga por el vidrio incide sobre la superficie vidrio-agua.

- Hallar el ángulo de incidencia para que se produzca reflexión total. Ayúdate de un dibujo.
- ¿Cuál es la velocidad de la luz en cada medio?

Cuestión. Describir el funcionamiento de una lupa y analizar las características de sus imágenes ¿Se pueden recoger estas imágenes en una pantalla?

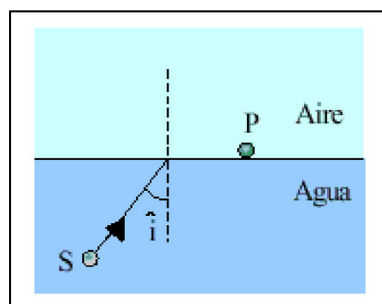
Septiembre 2002

Cuestión. Describa el funcionamiento del ojo humano ¿En qué consisten la miopía y la hipermetropía? ¿Cómo se corrigen?

Distrito universitario de Valencia

Junio 1999

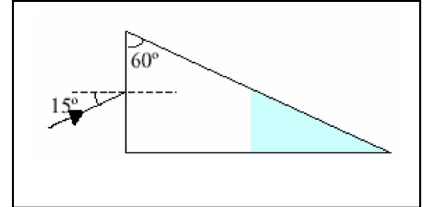
Cuestión. ¿Con qué ángulo, i , con respecto a la vertical, debe mirar un submarinista, S, que está debajo del agua, para ver un pequeño objeto, P, que está sobre su superficie?



Datos: velocidad de la luz en el agua: $v_{\text{agua}} = 2,3 \cdot 10^8$ m/s; velocidad de la luz en el aire: $v_{\text{aire}} = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Septiembre 1999

Problema. Un prisma de sección recta triangular, de ángulos 60° , 30° y 90° , se encuentra en el vacío. Sobre una de sus caras incide un rayo de luz, con ángulo de incidencia de 15° , tal como indica la figura. Determinar si se producirá reflexión total cuando el rayo alcance la cara mayor del prisma.



Dato: índice de refracción del prisma: $n = 1,5$

Junio 2001

Problema. Un rayo de luz monocromática incide en una de las caras de una lámina de vidrio, de caras planas y paralelas, con un ángulo de incidencia de 30° . La lámina de vidrio situada en el aire, tiene un espesor de 5 cm y un índice de refracción de 1,5.

- Dibujar el camino seguido por el rayo.
- Calcula la longitud recorrida por el rayo en el interior de la lámina.
- Calcula el ángulo que forma con la normal el rayo que emerge de la lámina.

Septiembre 2002

Problema. Se desea diseñar un espejo esférico que forme una imagen real, invertida y que mida el doble que los objetos que se sitúen a 50 cm del espejo. Se pide determinar:

- Tipo de curvatura del espejo. Justificar la respuesta.
- Radio de curvatura del espejo.

Junio 2003

Cuestión. Describe en qué consiste la miopía y la hipermetropía y cómo se corrigen.

Cuestión. ¿Qué características tiene la imagen que se forma en un espejo cóncavo si el objeto se encuentra a una distancia mayor que el radio de curvatura? Dibújalo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Índice de autores

A

Acevedo, (1993).....	29
Alonso et al., (1992a)	31, 163, 200
Alonso et al., (1992b)	31, 33
Alonso et al., (1996).....	30, 163, 288
Alonso, (1994).....	288
Alonso, et al., (1992a)	33
Andersson y Bach, (2004).....	82, 155
Andersson y Karrquist, (1983)...	93, 94, 107, 116, 120, 128
Antón et al., (1994).....	197
Aristóteles, (ed. 1993)	48
Arnold y Millar, (1996)	23
Ausubel, (1978)	16, 18, 29

B

Bachelard (1938)	187
Baird, (1986).....	30
Barrio, (2003).....	100
Bartholomew et al., (2004)	238
Becerra, (2004)	288
Bencze y Hodson, (1999).....	19
Benson y Viennot, (2004)	75
Bernal, (1967)	54
Black y Harrison, (2000).....	31, 349
Boorstin, (1994).....	54
Bransford et al., (2000).....	289
Bullejos, (1983)	152
Buty et al., (2004).....	82

C

Caamaño et al. (1998)	196
Cañas, et al., (1995).....	148
Carrascosa et al., (1993)	30
Carrascosa y Gil, (1992)	16
Carrascosa, (1983)	16
Carrascosa, (1985)	16

Carrascosa, (1987)	33, 288
Casadellà y Sanmartí, (1987)	25
Casado et al., (1998)	348

Ch

Chalmers, (1984)	34, 212
Chalmers, (1992)	212
Chauvet et al., (1999).....	149, 153, 216
Chauvet, (1996).....	270, 273
Chevalley, (1980).....	54

C

CLIS, (1987).....	21
Cobb, (2003)	33
Cohen, (1988).....	349
Colin y Viennot, (1998).....	140
Collis et al., (1998)	93, 107
Crombie, (1987).....	54

D

Dedes, (2005).....	45, 46, 49
Del Carmen y Jiménez, (1997).....	152
Descartes, (1637, ed. 1981).....	57, 61, 68
Domenech, (2000).....	288
Doménech, (2000).....	312
Driver et al, (1989).....	16
Driver et al., (2000).....	36
Driver y Oldham, (1986).....	21
Driver, (1986).....	18, 19
Driver, (1988).....	19
Driver, (1992).....	29
Duschl y Gitomer, (1991).....	22

E

Engel y Driver, (1986).....	22
-----------------------------	----

F

Feher y Rice, (1992) .	94, 120, 136, 138, 271
Fernández et al., (2002)	30

- Ferraz, (1974) 45, 48, 49, 50, 51, 53, 59, 70, 76, 112, 139
- Fleer, (1996)..... 16
- Fredette y Lochhead, (1981)..... 22
- Furió et al., (1987)..... 93
- Furió et al., (2000)..... 24
- Furió y Gil, (1978)..... 35
- G**
- Gabel, (1994) 34
- Galili et al., (1991)..... 113, 247
- Galili y Hazan, (2000a) 94, 107, 108, 118, 120, 124, 132, 133, 137, 138, 155, 224, 238, 243
- Galili y Hazan, (2000b) 94, 107, 132, 133, 155
- Galili, (1996)..... 16, 94, 108, 131
- García et al., (1995)..... 197
- Garrett et al., (1990)..... 33
- Gibson Y Chase, (2002) 29
- Gil del Río, (1984)..... 44, 47, 67
- Gil et al., (1988)..... 33
- Gil et al., (1989)..... 33
- Gil et al., (1991)..... 23, 26, 27
- Gil et al., (1999)..... 19, 20
- Gil et al., (2002)..... 20
- Gil y Carrascosa, (1985) 26
- Gil y Carrascosa, (1990) 288
- Gil y Carrascosa, (1994) 20, 288
- Gil y Martínez Torregrosa, (1983) 288
- Gil y Martínez Torregrosa, (1987) 29, 288
- Gil y Payá, (1988)..... 33, 288
- Gil y Pessoa, (1994)..... 33
- Gil, (1983)..... 19, 26
- Gil, (1993)..... 23, 287
- Gil, (2003)..... 27
- Gil, et al., (1991)..... 16
- Gil, Furió et al, (1999) 33, 35
- Goldberg et al., (1991) 61, 68, 254
- Goldberg y McDermott, (1986)..... 16, 123
- Goldberg y McDermott, (1987)..... 94, 130
- Guesne, (1989) 93, 107, 113, 115, 120, 130, 155
- Guisasola et al., (2004)..... 303
- Guisasola et al., (2006)..... 24
- Gunstone y Watts, (1989) 93
- H**
- Hand y Prain, (2002) 31
- Harlen, (1992)..... 19
- Hewson y Thorley, (1989) 22
- Hewson, (1981)..... 19
- Hewson, (1990)..... 123, 212
- Hierrezuelo y Montero, (1989)..... 16
- Hirn y Viennot, (2000) 153, 216, 289
- Hodson, (1985) 30, 75
- Hodson, (1988) 19
- Hodson, (1992) 27, 41
- Hoffman, (1984)..... 141
- Hogan y Maglienti, (2001), 302
- Hoyle, F., (1967) 75
- Huebner y Smith, (1994)..... 67, 109
- Huygens, C., (1690) 70
- I**
- Iizuka, (1983) 45, 52, 214
- J**
- James y Smith, (1985)..... 29
- Jiménez-Alexandre, (2000) 20
- Jorba, et al., (2000) 292
- K**
- Kaminski y Viennot, (1989)..... 16
- Kempa y Ayob, (1995)..... 29
- Kepler, (1604)..... 54, 55, 57
- Képler, (1604)..... 108, 112, 126
- Koch, (2001)..... 31
- Kuhn, (1971)..... 21, 71
- Küppers, (1992) 72, 137
- L**
- La Rosa et al., (1984) .16, 93, 107, 117, 119, 123, 138, 155
- Làndsberg, (1984)..... 70

- Leach y Scott, (2000).....24
- Leacht et al., (2002)20
- Lemke, (1997) 292, 303
- Lemke, (2001).....24
- Lijnse et al., (2004)20
- Linn, (1987) 29, 30
- LI**
- Llorens et al., (1989)25
- Llorens, (1988)25
- L**
- López-Gay, (2002)..... 288, 312
- M**
- Martínez Sebastiá, (2003)..... 312, 358
- Martínez Torregrosa et al., (1991).....24
- Martínez Torregrosa et al., (1993)..... 33, 35, 113, 123, 212
- Martínez Torregrosa et al., (1994).....33
- Martínez Torregrosa et al., (1999)..... 31, 33
- Martínez Torregrosa et al., (2002).....36
- Martínez Torregrosa et al., (2003).....33
- Martínez Torregrosa y Osuna, (1999)..... 107
- Martínez Torregrosa y Osuna, (2001).....16
- Martínez Torregrosa y Verdú, (1999) 163
- Martínez Torregrosa, (1987)..... 288
- Martínez-Sebastián, (2002)..... 288
- Mason, (1985) 46, 70
- Matthews, (1994).....93
- Méheut y Psillos, (2004) 8
- Mihás y Andreadis, (2005)44, 222
- Millar, (1989).....19
- Mohapatra et al., (1995)..... 107
- Monk y Osborne, (1997)34
- Monk, (1991)..... 107
- N**
- National Research Council, (2001)7, 168, 212
- Newton et al., (1999).....36
- Newton, (1704).....57, 61, 71, 72
- Nolen, (2003)30
- Novak, (1988)15, 289
- O**
- Osborne et al, (2003)..... 31
- Osborne et al., (1993)..... 16, 93, 107
- Osborne et al., (2003)..... 30, 238
- Osborne et al., (2004).....292, 297, 303
- Osborne y Wittrock, (1983) 16, 19
- Osborne y Wittrock, (1985) 19, 20
- Osuna, (2001)..... 16
- Otero, (1985) 35
- P**
- Payá, (1991)..... 33, 288
- Perales y Nievas, (1989)100
- Perales y Nievas, (1990)107
- Perales, (1987)151, 155
- Perales, (1994)155
- Pérez y Juncos, (1987)138
- Pérez Landazabal et al., (1987).....125, 133
- Pfundt y Duit, (2004) 16
- Piaget, (1970)..... 15
- Posner et al., (1982) 19, 21
- Pozo et al., (1991)..... 23
- Pozo, (1999)..... 19
- Prain et al., (2003) 31
- Puey y Carcavilla, (1995) 107, 116, 125, 128, 134
- R**
- Raftopoulos et al., (2005) 72
- Resnick, (1983)..... 19
- Rice y Feher, (1987)107
- Rivas, (1986)..... 30, 31
- Rodríguez y Escudero, (2000) 29
- S**
- Salinas y Sandoval, (1994)..... 94, 107, 139
- Salinas y Sandoval, (1997).....110
- Saltiel y Viennot, (1985) 43
- Sanmartí, (2002).....36
- Sanz, (1993) 72, 275
- Saxena, (1991)117, 124, 138
- Saxena, (1996) 93
- Schaverien y Cosgrove, (1999) 19

- Schaverien y Cosgrove, (2000) 19, 20
 Selley, (1996a)..... 16, 93
 Selley, (1996b)..... 16, 93, 107, 108, 112
 Shuell, (1987) 22
 Shymanky et al., (1993) 23
 Solbes y Zacaes, (1993) 128
 Solís y Sellés, (2005)..... 44, 49, 270
 Solomon, (1987)..... 25, 29
 Stinner, (1995)..... 19
- T**
- Tarásov y Tarásova, (1985) 52, 111
 Toulmin, (1977)..... 21
- V**
- Valdés et al., (2004)..... 20
 Vázquez, (1990) 128
 Verdú et al., (2001)..... 288
 Verdú et al., (2002)..... 33
 Verdú, (1990) 33
- Verdú, (2004)..... 7, 288, 290, 308
 Verdú, (2005)..... 358
 Viennot et al., (2004) 217, 246
 Viennot y Chauvet, (1997)... 89, 93, 118, 212
 Viennot y Kaminski, (1991)..... 94, 133
 Viennot, (1976) 16
 Viennot, (2002) 94
- W**
- Wandersee et al., (1994)..... 16, 17, 26, 41
 Westfall, (1996)..... 70, 270
 White et al., (1989)..... 289
 White y Gunstone, (1989) 22
- Y**
- Yager y Penick, (1986)..... 29
 Yore et al., (2002)..... 30
- Z**
- Zoller, (1999)..... 19

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO, J. A. (1993). Actitudes hacia el aprendizaje de las ciencias físicas, naturales y matemáticas en BUP y COU. Un estudio sobre tres dimensiones. *Enseñanza de las Ciencias*, nº extra, 14-14.

JIMENEZ-ALEXAINDRE, M.P., RODRIGUEZ, A.B., DUSCHL, R.A., 2000. Doing the lesson or 'doing science': argument in high school genetics, *Science Education* ,84(6), pp. 757-792.

ALONSO, M., (1994). *La evaluación en la enseñanza de la Física como instrumento de aprendizaje*. Tesis doctoral. Universitat de València.

ALONSO, M. GIL, D. Y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., (1992a). Los exámenes de Física en la enseñanza por transmisión y en la enseñanza por investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (2), 127-138.

ALONSO, M. GIL, D. Y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., (1992b). Concepciones espontáneas de los profesores de Ciencias sobre la evaluación: Obstáculos a superar y propuestas de replanteamiento. *Revista de Enseñanza de la Física*, 5 (2), 18-38.

ALONSO, M. GIL, D. Y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., (1996). Evaluar no es calificar. La evaluación y la calificación en una enseñanza constructivista de las ciencias. *Investigación en la Escuela*, 30, 15-26.

ANDERSSON, B. y BACH, F., (2004). On Designing and Evaluating Teaching Sequences Taking Geometrical Optics as a Example. *Science Education*, publicado online en Willey interScience (www. Interscience.wiley.com). 1-23.

ANDERSSON, B. y KARRQUIST, C., (1983). How Swedish aged 12-15 years, understand light and its properties. *European Journal of Science Education*, 5 (4), 387-402.

ANTÓN, J.L., et al., (1994). *Ciencias de la Naturaleza (Física y Química)*. 3º ESO. (Editex: Madrid).

ARISTÓTELES, 1993. *Parva Naturalia*. (Alianza: Madrid).

ARNOLD, M. y MILLAR, R., (1996). Learning the scientific "story": a case study in the teaching and learning of elementary thermodynamics. *Science Education*, 80 (3), 249-281.

AUSUBEL, D. P., (1978). *Psicología educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. (Trillas: Mexico).

BACHELARD, G., (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. (Vrin: Paris).

BAIRD, J., (1986). Improving learning through enhanced metacognition. A classroom study. *European Journal of Science Education*. 8 (3), 263-282.

BARRIO, J., (2000) *Física. 2º curso de Bachillerato*. (Oxford: Navarra).

BECERRA, C., (2004). *La enseñanza de la mecánica newtoniana con una estructura problematizada en el primer curso universitario*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

BARTHOLOMEW, H., OSBORNE J., RATCLIFFE M., 2004, teaching students "ideas-about-science": Five dimensions of effective practice. *Science Education* 88, 655-682.

BENCZE, L. y HODSON, D. (1999). Changing Practice by Changing Practice: Toward More Authentic Science and Science Curriculum Development. *Journal of Research in Science Teaching*. 36 (5), 521-539.

BENSON U. Y VIENNOT L., 2004, Using models at mesoscopic scale in teaching physics: two experimental interventions in solid friction and fluid statics, *International Journal of Science Education* 26(9), 1083-110.

BERNAL, J.D., (1967). *Historia social de la ciencia (volumen I)*. (Península: Barcelona).

BLACK, P. y HARRISON, C. (2000). Formative Assessment, en Monk, M. y Osborne, J. (eds). *Good Practice in Science Teaching. What research has to say*. 25-40. (Open University Press: Buckingham).

BOORSTIN, D.J., (1994). *Los descubridores. La naturaleza*. (RBA: Barcelona).

- BRANSFORD, J., BROUWN, A. y COCKING, R. (eds.) (2000). *How People Learn: Brain, Experience and School* (Expanded edition), NRC (National Academy Press). (en www.nap.edu)
- BULLEJOS, J., 1983. Análisis de actividades de textos de Física y Química de 2º de BUP. *Enseñanza de la Ciencias*, 6 (1), 19-29.
- BUTY, C., TIBERGIEN, A. y LE MARECHAL, J-F., (2004). Learning hypotheses and an associated tool to design and to analyse teaching-learning sequences. *International Journal of Science Education*, 26 (5), 579-605.
- CARRASCOSA, J., (1983). Errores conceptuales en la enseñanza de la física y química: una revisión bibliográfica. *Enseñanza de las Ciencias*, 1 63-65.
- CARRASCOSA, J., (1985). Errores conceptuales en la enseñanza de la física y química: una revisión bibliográfica. *Enseñanza de las Ciencias* 3(3), 230-234.
- CARRASCOSA, J., (1987). *Tratamiento didáctico en la enseñanza de las ciencias de los errores conceptuales*. Tesis Doctoral (Servei de Publicacions de la Universitat de València: València).
- CARRASCOSA, J. y GIL, D., (1992). Concepciones alternativas en Mecánica, *Enseñanza de las Ciencias*, 10(2) 113-120.
- CARRASCOSA, J., FERNÁNDEZ, I., GIL, D. y OROZCO, A., (1987). Análisis de algunas visiones deformadas sobre la naturaleza de la ciencia y las características del trabajo científico, *Enseñanza de las Ciencias*, nº extra (IV Congreso), 43-44.
- CASADELLÀ, J., y SANMARTÍ, N., (1987). L'ensenyament del concepte de força i especialment del de força de gravetat, *Enseñanza de las Ciencias*, 5(1), 53-58.
- CASADO, A., PRIETO, L. Y ALONSO, J. (1999). El tamaño del efecto de la diferencia entre dos medias: ¿estadísticamente significativo o clínicamente relevante? *Medicina Clínica (Barcelona)*, 112, 584-588.
- CHALMERS, A., (1984). *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?* (Siglo XXI: Madrid).
- CHALMERS, A., (1992). *La ciencia y como se elabora*. (Siglo XXI: Madrid).
- CHAUVET, F., (1996). Teaching colour: design and evaluation of a sequence. *European Journal of Teacher Education*, 19 (2), 119-134.
- CHAUVET F., HIRN, C. y VIENNOT, L., (1999). Investigation on teacher transformations when implementing teaching strategies. European project: Science teacher training in an information society (European commission DG XII contract SOE2 CT97 2020).

CHEVALLIE, C. (1980). *Kepler. Les fondements de l'optique moderne. Introducción y notas a la traducción de Paralipomènes a Vitellion*. (Vrin: París).

CLIS (CHILDRENS'S LEARNING IN SCIENCE PROJECT), (1987). *CLIS en the Classroom Approaches to Teaching. The Particulate Theory of Matter*, Centre for Studies in Science and Mathematics Education, University of Leeds, Leeds.

COBB, P., CONFREY, J., DISESSA, A., LEHRER, R., & SCHAUBLE, L. 2003. Design experiments in educational research, *Educational Researcher*, 32(1), pp. 9-13.

COHEN, J. (1988). *Statistical power analysis for behavioural sciences*. (Academic Press: Nueva York).

COLIN, P. y VIENNOT, L., (1988). Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualisation cohérente de la diffraction et l'image optique. *Didaskalia*, 17, 29-54.

COLLIS, K.F., JONES, B.L., SPROD, T., WATSON, J.M., y FRASER, S.P., 1998. Mapping development in students' understanding of vision using a cognitive structural model. *International Journal of Science Education*, 20 (1), 45-66.

CROMBIE, A.C., 1996. *Historia de la ciencia: De San Agustín a Galileo (I)*. (Alianza: Madrid).

DEDES, C., (2005). The Mechanism of Vision: Conceptual Similarities between Historical Models and Children's Representations. *Science Education*, 14, 699-712.

DEL CARMEN, L. y JIMÉNEZ, M.P., 1997. Los libros de texto: un recurso flexible. *Alambique*, 11, 7-14.

DESCARTES, R., 1981. *Discurso del método, Dióptrica, Meteoros y Geometría*. (Alfaguara: Madrid).

DOMENECH, J. L., (2000). *L'ensenyament de l'energia en l'educació secundària. Anàlisi de les dificultats i una proposta de millora*. Tesis doctoral. Universitat de València.

DRIVER, R. y OLDHAM, V., (1986). A constructivist Approach to Curriculum development in Science. *Studies in Science Education*, 13, 105-122.

DRIVER, R., (1986). Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las Ciencias*, 4 (1), 3-16.

DRIVER, R., (1988). Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículum en ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(2), 109-120.

DRIVER, R., (1992). *Una visión constructivista del aprendizaje y sus implicaciones en la enseñanza de las Ciencias*. Ponencia presentada en el encuentro Investigación y Desarrollo del Currículum en la Enseñanza de las Ciencias, (CIDE: MEC).

DRIVER, R., GUESNE, E., y TIBERGHUIEN, A. (1989). *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. (Morata: Madrid).

DRIVER, R., NEWTON, P. y OSBORNE, J., (2000). Establishing of scientific argumentation in classrooms. *International Journal of Science Education*, 22 (4) 287-312.

DUSCH, R.A. y GITOMER, D.H. (1991). Epistemological perspectives on conceptual change: implications for educational practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 28 (9), 839-858.

ENGELS, E. y DRIVER, R., (1986). A study of consistency in the use of students' conceptual frameworks across different task contexts. *Science Education*, 70 (4), 473-496.

FEHER, E. y RICE, K., 1992. Children's conceptions of color. *Journal of Research in Science Teaching*. 29 (5), 505-520.

FERNÁNDEZ, I., GIL, D., CARRASCOSA, J., CACHAPUZ, A. y PRAIA, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitida por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20 (3), 477-488.

FERRAZ, A., 1974. *Teorías sobre la naturaleza de la luz. De Pitágoras a Newton*. (Dossat: Madrid).

FLEER, M. (1996). Early learning about light: mapping preschool children's thinking about light before, during and after involvement in a two week teaching program. *International Journal of Science Education*, 18 (7), 819-836.

FREDETTE y LOCHHEAD, (1981). Students conceptions of electric cur. *The Physics Teacher*, 18, 194-198.

FURIÓ, C., HERNÁNDEZ, J. y HARRIS, H., 1987. Parallels between adolescents' conception of gasses and the history of Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 64 (7), 617-618.

FURIÓ, C., AZCONA, R., GUIASOLA, J., y DOMINGUEZ, C. (2000). La enseñanza y el aprendizaje del conocimiento químico, 421-449 en Perales y Cañal (eds), *Didáctica de las Ciencias Experimentales*. (Marfil: Alcoy).

FURIÓ, C., y GIL, D. (1978). *El programa-guía: Una propuesta para la renovación de la didáctica de la Física y Química*. (ICE de la Universidad de Valencia).

GABEL, D.L. (ed), (1984). *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (McMillan Pub Co: NY)

GALILI, I. y HAZAN, A., (2000^a). Learners' knowledge in optics: interpretation structure and analysis. *International Journal of Science Education*, 22 (1), 57-88.

GALILI, I y HAZAN, A. (2000^b). The influence of historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis. *Physics Education Research (a supplement to the American Journal of Physics) Supplement 1*, 68 (7), 3-15.

GALILI, I., (1996). Student's conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, 18 (7), 847-868.

GALILI I., GOLDBERG, F. y BENDALL S., 1991. Some reflections on plane mirrors and images. *The Physics Teacher*, october, 471- 477.

GARCÍA, J et al. (1995),. *Física y Química 4º ESO* (McGraw-Hill: Madrid).

GARRET, R., SATTERLY, D., GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J. (1990). Turning exercises into problems: an experimental study with teachers in training. *International Journal of Science Education*, 12 (1) 1-12.

GIBSON, H. L. y CHASE, C. (2002). Longitudinal impact o fan inquirí-based science program on middle school students' attitudes toward science. *Inc. Science Education*. 693-705. (www.interscience.wiley.com)

GIL DEL RÍO, E., (1984). *Óptica fisiológica clínica*. (Toray: Barcelona).

GIL, D., y CARRASCOSA, J. (1985). Science learning as a conceptual and methodological change. *European Journal of Science Education*, 7 (3), 231-236.

GIL, D., y CARRASCOSA, J. (1990). What to do about science "misconceptions". *Science Education*, 74 (5), 531-540.

GIL, D., y CARRASCOSA, J. (1994). Bringing pupils' learning closer to a scientific construction of knowledge: a permanent feature in innovations in science teaching. *Science Education*, 78 (3), 301-315.

GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J. (1983). A model for problem-solving in accordance with scientific methodology. *European Journal of Science Education*, 5 (4), 447-455.

GIL, D. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J. (1987). Los programas-guía de actividades: una concreción del modelo constructivista de aprendizaje de las ciencias. *Investigación en la Escuela*, 3, 3-12.

GIL, D., y PAYÁ, J., (1988). Los trabajos prácticos de Física y Química y la metodología científica. *Revista de Enseñanza de la Física*, 2(2), 73-79.

GIL, D., y PESSOA, A., (1994). *Formación del profesorado de las ciencias*. (Editorial Popular: Madrid).

GIL, D., (1983). Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 1 (1), 26-33.

GIL, D., (1993). Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(2), 197-212.

GIL, D. 2003, Constructivism in science education: the need for a clear line of demarcation. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselves, E. Hatzikraniotis, G. Fassouloupoulos & M. Kallery (eds.) *Science Education in the knowledge-based society* (Dordrecht: Kluwe Academic Publisher).

GIL, D., CARRASCOSA, J., DUMAS-CARRÉ, A., FURIÓ, C., GALLEGO, R., GENÉ, A., GONZÁLES, E., GUIASOLA, J., MARTÍNEZ-TORREGROSA, J., PESSOA, A. M., SALINAS, J., TRICÁRICO, H. y VALDÉS, P., (1999) ¿Puede hablarse de consenso constructivista en la educación científica? *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (3), 503-512.

GIL, D., CARRASCOSA, J., FURIO, C. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J. (1991). *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria*. (Horsori: Barcelona).

GIL, D., FURIO, C., et al. (1999) ¿Tiene sentido seguir distinguiendo entre aprendizaje de conceptos, resolución de problemas de lápiz y papel y realización de prácticas de laboratorio? *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (2), 311-320.

GIL, D., GUIASOLA, J., et al. (2002). Defending Constructivism in Science Education. *Science Education*, 11, 557-571.

GIL, D. MARTÍNEZ TORREGROSA, J., y SENENT, F. (1988). El fracaso en la resolución de problemas: una investigación orientada por nuevos supuestos. *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (2), 131-146.

GIL, D. MARTÍNEZ TORREGROSA, J, y VERDÚ, R. (1989). La introducción de conceptos, modelos y teorías en los textos de Física. *Enseñanza de las Ciencias*, nº extra (tomo 1), 203-204.

GOLDBERG, F. y McDERMOTT, L., (1986). Student difficulties in understanding image formation by plane mirror. *The Physics Teacher*, 24, 472-480.

GOLDBERG, F. y McDERMOTT, L., 1987. An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal Physics*, 55 (2), 108-119.

GOLDBERG, F.; BENDALL S. y GALILI I., 1991. Lens, Holes, Screens and eye. *The Physics Teacher*, abril, 221-224.

GUESNE, E. (1989). La luz. En Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. *Ideas científicas en la infancia y adolescencia (Cap. 2)*. (Madrid: Morata).

Guisasola J., Almudí J.M. y Zubimendi J.L., 2004, Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university, *Science Education* 88(3), 443-464

Guisasola, J., Ceberio, M. y Zubimendi, J.L., 2006, University students' strategies for constructing hypothesis when tackling paper-and pencil task in physics, *Research in Science Education* 36(3), 163-186.

- GUNSTONE, R. y WATTS, M., (1989). Fuerza y movimiento. En Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. *Ideas científicas en la infancia y adolescencia (Cap. 5)*. (Madrid: Morata).
- HAND, B, y PRAIN, V. (2002). Teachers implementing writing-to-learn strategies in junior secondary science: a case study. *Science Education*, 86, 737-755. (www.interscience.wiley.com).
- HARLEN, W. (1992). Research and development, structuring of learning and science education: where are we now? *International Journal of Science Education*, 24 (4), 343-356.
- HEWSON, p.w., y THORLEY, N. R. (1989). The conditions of conceptual change. *International Journal of Science Education*, 11, nº monográfico, 541-553.
- HEWSON, P.W., (1981). A conceptual change approach to learning science. *International Journal of Science Education*, 8 (3), 229-249.
- HEWSON, P.W., 1990. Enseñanza de "fuerza y movimiento" como cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 8 (2), 157-171.
- HIERREZUELO, J. y MONTERO, A. (1989). *La ciencia de los alumnos. Su utilización en la didáctica de la Física y Química*. (Laia: Barcelona).
- HIRN, C. y VIENNOT, L., 2000. Transformation of didactic intentions by teachers: the case of geometrical optics in grade 8 in France. *International Journal of Science Education*, 22 (4), 357-384.
- HODSON, D., (1985). Philosophy of science, science and science education. *Studies in Science Education*, 12, 25-57.
- HODSON, D., (1988). Towards a philosophically more valid curriculum. *Science Education*, 72 (1), 19-40.
- HODSON, D., (1992). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*, 15 (5), 541-566.
- HODSON, D., (1996). Practical work in school science: exploring son direction for change. *International Journal of Science Education*, 18 (7), 755-760.

HOGAN y MAGLIENTI, (2001). Comparing the epistemological underpinnings of students' and scientists' reasoning about conclusions. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(6), 663-687.

HOYLE, F. (1967). *Astronomía*. Barcelona: Ediciones Destino.

HUEBNER, J.S. y SMITH, T.L., 1994. Why magnification works. *The Physics Teacher*, 32, 102-103.

HUYGENS, C. (1690). *Traite de la lumiere*. Edición de Culture et Civilisation de 1967. Bruxelles

IIZUKA K., 1983. *Engineering Optics*. (Board, Springer series: Berlin).

JAMES y SMITH, (1985). Alienation of students from science in grades 4-12. *Science Education*, 69, 39-45.

JORBA, J., GÓMEZ, I., PRAT, A., (2000). *Hablar y escribir para aprender*. ICE de la Universidad Autónoma de Barcelona. (Síntesis: Madrid),

KAMINSKI, W. y VIENNOT, L., 1989. Optique élémentaire. *Enseñanza de las Ciencias, número extra III Congreso*, 2, 230-232.

KEMPA, R. F. y AYOB, A. (1995). Learning from group work in science. *International Journal of Science Education*, 17 (6), 743-754.

KEPLER, J. (1980). *Les fondaments de l'optique moderne. Paralipomènes a Vitellion (1604)*. (Vrin: París).

KOCH, A. (2001). Training in metacognition and comprehension of physics texts. *Science Education*, 85, 758-768.

KUHN, T.S., 1971. *La estructura de las revoluciones científicas*. (Fondo de Cultura Económica: Mexico).

KÜPPERS, H., 1992. *Fundamentos de la teoría de los colores*. (Gili: México).

LA ROSA, C.; MAYER, M.; PATRIZI, P. y VICENTINI-MISSONI, M., (1984). Commonsense knowledge in optics: Preliminary results of an investigation into the properties of light. *European Journal Science Education*, 6 (4), 387-397.

LÀNDSBERG, G.S., (1984). *Óptica*. (Mir:Moscú).

LEACH, J., y SCOTT, PH. (2000). Children's thinking, learning and constructivism, 41-56, en Monk y Osborne (eds). *Good Practice in Science Teaching*. (Open U. Press: Buckingham).

LEACH J. & SCOTT P., 2002. Designing and evaluating and evaluating science teaching sequences: an approach drawing upon the concept of learning demand and a social constructivist perspective on learning, *Studies in Science Education*, 38, pp. 115-142.

LEMKE, J.L., (1997) *Aprender a hablar ciencia. Lenguaje, aprendizaje y valores*. (Paidós: Barcelona).

LEMKE, J. L., (2001). Articulating Communities: Socio-cultural Perspectives on Science Education. *Journal of Research Science Teaching*, 38 (3), 296-316.

LIJNSE, P. & KLAASSEN, K., 2004. Didactical structures as an outcome of research on teaching-learning sequences?, *International Journal of Science Education*, 26(5), pp. 537-554.

LINN, M. C., (1987). Establishing a research base for a science education: challenges, trends and recommendations. *Journal of Research Science Teaching*, 24 (3), 191-216.

LLORENS J., A., DE JAIME, M. C., y LLOPIS, R. (1989). La función del lenguaje en un enfoque constructivista del aprendizaje de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 7 (2), 111-119.

LLORENS, J. A. (1988). Aprendizaje de la química y empleo del lenguaje. *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (2), 195-197.

LÓPEZ-GAY, R. , (2002). *La introducción y utilización del concepto de diferencial en la enseñanza de la Física: análisis de la situación actual y propuesta para su mejora*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.

MARTÍNEZ SEBASTIÁN, B. (2002). *La enseñanza/aprendizaje del modelo Sol-Tierra. Análisis de la situación actual y propuesta de mejora para los futuros profesores de primaria*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J., (1987). *La resolución de problemas de Física como investigación: un instrumento de cambio metodológico*. Tesis doctoral. Universitat de València.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J., DOMENECH, J.L. y VERDÚ, R., 1993. Del derribo de ideas al levantamiento de puentes: la epistemología de la ciencia como criterio organizador de la enseñanza en las ciencias física y química. *Curriculum*, 7, 67-89.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J., LÓPEZ-GAY, R., GRAS, A. y TORREGROSA GIRONÉS, G. (2002). La diferencial no es un incremento infinitesimal. Evolución del concepto de diferencial y su clarificación en la enseñanza de la física. *Enseñanza de las Ciencias*. 20 (2), 271-283.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J., GIL, D., y MARTÍNEZ SEBASTIÁN, B. (2003). La universidad como nivel privilegiado para un aprendizaje como investigación orientada, en MONERO, C. Y POZO, J.L (eds). *La Universidad ante la nueva cultura educativa*. (Síntesis: Madrid).

MARTÍNEZ TORREGROSA, J. OSUNA, L. y VERDÚ, R. 1999. La luz y la visión en la Enseñanza Secundaria Obligatoria. *Educación Abierta. Aspectos didácticos de Física y Química. Física 8*, 69-101.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J. y OSUNA, L., 2000. Light and vision: epistemological and conceptual teaching-barriers in high school. *International Conference on Physics Education: "Physics Teacher Education beyond 2000"*. Barcelona, 214.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J, y OSUNA, L. (2001). Planificación de una unidad didáctica sobre "la luz y la visión". *Enseñanza de las Ciencias*, nº extra VI Congreso, 219-220.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J., y VERDÚ, R., GIL, D. (1999). La evaluación en una enseñanza de la Física como construcción de conocimientos. *Educación Abierta, 140 aspectos didácticos de Física y Química*, 8, 69—101. Zaragoza: ICE U. Zaragoza.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J, CLIMENT, D., VERDÚ, R. (1994). Investigando/comprendiendo la naturaleza, 12/16. *Alambique*,1, 105-112.

MARTÍNEZ TORREGROSA, J., ALONSO, M., CARBONELL, F., CARRASCOSA, J., DOMENECH, J.L., DOMENECH, A., A., OSUNA, L., SENDRA, F. y VERDÚ, R., (1991). *La búsqueda de la unidad en la naturaleza. Ciencias de la Naturaleza. Educación Secundaria Obligatoria..* (Valencia: Conselleria de Cultura, Educació i Ciència).

MARTÍNEZ TORREGROSA, J., LÓPEZ-GAY, R., GRAS, A., TORREGROSA GORONÉS, G., (2002). La diferencial no es un incremento infinitesimal. Evolución del concepto de diferencial y su clarificación en la enseñanza de la física. *Enseñanza de las Ciencias*20(2), 271-283.

MASON, S.F., (1985). *Historia de las Ciencias. Tomo II: La revolución científica de los siglos XVI y XVII.* (Alianza: Madrid).

MATTHEWS, M.R., (1994). Historia, filosofía y enseñanza de las ciencias: la aproximación actual. *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (2), 255-277.

MÉHEUT, M.(2004). Designing and validating two teaching-learning sequences about particle model. *International Science of Science Education*, 26(5), pp: 605-618.

MEHEUT, M., y PSILLOS, D., (2004). Teaching-learning sequences. Aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, 26(5), 515 – 535.

MIHAS, P. y ANDREADIS, P., 2005. A Historical Approach to the Teaching of the Linear Propagation of Light, Shadows and Pinhole Cameras. *Science Education*, 14, 675-697.

MILLAR, R., (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, 11, 587-596.

MOHAPATRA, J. K. y PARIDA, B.,K., (1985). The location of alternative conceptions by concep graph technique. *International Journal of Science Education*, 17 (5), 663-681.

MONK, M. y OSBORNE, J., (1997). Placing the History an Philisophy of Science on the Curriculum: A Model for the Development of padagogy. *Science Education*, 8 (14), 405.

MONK, M., 1991. Genetic epistemological notes on recent research into children's understanding of light. *International Journal of Science Education*, 13 (3), 255-270.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, (2001). *Scientific Inquiry in Education.* (National Academy Press: Washington, DC)

NEWTON, I., (1704). *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz* (edición 1977). (Alfaguara: Madrid).

NEWTON, P., DRIVER, R. y OSBORNE, J., (1999). The place of argumentation in the pedagogy of school science. *International Journal of Science Education*, 21 (5), 553-576.

NOLEN, S. B., (2003). Learning environment, motivation, and in achievement High School Science. *Journal Research. Science Teaching*, 40, 347-368.

NOVAK, J., D. (1988). Constructivismo humano: un consenso emergente. *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (3), 213-223.

OSBORNE, J. F., BLACK, P., MEADOWS, J. y SMITH, M., (1993). Young children's (7-11) ideas about light and their development. *International Journal of Science Education*, 15 (1), 83-93.

OSBORNE J., COLLINS S., RATCLIFFE M., MILLAR R. y DUSCHL R., 2003, What "ideas-about-science" should be taught in school science? A delphy study of the expert community, *Journal of Research in Science Teaching* 40(7), 692-720.

OSBORNE, J. F., ERDURAN, S. y SIMON, S., (2004). Enhancing of Quality of Argumentation in School Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 41 (10), 994-1020.

OSBORNE, R. y WITTRICK, M.C., (1983). Learning Science: a generative process. *Science Education*, 67 (4), 489-508.

OSBORNE, R. y WITTRICK, M.C., (1985). The generative learning model and its implications for science education. *Studies in Science Education*, 12, 59-87.

OSBORNE, R. SIMONS, S. y COLLINS, S. (2003). Attitudes towards science: a review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25 (9), 1049-1079.

OSUNA, L., (2001). La planificación de una estructura problematizada para la enseñanza de la "luz y la visión" en la ESO. Análisis de la relevancia de los objetivos propuestos y de los obstáculos previsibles. Trabajo de investigación de Tercer Ciclo. Universidad de Valencia.

OTERO, J., (1985). Assimilation problems in traditional representation of scientific knowledge. *European Journal of Science Education*, 7 (4), 361-369.

PAYÁ, J., (1991). *Los trabajos prácticos de Física y Química: un análisis crítico y una propuesta fundamentada*. Tesis doctoral. Universitat de València.

PERALES, F.J. y NIEVAS, F., 1989. Misconceptions on geometric optics and their association with relevant educational variables. *International Journal of Science Education*, 11 (3), 273-286.

PERALES, F.J. y NIEVAS F., 1990. *Un enfoque constructivista en la enseñanza de la óptica geométrica*. (Granada: ICE Universidad de Granada).

PERALES, F.J., 1987. Análisis de contenidos en óptica geométrica. *Enseñanza de las Ciencias*, 5 (3), 211-219.

PERALES, F.J., 1994. Enseñanza de la óptica. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 1, 133-137.

PÉREZ DE LANDAZABAL, M.C. y JUNCOS DEL EGIDO, P., 1987. Exploración de las ideas previas sobre la luz en los alumnos de BUP. *Enseñanza de las Ciencias, número extra*, 278-279.

PFUNT, H. y DUIT, R., (2004). *Bibliography-Students' alternative Frameworks and Science Education*. Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften: Kiel-Alemania. (www.unikiel.de/aktuell/stcs/bibint.html).

PIAGET, J., 1970. *La epistemología genética*. (Barcelona: A. Redondo).

POSNER, G.J., STRIKE, HEWSON y GERTZOG, (1982). Accommodation of a scientific conception: towards a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211-227.

POZO, J. I. , SANZ, A., GÓMEZ, M.A., y LIMÓN, M., (1991). Las ideas de los alumnos sobre la ciencia: una interpretación desde la psicología cognitiva. *Enseñanza de las Ciencias*, 9 (1), 83-94.

POZO, J. I. (1999). Más allá del cambio conceptual: el aprendizaje de la ciencia como cambio representacional. *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (3), 513-520.

PRAIN, v., HAND, B. y YORE, L. (2003). Learning from writing in secondary science: a case study of students' comparing strategies, 163-171. En *Science Education Research in the Knowledge- Base Society*.

PUEY, M.L. y CARCAVILLA, A., 1995. Alternativas en la introducción de conceptos de óptica en BUP y COU. *Educación Abierta. Aspectos didácticos de Física y Química. Física 6*, 43-85.

RAFTOPOULOS, A., KALYFOMMATOU, N. y CONSTANTINO, C. (2005). The Properties and the Nature of Light: the Study of Newton's Work and the Teaching of Optics. *Science Education*, 14, 649-673.

RESNICK, L. B., (1983). Mathematics and Science Learning: a new conception. *Science*, 220. 477-478.

RICE, K. y FEHER, E., (1987). Pinholes and images: children's conceptions of light and vision I. *Science Education*, 71 (4), 629-639.

RIVAS, M., (1986). Factores de eficacia escolar: una línea de investigación didáctica. *Bordón*, 284, 693-708.

RODRÍGUEZ, L. M. y ESCUDERO, T. (2000). Interacción entre iguales y aprendizaje de conceptos científicos. *Enseñanza de las Ciencias*, 18 (2), 255-274.

SALINAS, J. y SANDOVAL, J., (1994). Filtros de colores y teorías intuitivas sobre color y visión. *Revista Española de Física*, 8 (4), 27-30.

SALINAS, J. y SANDOVAL, J., (1997). Óptica y Visión: hacia un aprendizaje más integrado. *Revista Española de la Física*, 11 (1), 38-43.

SALTIEL, E. y VIENNOT, L., 1985. ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), 137-144.

SANMARTÍ, N., (2002). *Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria*. Madrid: Síntesis Educación.

SANZ, J.C., 1993. *El libro del color*. (Madrid: Alianza).

SAXENA, A.B., 1991. The understanding of properties of light by students in India. *International Journal of Science Education*, 13 (3), 283-289.

SCHAVERIEN, L. COSGROVE, M. (1999). A biological basis for generative learning in technology and science. Part I: A theory of learning. *International Journal of Science Education*, 21 (12), 1223-1235.

SCHAVERIEN, L. COSGROVE, M. (2000). A biological basis for generative learning in technology and science. Part II: Implications for technology and science education. *International Journal of Science Education*, 22 (1), 13-35.

SELLEY, N.J., (1996a). Towards a phenomenography of light and vision. *International Journal of Science Education*, 18 (7), 837-846.

SELLEY, N.J., (1996b). Children's ideas on light and vision. *International Journal of Science Education*, 18 (6), 713-723.

SHUELL, T. J., (1987). Cognitive psychology and conceptual change: implications for teaching science. *Science Education*, 71 (2), 239-250.

SHYMANKY, J. A. et al., (1993). A study of changes in middle school teachers' understanding of selected ideas in science as function of an in-service program focusing on student preconceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, 30, 737-755.

SOLBES, J. y ZACARES, J., 1993. La óptica en la enseñanza secundaria. *Enseñanza de las Ciencias, número extra IV congreso*, 285-286.

SOLÍS, C y SELLÉS, M., (2005). *Historia de la Ciencia*. (Espasa: Madrid).

SOLOMON, J., (1987). Social influences on the construction of pupils' understanding of science. *Studies in Science Education*, 14, 63-82.

STINNER, A. (1995). Contextual sitting, science stories, and large context problems: toward a more humanistic science education. *Science Education*, 79 (5), 555-581.

TARÁSOV, L. y TARÁSOVA, A., (1985). *Charlas sobre la refracción de la luz*. (Mir: Moscu).

TOULMIN, S., (1997). *La comprensión humana. I: el uso colectivo y la evolución de los conceptos*. Madrid: Alianza.

VALDÉS, P., GIL, D., VILCHES, A. y MARTÍNEZ TORREGROSA, J., (2004). ¿Qué entendemos por constructivismo en enseñanza de las ciencias?, 398-413, en

Didáctica de las Ciencias. Nuevas Perspectivas. Colectivo de autores IPLC. Ed. Pueblo y Educación: La Habana-Cuba.

VAZQUEZ, A., (1990). Concepciones alternativas de Física y Química de bachillerato: una metodología diagnóstica. *Enseñanza de las Ciencias*, 8 (3), 251-258.

VERDÚ, R., (1990). *La estructura de los temas y la introducción de conceptos y modelos en la Enseñanza de la Física. Análisis de textos habituales.* (Tesis de Master). Universitat de València. València.

VERDÚ, R. (2004). *La estructura problematizada de los temas y cursos de Física y Química como instrumento de mejora de su enseñanza y aprendizaje.* Tesis doctoral. Universitat de València.

VERDÚ, R., MARTINEZ TORREGROSA, J , (2001). La estructura de los temas como problemas: primeros resultados. *Enseñanza de las Ciencias*, Número extra, VI Congreso, 227-228.

VERDÚ, R., MARTINEZ TORREGROSA, J y OSUNA, L. (2002). Enseñar y aprender en una estructura problematizada. *Alambique*, 34, 47-55.

VIENNOT, L. (1976). *Le Raisonnement Spontané en Dynamique Élémentaire.* Tesis doctoral. Université de Paris. (publicada en 1979 por Herman:París).

VIENNOT, L., CHAUVET, F., COLIN, P. y REBMANN, G. (2004). Designing Strategies and Tools for Teacher Training: The Role of Critical Details, Example in Optics. publicado online in Wiley InterScience. (www.interscience.wiley.com).

VIENNOT, L. y CHAUVET, F., (1997). Two dimensions to characterize research-based teaching strategies: examples in elementary optics. *International Journal of Science Education*, 19 (10), 1159-1168.

VIENNOT L. y KAMINSKY, W., (1991). Participation des maîtres aux modes de raisonnement des élèves. *Enseñanza de las Ciencias*, 9 (1), 3-9.

VIENNOT, L. (2002) . *Razonar en física. La contribución del sentido común.* Madrid: Ed. Antonio Machado.

VAN ZEE, E. H., HAMMER, D., PATRICIA ROY, M. B. y PETER, J., (2005). Learning and Teaching Science as Inquiry: A Case Study of Elementary School Teachers' Investigations of Light. *Wiley InterScience*. (www.interscience.wiley.com)

WANDERSEE, J. H., MINTZES, J. J. y NOVAK, J.D. (1994). Research on alternative conceptions in science, 177-210. En Gabel D. L. (ed), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, A project of the National Science Teachers Association (McMillan Pub Co: New York).

WESTFALL, R.S., 1996. *Isaac Newton: una vida*. (Cambridge: Organización Editorial de la Universidad de Cambridge).

WHITE, T. R. y GUNSTONE, F., R. (1989). Meta-learning and conceptual change. *International Journal of Science Education*, 11, 577-586.

YAGER, R. E., y PENICK, J. E., (1986). Perception of four groups towards science classes, teachers and value of science. *Science Education*, 70 (4), 353-363.

YORE, L. D., HAND, B. y PRAIN, V., (2002). Scientists as writers. *International Science Education*, 672-692. (www.interscience.wiley.com).

ZOLLER, U. (1999). Scaling-up of Higher-Order Cognitive Skills-Oriented College Chemistry Teaching: An Action Oriented Research. *Journal of Research Teaching*, 36 (5), 583-596