

# Investigación sobre un experimento destinado a enseñar los límites de los modelos geométrico y ondulatorio de la óptica

Research on an experiment intended to teach the limits of the geometrical and wave models of optics

REVISTA  
DE  
ENSEÑANZA  
DE LA  
FÍSICA

Emanuel A. Benatti<sup>1,2</sup>, Lucas A. Giraudo<sup>1</sup> y Flavio J. Pricco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Superior General San Martín, Universidad Nacional de Rosario, Ayacucho 1667, CP 2000, Rosario. Argentina.

<sup>2</sup>Taller de Investigación en Didáctica de la Ciencia y la Tecnología. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Avda. Pellegrini 250, CP 2000 Rosario. Argentina.

E-mail: lucas.a.giraudo@gmail.com

## Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de una investigación sobre una secuencia didáctica destinada a explicar los límites del modelo geométrico de propagación de la luz, previo al abordaje formal del modelo ondulatorio. La secuencia propuesta, que incluyó la realización de una actividad práctica, se llevó a cabo con un grupo de estudiantes de nivel superior y la metodología de investigación empleada fue la ingeniería didáctica. La actividad consistió en la observación, con un instrumento óptico, de dos fuentes luminosas puntuales cuya separación se fue variando de modo tal que en ciertas ocasiones la distancia entre ellas se encontraba por encima del límite de resolución del instrumento, mientras que, en otras, por debajo. Estas observaciones permitieron a los estudiantes comprobar que el modelo de rayos es insuficiente para explicar la formación de imágenes en estos dispositivos, siendo necesario emplear un modelo distinto para analizar la situación. La secuencia propuesta fue bien recibida por los estudiantes y los resultados iniciales prometedores, aunque su implementación no fue suficiente para transformar, en algunos alumnos, las concepciones alternativas respecto del concepto de resolución y su vínculo con el modelo ondulatorio de propagación de la luz.

**Palabras clave:** Enseñanza de la Óptica; Enseñanza basada en modelos; Ingeniería didáctica.

## Abstract

This paper presents the results of an investigation on a didactic sequence intended to explain the limits of the geometric model of light propagation, prior to the formal approach of the wave model. The proposed sequence, which included the realization of a practical activity, was carried out with a group of higher level students and the research methodology used was didactic engineering. The activity consisted in the observation, with an optical instrument, of two specific light sources whose separation was varied in such a way that on certain occasions the distance between them was above the resolution limit of the instrument, while in others, below. These observations allowed the students to verify that the ray model is insufficient to explain the imaging in these devices, being necessary to use a different model to analyze the situation. The proposed sequence was well received by the students and the initial results were promising, although its implementation was not enough to transform, in some students, the alternative conceptions regarding the concept of resolution and its link with the wave model of light propagation.

**Keywords:** Optics teaching; Model-based teaching; Didactic Engineering.

## I. INTRODUCCIÓN

El estudio de los fenómenos ópticos comienza normalmente con el modelo geométrico de la luz, en el que se considera que ésta se propaga en forma de rayos que son desviados durante los procesos de reflexión y refracción. Sin embargo, ciertos fenómenos, ej., difracción e interferencia, no se pueden explicar satisfactoriamente con este modelo, por eso se debe considerar la naturaleza ondulatoria de la luz para describirlos. La transición del modelo geométrico al modelo ondulatorio puede realizarse de varias maneras (Colin y Viennot; 2001), sin embargo, independientemente del enfoque que se adopte, es sabido que los estu-

diantes tienen problemas para conectar ambos modelos, y distinguir los límites de aplicación de cada uno cuando se presentan situaciones límite (Colin y Viennot; 2001; Viennot, 2003; Maurines, 2010).

En este trabajo se exponen los resultados de una investigación sobre una secuencia didáctica, basada en la realización de observaciones con un instrumento óptico, que brinda a estudiantes de un curso de óptica del nivel superior la oportunidad de comprobar los límites del modelo geométrico a la hora de tratar la formación de imágenes de objetos que se encuentran muy cerca entre sí o bien muy lejos del instrumento.

La actividad experimental consistió en la observación, con un instrumento óptico, de dos fuentes luminosas puntuales cuya separación se fue variando de modo tal que en ciertas ocasiones la distancia entre ellas se encontraba por encima del límite de resolución del instrumento, mientras que, en otras, por debajo.

Se intenta enseñar a partir de este trabajo experimental, que el modelo geométrico no puede dar cuenta del límite de resolución de un instrumento y que éste sólo puede ser explicado satisfactoriamente a partir del modelo ondulatorio de la luz, que es introducido formalmente luego de realizada la experiencia.

El trabajo describe el marco teórico que sustenta la elaboración de la secuencia didáctica, el método de investigación empleado para evaluar su eficacia, los detalles de la secuencia y su implementación y finalmente los resultados obtenidos al aplicarla con un grupo de alumnos.

## II. MARCO TEÓRICO

El modelado es uno de los procesos esenciales en la producción, validación y difusión del conocimiento científico. Es por ello que diferentes investigadores han hecho énfasis en la importancia de una educación científica basada en modelos como forma de estimular la comprensión de la ciencia (Gilbert y otros, 2000; Clement y Rea-Ramírez, 2008; Erduran, 2001).

Esta educación científica basada en modelos puede concebirse como una empresa conjunta entre estudiantes y docentes que implica la reconstrucción de modelos científicos y su utilización para comprender los fenómenos naturales estudiados.

En este sentido, Justi y Gilbert (2002) plantean que este proceso de modelado en el ámbito de la educación en ciencias puede abordarse como un proceso creativo que involucra las siguientes etapas: adquisición de información sobre la entidad a modelar, elaboración de un modelo mental, expresión de ese modelo en un modo de representación adecuado, comprobación (vía experimentos mentales y empíricos) y evaluación de su alcance y limitaciones.

En el caso de la enseñanza de la óptica, rama de la física que involucra diferentes modelos, el diseño e implementación de estrategias didácticas en esta línea puede representar un desafío para docentes y estudiantes dado que, para la comprensión de ciertos fenómenos, la elección del modelo a utilizar puede no ser sencilla y requiere no sólo del conocimiento de los conceptos y leyes en las que se basa sino que también es fundamental considerar la correspondencia del mismo con el fenómeno en estudio así como sus límites de aplicación (Viennot, 2003).

Analizar estos aspectos de los modelos adquiere especial relevancia en el estudio de la formación de imágenes en instrumentos ópticos, puesto que en ciertas situaciones resulta necesario recurrir a dos modelos diferentes, a saber, el modelo geométrico basado en el principio de Fermat, y el modelo ondulatorio basado en el principio de Huygens-Fresnel.

Por un lado, el modelo geométrico o “de rayos” permite predecir con suficiente exactitud y de manera relativamente sencilla, propiedades de la imagen como su posición y tamaño, así como también el aumento del instrumento.

Sin embargo, cuando se estudia la formación de imágenes en instrumentos ópticos de alta magnificación, en los que los distintos puntos del objeto a observar se encuentran muy cerca entre sí o muy lejos del objetivo del instrumento, debe considerarse adicionalmente otro aspecto de su funcionamiento: la posibilidad que brinda de distinguir los detalles más finos del objeto observado, esto es, su resolución.

En estas situaciones el efecto de la difracción, no contemplado por el modelo de rayos, resulta apreciable y determina el límite de resolución del instrumento, haciendo necesario aplicar el modelo ondulatorio.

Las consideraciones hasta aquí expuestas, fundamentan la necesidad de abordar el estudio de la formación de imágenes en instrumentos ópticos mediante secuencias didácticas que brinden a los estudiantes la oportunidad de reconocer los alcances y limitaciones del modelo de rayos y la necesidad de incorporar el modelo ondulatorio para el estudio de estos sistemas.

### III. METODOLOGÍA

El trabajo aquí presentado corresponde a una investigación que implicó la concepción, realización, observación y análisis de una secuencia de enseñanza, proceso llevado a cabo siguiendo la metodología propuesta por la Ingeniería Didáctica (ID).

Según Michèle Artigue (1989), esta metodología de investigación puede ser equiparable con el trabajo del ingeniero quien, para realizar un proyecto determinado, se basa en los conocimientos científicos de su dominio y acepta someterse a un control científico, pero al mismo tiempo, está obligado a trabajar sobre objetos mucho más complejos que los de la ciencia, y por tanto puede abordar problemas que la ciencia no puede tomar a su cargo todavía.

Desde su origen, la ingeniería didáctica está fundamentalmente ligada a las intervenciones didácticas (experimentaciones) en las clases, es decir:

*...trata el diseño y evaluación de secuencias de enseñanza fundamentadas teóricamente, con la intención de provocar la emergencia de determinados fenómenos didácticos, al tiempo que se logra elaborar recursos para la enseñanza científicamente experimentados.* (Godino y otros, 2013, p. 7)

Si bien esta metodología fue diseñada originalmente para su aplicación en el ámbito de la didáctica de la matemática, sus presupuestos no son ajenos a la física y existen antecedentes de su aplicación a la investigación en la didáctica de esta (Farina, 2016; Fernández y otros, 2018).

En línea con lo propuesto por Artigue (1989), este estudio se estructura en las siguientes fases: a) análisis preliminar; b) análisis *a priori* de la situación didáctica; c) experimentación; d) análisis *a posteriori* y validación.

El análisis preliminar consiste en un conjunto de estudios que incluyen el análisis de la enseñanza tradicional y sus efectos, el análisis de las concepciones de los estudiantes, el análisis del campo de restricciones donde se sitúa la realización didáctica efectiva y finalmente los objetivos de la investigación.

El análisis *a priori* implica la concepción, en cuanto a estructura, forma y dimensión, de la estrategia a implementar, así como la identificación de las variables involucradas y los medios o herramientas requeridas para el logro de los objetivos. En esta instancia, se escogen los instrumentos de observación y se definen las variables a observar en cada registro.

La experimentación consiste en la realización de la propuesta didáctica, respecto de la cual se describen aspectos como el lugar, el curso curricular, los alumnos, la duración, los momentos, la organización y la dinámica desarrollada, entre otros.

A la fase de realización de la propuesta le sigue una de análisis *a posteriori* efectuado a partir del registro de datos obtenidos mediante instrumentos como observaciones de las secuencias de enseñanza, cuestionarios y entrevistas individuales aplicadas en distintos momentos de la experimentación, etc.

Finalmente, la confrontación de los dos análisis, el *a priori* y *a posteriori*, permite una validación interna de las hipótesis formuladas en la investigación.

### IV. LA INVESTIGACIÓN

#### A. Análisis preliminar

##### A.1. Análisis de la enseñanza tradicional y sus efectos

En la enseñanza de la Óptica, tanto en el nivel medio como en el superior, el estudio de la formación de imágenes en sistemas ópticos comienza generalmente con la introducción del modelo geométrico con el que se enseña el trazado de rayos para determinar la posición y tamaño de las imágenes, y en una etapa posterior del trayecto educativo, se aborda el modelo ondulatorio donde se estudia la difracción de la luz en sistemas constituidos por aberturas de distintas formas y disposición.

La enseñanza de estos modelos usualmente se concreta de manera formal, es decir, se introducen los conceptos y relaciones propias de cada uno y se aplican en la resolución de situaciones problemáticas estándar, sin explicitar su naturaleza modélica ni discutir las condiciones para su aplicación; es frecuente que los contenidos se trabajen de manera predominantemente expositiva en clases de pizarra.

Tampoco suele destinarse tiempo a la aplicación de los conceptos mediante actividades prácticas que involucren algún sistema óptico concreto, sean estos sistemas concebidos con fines didácticos, como bancos ópticos, o instrumentos de uso profesional, como telescopios, microscopios u otros.

En este contexto, rara vez se diseñan y ponen en práctica secuencias didácticas tendientes a la articulación de ambos modelos, entendiendo a éstas como aquellas que brindan la oportunidad de explicitar sus límites de aplicación y por lo tanto discutir y analizar criterios para su elección a la hora de aplicarlos.

Vale aclarar que en el caso particular de la institución en la que se desarrolló la investigación, los modelos geométrico y ondulatorio se estudian en espacios curriculares diferentes. Como es usual en estos casos, la compartimentación de los contenidos naturaliza y refuerza la no articulación de los modelos en cuestión.

En síntesis, la enseñanza tradicional genera que los estudiantes incorporen una concepción incompleta y difusa de los modelos de rayos y ondulatorio, que los conduce a una aplicación mecánica de los mismos en el espacio curricular que “corresponde”, sin lograr una articulación que les permita comprender de manera integrada la formación de imágenes en instrumentos ópticos concretos.

## **A.2. Concepciones de los estudiantes sobre los modelos de la óptica**

El resultado de numerosas investigaciones (Grosslight y otros, 1991; Cartier, 2000; Manassero y Vázquez, 1999) indica que la mayoría de los estudiantes no tiene claro qué son los modelos, sus características, sus funciones y limitaciones. Entre las diversas concepciones que los alumnos sostienen acerca de la naturaleza de los modelos, fueron identificadas y resultan relevantes para esta investigación las siguientes:

- Los estudiantes conciben a los modelos como: (a) copias de la realidad, (b) algo real, pero a otra escala, (c) un ejemplo o caso ejemplar, (d) algo exacto que no contiene “errores”, (e) un cúmulo de hechos a ser memorizados, (f) una entidad visual (dibujo, diagrama).
- Los estudiantes afirman que un modelo es mejor cuanto más se asemeja a lo que representa.
- Desconocen que distintos modelos pueden referirse a un mismo fenómeno, enfatizando en diferentes aspectos del mismo.
- Tienen dificultades en identificar los modelos que les fueron enseñados.

En lo que respecta específicamente a los modelos de la óptica, resultados de investigaciones sobre cómo razonan post-instrucción los estudiantes de nivel medio y superior (Colin y Viennot; 2001; Viennot, 2003; Maurines, 2010), evidencian que el dominio de los principios y conceptos del modelo ondulatorio resultan dificultosos.

A esas dificultades, y a deficiencias en la enseñanza tradicional de esos temas, puede atribuirse la marcada tendencia, que se observa en muchos estudiantes, a relacionar el concepto de imagen únicamente con el modelo geométrico, es decir, a asumir que la difracción y la formación de imágenes son dos fenómenos excluyentes, lo que da lugar a concepciones erróneas como la idea, ampliamente difundida, de que se puede mejorar el nivel de detalle observable de un objeto (resolución) incrementando el aumento del instrumento utilizado.

## **A.3. Análisis de restricciones**

En el desarrollo tradicional de las asignaturas en las que se enmarca este trabajo, el tiempo destinado a la realización de actividades prácticas es relativamente escaso, por lo que la implementación de la secuencia en cuestión implicó recortar o posponer el desarrollo de algunos contenidos.

A diferencia de lo que sucede con la resolución de los problemas estándar que suelen trabajarse en clase, en los que la teoría describe con exactitud las situaciones planteadas, en el trabajo experimental aparece la necesidad de considerar las limitaciones del modelo e identificar las fuentes de incerteza involucradas en las mediciones, actividades que pueden presentar cierta dificultad para estudiantes noveles en este tipo de trabajos.

Además, debido al escaso número de trabajos prácticos que se realizan, los alumnos carecen de la formación adecuada en prácticas de mediciones y tratamiento de incertezas, y poseen poca experiencia en la confección de informes de laboratorio.

## **A.4. Objetivos de la investigación**

En base a lo antes considerado, se diseñó e implementó una secuencia didáctica que, a partir de la realización de una actividad de observación con un instrumento óptico, permita a los estudiantes reconocer las limitaciones del modelo de rayos y la necesidad de incorporar el modelo ondulatorio para el estudio de estos de sistemas.

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar si dicha estrategia destinada a la articulación de los modelos, aporta a una mejor comprensión de la formación de imágenes en instrumentos ópticos por parte del alumnado.

## B. Análisis *a priori*

### B.1. Concepción de la propuesta

Durante el cursado previo de la carrera, los estudiantes habrían trabajado, en distintas asignaturas, el modelo geométrico clásico de propagación de la luz. En particular, abordaron de manera tradicional el estudio de los fenómenos de reflexión y refracción, los conceptos de distancia focal y el trazado de rayos para distintos sistemas ópticos.

Al momento de hacer la actividad, los estudiantes estarán empezando a trabajar con el modelo ondulatorio de la luz, sin haber estudiado el fenómeno de difracción en aberturas. En este contexto se planificará una actividad que consiste en realizar observaciones de fuentes puntuales empleando un instrumento óptico. Las fuentes puntuales se ubicarán siempre a la misma distancia del instrumento, pero a diferentes distancias entre sí, y los estudiantes, al observar con el instrumento, registrarán si es posible resolver las fuentes o no. La distancia entre fuentes se reducirá hasta que el instrumento no permita su resolución. Luego, los estudiantes contrastarán los resultados observados con lo predicho por el criterio de Rayleigh y elaborarán conclusiones.

La comprensión de los conceptos trabajados se evaluará a partir de exámenes de opción múltiple y elaboración de informes sobre la actividad, en donde los estudiantes deberán reportar los instrumentos y procedimientos empleados para realizar cada medición, así como los resultados de las mismas. El examen de opción múltiple será individual y no influirá en la evaluación formal. Los informes tampoco influirán directamente en la promoción y aprobación de las materias, y se realizarán grupalmente.

En conjunto con el examen de opción múltiple se realizará una encuesta de valoración de la actividad, la secuencia didáctica planteada y su importancia en la formación profesional. También se realizarán entrevistas personales a una parte de los estudiantes, de modo de complementar la información obtenida en las encuestas.

Es importante mencionar que las encuestas de valoración, la evaluación de opción múltiple y la situación problemática se realizarán de manera anónima.

### B.2. El diseño de la secuencia didáctica

El desarrollo de la secuencia se proyectó en cuatro instancias, en dos de las cuales se trabajarían cuestiones conceptuales y procedimentales necesarias para las mediciones que realizarían, mientras que en las otras dos se llevarían a cabo actividades prácticas de reconocimiento, medición y observación con un instrumento óptico. Las actividades previstas para cada instancia fueron:

*Primera Instancia. Presentación y descripción del instrumento a utilizar:* en el primer encuentro de la secuencia se presenta el instrumento con el que se realizarán las observaciones. Durante esta instancia se espera que los estudiantes inspeccionen, manipulen y realicen diversas observaciones con el instrumento con el fin de familiarizarse con su funcionamiento y operación.

*Segunda Instancia. Clase sobre mediciones:* se repasan los conceptos de medición y de magnitud física, haciendo énfasis en el concepto de incerteza y su importancia en el proceso de medición y comunicación de resultados. Se discuten además las diferentes fuentes de incerteza que podrían afectar a las mediciones a realizar, así como los criterios para propagar incertezas en mediciones indirectas.

*Tercera Instancia. Clase sobre resolución de un sistema óptico:* el trabajo durante el tercer encuentro de la secuencia se centra en el modelo ondulatorio, concretamente, en presentar el fenómeno de difracción de la luz proveniente de fuentes puntuales en distintas aberturas. A partir de ello, la exposición se concentra en la difracción en aberturas circulares tales como el objetivo de telescopios y microscopios, fenómeno que limita el poder de resolución de dichos instrumentos. Asimismo, se abordan cuestiones relevantes para la comprensión del tema, como la distribución de irradiancia observada en el plano imagen de estos sistemas cuando el patrón se proyecta en una pantalla situada en el mismo (disco de Airy), el concepto de resolución de fuentes y el criterio de Rayleigh que normalmente se utiliza para cuantificar el límite de resolución de instrumentos ópticos.

*Cuarta Instancia. Realización experimental, actividad con el instrumento:* en esta instancia se observan, con un instrumento óptico, dos fuentes luminosas puntuales ubicadas a una distancia adecuada del mismo. Manteniendo la distancia entre las fuentes luminosas y el instrumento, se colocan las fuentes luminosas a una cierta distancia entre sí, y observando se registra si las fuentes se resuelven o no. Las observaciones se repiten, acercando cada vez más a las fuentes, hasta que es imposible resolverlas, es decir, se alcanza el límite de resolución.

### C. Realización de la propuesta didáctica

La secuencia se llevó a cabo con dieciséis estudiantes que habían trabajado con el modelo de rayos, que se encontraban estudiando el modelo ondulatorio y estaban prontos a estudiar el fenómeno de difracción.

Para la actividad experimental, los estudiantes trabajaron en grupos de cuatro integrantes, como instrumento óptico se utilizó un telescopio refractor con el que cuenta la institución, y se emplearon dos lámparas LED ubicadas a unos 85m del telescopio como fuentes luminosas.

Paralelamente a esta actividad, y como experiencia vinculada al modelo de rayos, se determinó la potencia de un telescopio newtoniano, determinando el lugar de formación de la imagen de la luna llena, que funcionó como objeto que se encuentra en “el infinito”.

Para el desarrollo de las actividades se destinaron 300 minutos distribuidos de la siguiente manera:

- Primer encuentro: 60 minutos
- Segundo encuentro: 60 minutos
- Tercer encuentro: 60 minutos
- Cuarto encuentro: 120 minutos

Al finalizar la actividad, se solicitó a cada grupo la presentación de un informe en el que comuniquen los resultados de sus mediciones. La entrega del informe se pautó para la semana siguiente. La evaluación de la actividad, que consistió en presentar a los estudiantes un cuestionario, se llevó a cabo una semana después de la realización del trabajo práctico con los telescopios.

### D. Análisis *a posteriori* (resultados)

#### D.1. Logros observados

*Valoración de los estudiantes.* El 75% de los estudiantes consideró que la propuesta los ayudó a mejorar la comprensión de la relación existente entre el fenómeno de difracción y la resolución de un telescopio, y el mismo porcentaje consideró útiles los contenidos dados previamente a la hora de abordar la actividad.

En cuanto a cómo valoraron los estudiantes el trabajo con telescopios, el 56% disfrutó trabajar y manipular el telescopio para determinar sus características, mientras que el 38% manifestó interés en seguir trabajando con telescopios luego de realizar esta actividad. En este sentido, el 75% consideró que la actividad aportó a su conocimiento de las características constructivas y de funcionamiento de un telescopio.

Respecto a consideraciones más generales, el 63% consideró que la actividad contribuyó significativamente a su formación profesional, mientras que el 44% consideró que puede trasladar los aprendizajes realizados gracias a la actividad a otros instrumentos.

La valoración que hicieron los estudiantes acerca de la relevancia de cada una de las instancias de la propuesta, las instancias de presentación del telescopio y observación fueron las mejor puntuadas, con promedios de 7,5 y 7,8 puntos sobre 10, y desvíos alrededor de la media 1,6 y 1,3, respectivamente. Las clases de incertezas y resolución, tuvieron una puntuación un poco más baja, con promedios de 6,9 y 6,5, ambas con desvíos alrededor de la media de 2,1. Finalmente, la parte de la actividad peor puntuada fue la de elaboración del informe, con una nota promedio de 6 puntos, con un desvío de 1,5 puntos.

En las entrevistas realizadas individualmente a algunos estudiantes, se manifestaron satisfechos con la actividad realizada, tanto con la secuencia didáctica planteada como con su implementación y consideraron que debía incorporarse al currículo. En particular, todos valoraron positivamente el haber realizado una actividad en la que se visualicen las consecuencias del fenómeno de difracción en un instrumento concreto antes de trabajar con el tema formalmente.

En cuanto a críticas y posibles cambios, los estudiantes consideraron que el trabajo en los informes debía realizarse en grupos más reducidos, y que debía dedicarse más tiempo a la instancia experimental.

*Informes.* Los informes fueron presentados en tiempo y forma, respetando el formato solicitado. La metodología experimental se encuentra explicada de manera completa y clara, lo que parece indicar que los contenidos procedimentales fueron transmitidos de manera adecuada. A su vez, las determinaciones de las distancias focales con su incerteza y del límite de resolución se realizaron correctamente.

#### D.2. Objetivos no alcanzados

Respecto a la resolución del telescopio, si bien el 75% de los estudiantes retuvo la idea de que está determinada por la apertura del instrumento y por la longitud de onda de la luz incidente, un 44% considera que el límite de resolución está determinado tanto por el objetivo como por el ocular del telescopio, mien-

tras que el 31% respondió correctamente que es sólo el objetivo el que determina el límite de resolución. El 25% restante considera que ni el ocular ni el objetivo determinan la resolución del telescopio.

En cuanto a los informes, si bien las mediciones están realizadas y expresadas correctamente, se observa que los estudiantes no discuten en sus trabajos la relación entre el límite de resolución determinado a partir del criterio de Rayleigh y la constatación experimental de dicha resolución. Tampoco expresan, a pesar de tener las herramientas para hacerlo, el límite angular de resolución con su incerteza.

Cabe mencionar que en los informes también se pidió a los estudiantes comunicar la distancia focal de uno de los telescopios utilizados para realizar las observaciones, y en este caso, los estudiantes sí expresaron el valor con su correspondiente incerteza. Esto puede deberse a que la propagación de incertezas involucradas en determinar el límite de resolución es más compleja matemáticamente que la involucrada en la determinación de la distancia focal; otra posibilidad es que, por las características del procedimiento empleado para determinar el límite de resolución del telescopio, a los estudiantes les sea más difícil interpretar cómo las incertezas directas que están involucradas en la determinación del límite de resolución afectan a dicha magnitud.

## V. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

La enseñanza basada en modelos permitió a los estudiantes comprender los conceptos físicos tratados más allá de la resolución mecánica de problemas. Para lograr efectivamente esto, se precisó no sólo definir y formular los diferentes modelos que existen para analizar un fenómeno, sino que fue necesario enfatizar cuáles son los límites de cada modelo y trabajar aquellas situaciones en las que un modelo deja de ser efectivo para describir un fenómeno, y se torna imprescindible emplear otro.

En este sentido, y para favorecer la construcción, por parte de los estudiantes, de la noción de límite de modelo, el trabajo experimental brindó posibilidades que las clases expositivas tradicionales no dan, sobre todo cuando se trabaja con estudiantes que aún no poseen una formación sólida en matemáticas.

En este contexto se decidió trabajar el fenómeno de difracción de una abertura circular invirtiendo la secuencia didáctica tradicional, mostrando primero cómo el modelo de rayos deja de ser una construcción adecuada para comprender la formación de imágenes de objetos muy cercanos entre sí o muy lejanos del instrumento de observación, para luego introducir el modelo ondulatorio de la luz con el que se puede explicar la existencia de un límite de resolución para estos dispositivos.

A este fin, se utilizó como instrumento un telescopio newtoniano, lo que por un lado hizo a la experiencia muy atractiva a los alumnos, aunque obligó a colocar las fuentes luminosas a una gran distancia del instrumento. La situación experimental se hubiera simplificado si en lugar de usar un telescopio, que posee una gran abertura, se hubiese empleado un instrumento de menor resolución, como un antejo de Galileo, lo que hubiera permitido trabajar con distancias menores como el laboratorio, el aula o un pasillo de la escuela.

Esta secuencia fue considerada positiva por el alumnado, tanto en el aspecto emotivo como en el formativo, lo que constituye para nosotros un incentivo adicional para continuar refinando y ampliando este tipo de propuestas.

No obstante, aún después del trabajo experimental, persisten en algunos estudiantes ciertas concepciones alternativas acerca de las causas del límite de resolución y las características instrumentales que lo definen, por lo que consideramos que la secuencia didáctica implementada, al menos en su concepción actual, aunque beneficiosa, no es suficiente para superar, por sí sola, estas dificultades.

## REFERENCIAS

Artigue, M. (1989). Une recherche d'ingénierie didactique sur l'enseignement des équations différentielles en premier cycle universitaire. *Cahiers du Séminaire de Didactique des mathématiques et de l'informatique*. Grenoble: IMAG-LSD.

Cartier, J. (2000). Assessment of explanatory models in genetics: insights into students' conceptions of scientific models. Report n° 98-1. University of Wisconsin- Madison.

Clement, J.J. y Rea-Ramirez, M.A. (2008). *Model Based Learning and Instruction in Science*. Dordrecht: Springer.

Colin, P. y Viennot, L. (2001). Using two models in optics: Students' difficulties and suggestions for teaching. *American Journal of Physics*, 69(S1).

- Erduran, S. (2001). Philosophy of Chemistry: An emerging field with implications for chemistry education. *Science and Education*, 10(6),581-593.
- Farina, J.A. (2016). Análisis de una intervención didáctica en el nivel universitario básico para la enseñanza de la entropía. *Revista de Enseñanza de la Física*. 28 (1),7-20.
- Fernández F., Laura R., Colombo G., Farina J. y Jardón A. (2018). Ingeniería didáctica en el diseño de trabajos prácticos de laboratorio. *Revista de Enseñanza de la Física*. 30(Extra),73-81.
- Gilbert, J. K., Boulter, C.J. y Elmer, R. (2000). Positioning Models in Science Education and in Design and Technology Education. En J.K. Gilbert y C.J. Boulter (eds.), *Developing Models in Science Education*, (pp. 3-17). Dordrecht: Kluwer.
- Godino, J., Batanero, C., Contreras, Á., Castro, A., Lacasta, E. y Wilhelmi, M. (2013). La ingeniería didáctica como investigación basada en el diseño. Versión ampliada en español de la comunicación presentada en el CERME, [http://www.ugr.es/~jgodino/eos/JDGodino%20et%20al\\_2013%20Ingenieria%20didactica.pdf](http://www.ugr.es/~jgodino/eos/JDGodino%20et%20al_2013%20Ingenieria%20didactica.pdf) Sitio consultado en septiembre de 2016.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E. y Smith, C. (1991). Understanding models and their use in science: conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28, 9,799-822
- Justi, R. y Gilbert, J.K. (2002). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, implications for the education of modellers. *International Journal of Science Education*, 24(4),369-387.
- Manassero, M. y Vázquez, A. (1999). Ideas de los estudiantes sobre la epistemología de la ciencia: modelos, leyes y teorías. *Revista de Educación*, 320,309-334.
- Maurines, L (2010). Geometrical Reasoning in Wave Situations: The case of light diffraction and coherent illumination optical imaging. *International Journal of Science Education*, 32:14,1895-1926.
- Viennot, L. (2003). *Teaching Physics*. Paris: Springer.