

Evolución de las concepciones de los docentes sobre dualidad en la física cuántica

Evolution of teachers' conceptions about duality in quantum physics

Patricia E. Fernández¹, Eduardo M. González² y Jordi Solbes³

¹Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Argentina.

²Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

³Departamento de Didáctica de las Ciencias. Universitat de València. España

*E-mail: patricia@fceia.unr.edu.ar

Recibido el 23 de noviembre de 2020 | Aceptado el 15 de marzo de 2021

Resumen

Este estudio muestra los cambios de concepciones sobre el concepto de dualidad en física cuántica en un grupo de docentes, antes y después de un curso de capacitación. Se presentan diagramas de evolución como instrumento metodológico para analizar y visualizar resultados. Los diagramas de evolución muestran categorías iniciales y de llegada de las concepciones de los profesores, que participaron de una secuencia de enseñanza-aprendizaje basada en la discusión de los modelos clásicos de ondas y partículas, de sus límites de validez y de las contribuciones de cada uno al modelo actual de estructura de la materia, en que no se habla de ondas, ni partículas, sino de características diferentes a las de la física clásica.

Palabras clave: Dualidad en física cuántica; Evolución de conceptos; Enseñanza a través de modelos; Formación de profesores; Concepciones.

Abstract

This study shows changes in conceptions about the concept of duality in quantum physics in a group of teachers, before and after a training course. Evolution diagrams are presented as a methodological instrument for analyzing and visualizing results. The evolution diagrams show initial and arrival categories of the conceptions of teachers, who participated in a teaching-learning sequence based on the discussion of classic models of waves and particles, their validity limits and each one's contributions to the current model of structure of matter, in which there is no talk of waves, not particles, but of characteristics different from those of classical physics.

Keywords: Duality in quantum physics; Evolution of concepts; Teaching through models; Teacher training; Conceptions.

I. INTRODUCCIÓN

A. La enseñanza de la cuántica en los niveles medio y de formación docente

La intención de incluir los conceptos cuánticos desarrollados por la comunidad científica en el siglo pasado, en cursos de física de la enseñanza de nivel medio y de formación docente, es una realidad insoslayable como pone de manifiesto el meta análisis de Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman y Van Joolingen (2017). Ello se expresa como propuestas

también en el ámbito latinoamericano (Castrillón, Freire, y Rodríguez, 2014; Clavijo, Walteros y Cortés, 2019; Fanaro, Otero, y Elgue, 2016; González, 2015; Greca y Freire, 2003; Pereira, Ostermann, y Cavalcanti, 2009).

Estas tentativas reconocen múltiples razones: a) ofrecer una imagen más correcta de cómo se desarrolla la ciencia, b) porque la física cuántica (FQ) es necesaria para una interpretación adecuada de la estructura de la materia y la evolución de los fenómenos microscópicos e imprescindible para entender el mundo que nos rodea, c) asumir la creciente importancia de las aplicaciones de la física cuántica en nuestra sociedad (relaciones CTS) y, d) a nivel actitudinal, porque a los alumnos les interesan no solo las aplicaciones de la cuántica, sino también aspectos más teóricos, que les llaman la atención (Solbes y Sinarcas, 2010).

Las propuestas de reforma curricular que se han desarrollado en la Argentina en los años recientes para el nivel medio y el de formación docente en el contexto de la Ley Nacional de Educación 26206/06 también reflejan estas intenciones. En las provincias de Córdoba (2015) y de Buenos Aires (2015), el proyecto curricular de los profesorado de Física y de Química cubre una amplia temática y propone orientaciones actualizadas sobre la teoría cuántica. Mencionaremos a título de ejemplo un párrafo del diseño curricular de Córdoba que propone incluir:

Desarrollos científicos producidos durante el siglo XX en el campo de la física que han implicado un quiebre paradigmático en el tratamiento de los modelos físicos de la realidad, habilitando así la construcción de un cuerpo teórico de modelos más precisos que los ofrecidos, hasta entonces, por el paradigma de la mecánica newtoniana.

Los docentes formadores que trabajan en estos diseños insisten, con razón, en que se trata de un proceso complejo, de largo plazo, que afecta todos los niveles y cuyos efectos aún son muy incipientes. A la vez, debemos tener en cuenta que los actuales profesores desarrollaron estos temas durante el cursado de su carrera sin una intención cierta de una trasposición didáctica al nivel medio y, por lo tanto, sin mayores discusiones didácticas, siendo la profundización alcanzada no más que la requerida para pasar su examen. De tal modo, que sigue siendo válido pensar que la formación docente inicial para enseñar estos temas de FQ es insuficiente (Fernández, González, y Solbes, 1997 y 2005; Kalkanis, Hadzidaki y Stavrou, 2003, Sinarcas y Solbes, 2013).

B. Algunos problemas que plantea la enseñanza de la física cuántica

En el caso de los fenómenos cuánticos, los conceptos y modelos involucrados, están aún más alejados de las percepciones cotidianas que muchos tópicos de la física clásica, razón por la que su inclusión en el currículo no siempre ha sido bien vista por maestros y profesores partidarios de una enseñanza tradicional focalizada en los modelos clásicos (Oñorbe, 1996; Solbes, 1996).

Según algunas investigaciones (Kalkanis, Hadzidaki y Stavrou, 2003; Kragh, 2007; Solbes y Sinarcas, 2009), parece que una de las principales dificultades que tienen los estudiantes en el aprendizaje de la física cuántica es ontológica: tienen dificultades para comprender que los electrones, fotones, etc., no son ni ondas ni partículas clásicas, sino entidades nuevas y diferentes, con un comportamiento nuevo, el cuántico (Levy-Leblond, 2003).

Esta dificultad no es menor y ha estado presente a lo largo de la historia de la ciencia. Así lo expresa Feynman (1987) cuando dice:

Newton pensaba que la luz estaba compuesta de partículas, pero luego se descubrió que ésta se comporta como una onda. Más tarde sin embargo (a principios del siglo XX) se descubrió que la luz algunas veces se comporta verdaderamente como una partícula. Históricamente, por ejemplo, se creía que el electrón se comportaba como una partícula pero luego se pensó que, en algunos aspectos, lo hacía como una onda. Pero, en realidad, éste no se comporta como ninguna de ellas. Renunciando, diremos: 'No es como ninguna de las dos' [...] Sin embargo podemos decir algo más: los electrones se comportan exactamente como la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones, etc.) es el mismo para todos ellos. Todos son 'ondas de partículas' o como se quieran llamar.

También Bunge (1973) dice:

...el cuantón no es ni partícula clásica ni campo clásico sino una entidad sui generis que, en circunstancias extremas, se asemeja a una partícula y, en otras, a un campo [...] las teorías cuánticas deberían desembarazarse de aquellos análogos clásicos y reconocer que se ocupan de cosas sui generis que merecen un nuevo nombre genérico, digamos, cuantones...

Por su parte Auletta, Fortunato y Parisi (2009) afirman:

Los conceptos de partícula y onda son de origen clásico y representan los dos casos extremos de un espectro de comportamientos de los sistemas cuánticos. En la mecánica clásica, la aguda distinción entre estos dos conceptos está justificada por el hecho de que la materia y las ondas son consideradas y tratadas en un modo completamente diferente. Por el contrario, de acuerdo a la mecánica cuántica, la materia y las ondas son los dos lados de una misma moneda.

El abandono de las representaciones mentales de onda y partícula y su reemplazo por un modelo en el cual los entes cuánticos no responden a ninguno de ellos pero que a la vez sintetizan aspectos de ambos e incorporan otros completamente desconocidos clásicamente, como el espín, es un proceso largo y complejo y que ofrece gran resistencia. Este proceso es aún más difícil si no están claras previamente las propiedades atribuidas a cada modelo (onda o partícula) y, a la vez, se reconocen las limitaciones de las teorías existentes, los aspectos clásicos aún presentes en la nueva teoría, y los nuevos atributos necesarios para explicar el modelo cuántico. Ello es necesario, a su vez, para que este nuevo modelo se evidencie como más satisfactorio que el anterior (Posner et al., 1982).

En el caso de los estudiantes, la existencia de dificultades no superadas, de preconcepciones o visiones deformadas que persisten aún después del proceso de enseñanza aprendizaje de la física cuántica han sido señaladas por Solbes et al. (1988), Fischler y Lichtfeldt (1992); Petri y Niedderer (1998); Johnston, Crawford y Fletcher (1998); Greca y Freire (2003) entre otros. En ese sentido, los textos universitarios de física básica discuten en los capítulos de física moderna el problema de la radiación de cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico para presentar el comportamiento corpuscular de la luz, que clásicamente se consideraba como onda. Luego, en el apartado sobre De Broglie y la dualidad se explica la difracción de electrones a partir de un comportamiento ondulatorio de los mismos. Se mantienen así dos modelos independientes: “fotones de luz” que se comportan como partículas y “electrones” que se comportan como ondas, pero no enfatizan la construcción de un modelo nuevo y original en el que partículas y ondas son sólo aproximaciones que se pueden utilizar en algunos casos en que hay un gran número de cuantones. Otros libros destinados a la enseñanza de la física cuántica específicamente, se apegan a una matemática muy compleja distrayendo la atención de las discusiones epistemológicas de los conceptos físicos (Ohanian 1995).

En el nivel de profesorado, no se encuentran suficientes estudios en la literatura, que caractericen el pensamiento del profesor o que propongan alternativas de superación de estas dificultades (Solbes, Fernández y González, 2001). En ese sentido debería atenderse a las limitaciones de una formación inicial parcializada o fragmentada, donde resulta difícil comprender la idea de cambio paradigmático que se propone en los diseños curriculares y donde se desconocen muchas veces los desarrollos de la investigación educativa con relación a la enseñanza y aprendizaje de la física cuántica. Este estudio está centrado en enfrentar estas cuestiones, así como en el análisis de las evoluciones conceptuales de profesores en ejercicio.

C. La evolución de modelos

Según el National Committee on Science Education Standards and Assessment (1996):

Models are tentative schemes or structures that correspond to real objects, events, or classes of events, and that have explanatory power. Models help scientists and engineers understand how things work. Models take many forms, including physical objects, plans, mental constructs, mathematical equations, and computer simulations.

(Los modelos son esquemas o estructuras provisionales que se corresponden con objetos reales, situaciones o tipo de situaciones, y que tienen poder explicativo. Los modelos ayudan a los científicos e ingenieros a comprender cómo funcionan las cosas. Los modelos adoptan muchas formas, incluidos objetos físicos, planos, construcciones mentales, ecuaciones matemáticas y simulaciones por computadora). (p. 117)

Nersessian (1992 y 2002) a su vez, resalta la importancia de recurrir al uso de analogías, imágenes y simulaciones como estrategias para elaborar modelos en la enseñanza de la ciencia. Su propuesta se basa en la investigación “histórico cognitiva” sobre el modo en que razonaban los grandes científicos de la historia, para quienes los modelos ya vigentes eran el punto de partida para la explicación de nuevos fenómenos.

Los modelos son utilizados como explicación esquemática y sencilla de fenómenos que, de otra manera, requerirían una descripción complicada. Los docentes formados en el manejo de estos instrumentos son capaces de emplear diferentes modelos simultáneamente, reconociendo las virtudes y limitaciones de cada uno y aplicándolos adecuadamente (Ireson, 2000; Brookes y Etkina, 2007).

Sin referirse específicamente a la física cuántica, diversos autores se proponen trabajar sobre el cambio conceptual a partir de la evolución de modelos. En este sentido Clement (2000, 2008) propone la co-construcción de modelos entre el estudiante y el docente partiendo de modelos conocidos y de las propias ideas de los estudiantes, para evolucionar hacia modelos validados pudiendo recorrer modelos híbridos intermedios. Por su parte Vosniadou (2000 y 2013), en sucesivos estudios, enfatiza la importancia de los conocimientos previos, del diálogo del docente con el estudiante, del tratamiento de problemas y de la búsqueda o reconocimiento de modelos para favorecer el cambio conceptual y el aprendizaje significativo.

Esta evolución o transformación conceptual desde los modelos explicativos de la física clásica a los de la cuántica, en particular en lo concerniente a la sustitución de los modelos de materia y radiación por un nuevo modelo de objetos cuánticos, del determinismo clásico por una interpretación probabilística o de la localización espaciotemporal por

relaciones de indeterminación y superposición de estados, entre otros conceptos., es uno de los principales objetivos de la enseñanza de la cuántica y, por tanto, de la formación del profesorado.

En el contexto de este trabajo, llamamos “representaciones” o “concepciones” a los modelos descritos por los docentes durante la investigación. Son modelos intermedios en el sentido de Clement (2000) que sin ser los establecidos y consensuados por la comunidad científica se aproximan a ellos. Son las representaciones que habitualmente profesores y alumnos atribuyen a los modelos vigentes. No se trata simplemente de alterar modelos que muchas veces no se conocían, sino que deben cambiarse de categoría a los conceptos involucrados en el sentido de la idea de cambio ontológico de Chi (1992).

Después de haber diagnosticado, a partir de la bibliografía antes mencionada y de nuestras propias investigaciones, las dificultades enfrentan los docentes que se proponen enseñar física cuántica debido a sus concepciones erróneas, nos planteamos el siguiente problema de investigación ¿cómo evolucionan las concepciones de los profesores desde sus ideas iniciales hacia modelos más cercanos a los consensuados por la ciencia, luego de una secuencia de enseñanza-aprendizaje de física cuántica?

II. NUESTRO ESTUDIO

En un estudio preliminar se analizaron las concepciones de los docentes de ciencias de nivel medio sobre temas de física cuántica (Fernández, 2014). Ese estudio puso en evidencia que la formación de los profesores no había sido suficiente para superar tentativas "naturales" de reducir los objetos cuánticos a imágenes clásicas y que persistía una falta de diferenciación de los límites de los modelos propios de cada área. Permitió, además, identificar los tópicos que presentaban mayor nivel de complejidad y caracterizar el pensamiento del profesor frente a la ciencia y a la enseñanza de la física cuántica. En el caso del comportamiento de la materia en el nivel cuántico, la permanencia de imágenes de ondas o partículas, levemente modificadas, señala la sobrevivencia de la física clásica. En consecuencia, sugiere que la formación en física cuántica, debiera atender a una más profunda discusión de los modelos involucrados, sus limitaciones y alcances y a las posibles contribuciones de los modelos clásicos a la construcción de los nuevos modelos cuánticos (González et al., 2000). Entendiendo que, al menos en el nivel medio e incluso en el universitario básico, es necesaria una presentación inicial de la física cuántica que parta de niveles concretos de razonamiento y que avance hacia una comprensión de los nuevos modelos prescindiendo de un formalismo riguroso, pero sin incurrir en errores conceptuales, diseñamos una propuesta y evaluamos los avances de los profesores (Fernández, 2014).

Disentimos de algunos autores que sostienen que la física moderna sólo puede ser formulada en términos de conceptos matemáticos (Lind, 1980) o que su plausibilidad y su potencialidad explicativa sólo podrá apreciarse a través de un buen manejo del formalismo (Fischler y Lichtfeldt, 1992). Estos últimos también consideran perjudicial la presencia de analogías en la presentación de la física cuántica, ya que, según afirman, no puede explicarse mediante el uso de modelos clásicos aquellos conceptos que motivaron la ruptura de las nuevas ideas con la física clásica.

Por nuestra parte, en acuerdo con Gil y Solbes (1993), creemos que el análisis de los límites de validez de la física cuántica y la física clásica y la explicitación de las diferencias entre la concepción clásica y moderna del comportamiento de la materia es un punto de partida imprescindible para una buena comprensión de la física cuántica.

Bajo estas premisas, y partiendo de una perspectiva constructivista, se diseñó una secuencia de enseñanza-aprendizaje (SEA) que, bajo un enfoque de tratamiento de situaciones problemáticas, apunta a superar concepciones erróneas detectadas en la formación de profesores (González et al., 2000, Solbes et al. 2001, Sinarcas y Solbes, 2013) entre las que pueden mencionarse:

- Se conocen los hitos históricos que marcaron los inicios de esta nueva física, pero no se los interpreta como la evidencia de una verdadera revolución conceptual;
- Coexistencia de dos modelos independientes, uno para la luz (que puede comportarse como partícula, el fotón) y otro para la materia (limitado al electrón, al que puede asociársele una onda cuando se propaga libremente). Esta visión compartimentada tiene su origen en la organización tradicional de la enseñanza en unidades como mecánica de la partícula y del rígido, oscilaciones, ondas, termodinámica, electromagnetismo, en la que los contenidos se desarrollan secuencialmente en asignaturas independientes sin discutir en profundidad los cambios de modelos y sus limitaciones y que refuerza el carácter ontológico atribuido a los modelos al no discutir en profundidad su provisionalidad y su carácter meramente explicativo. A su vez, como se dijo antes, las presentaciones en los libros de física básica universitaria no discuten la construcción de un nuevo modelo para explicar los fenómenos cuánticos;
- Persistencia de concepciones erróneas simplistas al considerar, por ejemplo, a las relaciones de indeterminación de Heisenberg como un postulado que da cuenta de un desconocimiento de la posición o a las interpretaciones probabilísticas asociadas a problemas de medición, ambas superables con el avance tecnológico;

- Visión del formalismo limitada a la resolución de ejercicios con escasa interpretación de los significados de los fenómenos cuánticos.

En acuerdo con Greca y Moreira (1998) y Greca y Freire (2003), quienes realizan un estudio sobre modelos mentales de estudiantes y proponen un enfoque basado en la discusión de algunos tópicos particulares como la superposición de estados y la dualidad onda-partícula, entendemos que la diferenciación de los modelos de onda y partícula clásicos y la interpretación de la teoría cuántica a la luz de estos modelos es fundamental como punto de partida e hilo conductor de nuestra SEA. Nos centraremos, entonces, en esa parte de la propuesta.

La SEA se utilizó en un curso de formación para docentes de Física de un instituto secundario dependiente de la Universidad de Rosario. La duración del curso fue de 60 h a lo largo de 14 semanas. Particularmente, nos interesó analizar el pensamiento inicial del profesor con relación a algunos tópicos que consideramos fundamentales para una buena interpretación de la física cuántica y que resultaron ser de difícil comprensión para los profesores según las investigaciones anteriores. Estos son:

- Visión dual de la materia y la radiación (relaciones de indeterminación de Heisenberg, ecuaciones de De Broglie y principios fundamentales de la cuántica);
- Interpretación probabilística y determinista;
- Superposición de estados;
- Concepción de un nuevo objeto o modelo de estructura de la materia a nivel cuántico.

El curso se organizó en 6 módulos. Los módulos 1 y 2 fueron introductorios y en los módulos 3 y 4 se discutieron en profundidad los modelos clásicos de onda y partícula, las experiencias que cuestionan estos modelos desde la física cuántica y los aspectos de los modelos clásicos que aportan a la construcción del nuevo objeto cuántico. En los módulos 5 y 6 se analizó la problemática didáctica que introducen estos temas y los posibles desarrollos para el nivel medio. En la tabla I se muestra el programa sintético del curso, detallando los módulos 3 y 4.

Tabla I. Síntesis del programa del curso.

Programa del curso: Conceptos y modelos en la interpretación de la mecánica cuántica.
Módulo 1: <i>Presentación del curso y relevamiento de expectativas y concepciones iniciales</i>
Módulo 2: <i>La evolución de los modelos de la ciencia. El caso de los modelos para la luz</i>
Módulo 3: <i>Partículas y ondas, dos modelos de la física clásicos</i> Necesidad de revisar los modelos clásicos de partícula y onda. ¿Cuándo hablamos de partículas? ¿Cuándo hablamos de ondas? Los pulsos y la delimitación en el espacio y el tiempo. Relaciones de dispersión e indeterminación. Interacción de la radiación y la materia: el efecto Compton.
Módulo 4: <i>El nuevo objeto cuántico</i> Análisis de algunos experimentos conflictivos. Difracción e interferencia de partículas. Amplitud de probabilidad. Concepto de superposición de estados. Un nuevo modelo para la partícula libre y el fotón. Asociación velocidad de grupo a la velocidad de la partícula. Consecuencias que se derivan de aplicar un modelo ondulatorio a las partículas. Relación de De Broglie. Relaciones de indeterminación para las partículas (Heisenberg). Limitación en la posibilidad de conocer simultáneamente y con certeza posición y momento de la partícula. Ejemplos. El problema de los espectros. La cuantificación de la energía y las ondas estacionarias. La ecuación $\Delta E = h\nu$. La ecuación de Schrödinger para ondas estacionarias. Consecuencias sobre el modelo de partícula. Los orbitales. Interpretación probabilística y superposición de estados. Resolución de casos sencillos. El átomo de hidrógeno. Efecto túnel. Los números cuánticos. Los átomos multielectrónicos. La tabla periódica de elementos. Ejemplos. Aplicaciones
Módulo 5: <i>Cuestiones didácticas alrededor de la Mecánica cuántica</i>
Módulo 6: <i>Algo de historia: Aportes de la física precuántica</i>

Tomando como referencia a Clement (2000), la alternativa de formación diseñada intenta propiciar la transformación de las creencias de los alumnos (en este caso profesores en actividad), en modelos más satisfactorios desde el punto de vista de la enseñanza, pasando incluso por modelos intermedios. Estos modelos “de transición” no necesariamente son los modelos científicos, pero superan con creces las creencias intuitivas iniciales. También Petri y Niederer (1998) adhieren a estas ideas y describen una alternativa didáctica en la que a partir de un estudio de caso analizan la evolución de los modelos que sostiene un alumno sobre el átomo.

III. METODOLOGÍA

Fue un estudio preexperimental sobre una muestra no probabilística de conveniencia, en el sentido de Cohen, Marion y Morrison (2007). Este tipo de estudio consiste en un diagnóstico inicial y uno posterior luego de cierta intervención sin grupo control. En estos casos, las categorías halladas, si bien no son generalizables en forma amplia, establecen tendencias ciertas cuya diversidad podrá ser ampliada por futuros investigadores sin que esto cuestione la validez de las categorías ya establecidas. Se analizan los progresos de las representaciones de los profesores luego del curso.

Los instrumentos de recolección de datos fueron: un cuestionario de 14 preguntas abiertas y semiabiertas, aplicado al comienzo y a la finalización del curso, con un intervalo de cuatro meses entre ambas aplicaciones; registros filmicos de algunas de las exposiciones de los asistentes; análisis de notas de clase; y entrevistas informales cuando había necesidad de alguna aclaración. Para el registro de opiniones en clase, se contó con un observador externo que registraba en un cuaderno los comentarios de los asistentes y sus impresiones personales y, en caso de ausencia del mismo, el profesor del curso realizaba un informe pormenorizado, inmediatamente después de terminar la clase. El observador tenía conocimientos científicos y había participado en investigaciones en el área de la enseñanza de las ciencias. Se tuvieron en cuenta, además, las entrevistas realizadas durante el estudio de caracterización previo, en el caso de los profesores que además participaron del curso. Estas entrevistas habían sido grabadas y transcritas y para su tratamiento se realizó un exhaustivo análisis cualitativo, se agruparon y codificaron las respuestas por bloques de temas y se contabilizaron las coincidencias. Un detalle de estos estudios puede encontrarse en Fernández (2014). El objetivo común de los instrumentos fue explorar en mayor profundidad las representaciones de los profesores sobre los tópicos de la física cuántica, considerados de mayor dificultad dado que su conceptualización implica una ruptura con el paradigma clásico. Para su validación, los mismos fueron además supervisados por expertos en física y en su didáctica y se ensayaron con profesores para observar fallos y dificultades de comprensión de las premisas. Todos estos instrumentos fueron utilizados de manera cruzada para elaborar las categorías de análisis. Al finalizar el curso, los profesores resolvieron nuevamente la encuesta y tuvieron oportunidad de discutir las respuestas vertidas antes y después, para analizar su evolución personal.

La muestra estuvo constituida por doce profesores asistentes a un curso de formación organizado por el Instituto Politécnico Superior Gral. José de San Martín (IPS) dependiente de la Universidad Nacional de Rosario. En esta institución se dictan cursos de nivel medio y terciario universitario. El nivel medio es el de mayor población, con más de mil alumnos, en seis divisiones, de primero a quinto año. La muestra de trabajo se eligió en ese ámbito por la demanda de la institución acerca de la temática que nos interesa y por su intención de introducir temas de actualidad en el nivel medio. Por otro lado, dado que todos los cursos tienen alguna asignatura relacionada con la física o la química, concentra una cantidad considerable de profesores del área. El IPS se caracteriza por incentivar a sus docentes a participar en actividades de formación y actualización y su vinculación con la universidad hace que su dinámica supere la enseñanza tradicional de los institutos educativos dependientes de la provincia. Su planta docente incluye profesores egresados de institutos superiores de formación de docente y profesionales de distintas áreas. En nuestro caso, la muestra de profesores estuvo constituida por seis profesores de Matemática y Física, dos ingenieros electricistas, un ingeniero químico y un ingeniero civil (cuatro varones y siete mujeres). Ninguno de los ingenieros ejerce la profesión, todos se dedican a la docencia como principal actividad laboral y poseen la mayor cantidad de horas en el IPS.

Las respuestas previas y posteriores se agruparon en categorías conceptuales que surgieron del análisis por separado de las mismas. Se analizaron luego las variaciones en las respuestas de cada individuo y las categorías de partida y de llegada. Esto permitió detectar progresos notables y progresos moderados y dar una idea de evolución de niveles conceptuales. Las categorías fueron establecidas de modo empírico, interpretando las convergencias en los resultados y son provisionales, a la espera de nuevos estudios.

Al finalizar el curso, los profesores debieron presentar un diseño didáctico para la implementación y discusión de un tema física cuántica para el nivel en que se desempeñaban como docentes. En esta instancia quedaron expuestas las concepciones presentes de los profesores en la transferencia al nivel medio.

Los registros filmicos, las notas de clase y los diseños presentados al finalizar el curso permitieron definir más claramente la pertenencia de los profesores a la categoría asignada y, por ende, el trayecto de su evolución.

Aunque en el curso se abordaron diversos temas, dada la extensión limitada del artículo, presentamos solamente, el análisis de la categorización y evolución de uno de ellos: *el concepto de dualidad*, ya que junto al de incertidumbre es uno de los más conocidos por el profesorado y que ofrece importantes dificultades.

IV. RESULTADOS

A partir de las respuestas vertidas en la encuesta y su corroboración a través de las instancias descritas en la sección metodología, se realizó un análisis de evolución, por individuo y por tema, lo que permitió establecer categorías y grados de avance según el caso.

Presentaremos a continuación las categorías que surgen del análisis de las respuestas a una de las preguntas: *¿qué entiende por dualidad?*, y mostraremos cómo estas categorías permiten construir *diagramas de evolución* para la representación del progreso conceptual de los profesores.

A. Respuestas previas

Reflejan una visión ambigua del concepto. Se dice que la dualidad es un fenómeno, una necesidad, un comportamiento, o se repiten frases que aluden a cierta información asociada con la física cuántica de forma imprecisa. A partir del análisis, se establecieron tres categorías partir de las respuestas típicas (1.A, 1.B y 1.C) que no estarían ordenadas jerárquicamente. Se exponen a continuación dichas categorías y se citan las respuestas de los profesores asistentes. El número que antecede a las opiniones expresadas identifica cada sujeto, el sujeto 12 no contestó las encuestas.

¿Qué entiende por dualidad?:

Categoría 1.A: Sólo aluden al comportamiento dual de la luz

3. *A la necesidad de explicar físicamente a la luz, sin contar con un único modelo explicativo y por lo tanto hacer uso de ambas posibilidades.*

9. *Asociado al comportamiento de la luz. Algunas teorías luminosas pueden explicarse mediante un modelo ondulatorio de la luz y otros mediante el modelo corpuscular.*

Categoría 1.B: Sólo aluden al comportamiento dual de partículas

6. *Entiendo el comportamiento por ejemplo de un electrón, a veces como partícula y a veces como onda según el modelo utilizado.*

7. *Comportamiento tanto ondulatorio como corpuscular de los objetos subatómicos.*

8. *Admitir que una partícula puede/tiene un comportamiento ondulatorio asociado (De Broglie).*

11. *Partícula con las características de las ondas. Modelo que contiene propiedades de las ondas y de las partículas.*

Categoría 1.C: Aluden al comportamiento dual de un objeto general o de fenómenos

1. *Doble naturaleza. Comportamiento dual explicado a través de partículas u ondas.*

2. *Se trata de fenómenos que pueden explicarse utilizando modelos ondulatorios y corpuscular.*

4. *Hay fenómenos que se explican con modelos ondulatorios y otros con el modelo de partícula.*

5. *El comportamiento de ciertos elementos que reúnen ambas características.*

10. *Fenómenos que pueden ser explicados desde el punto de vista de partícula o desde el punto de vista ondulatorio.*

B. Respuestas posteriores

La dualidad se entiende como una propiedad, un comportamiento, una interpretación, un modelo, un fenómeno. Las respuestas son, en general, más específicas que en la encuesta previa; se citan ejemplos y predomina la idea de comportamiento. En este caso se establecieron tres categorías: 2.A, 2.L y 2.M. La categoría 2.A es una categoría vacía ya que luego de la SEA ningún profesor mantiene una concepción de la dualidad limitada a la luz.

Los objetos aludidos en las categorías 2.L y 2.M parecen estar mucho mejor definidos conceptualmente que en las categorías 1.B y 1.C.

Categoría 2.A: Sólo aluden al comportamiento dual de la luz.

Ningún profesor mantuvo esta concepción luego del curso.

Categoría 2.L: Aluden a modelos, interpretaciones o comportamiento desde el punto de vista de partículas.

6. *Es porque podemos interpretar los fenómenos cuánticos pensando en términos de ondas (funciones) aunque desde lo clásico las partículas estén asociadas a cantidad de movimiento y tienen masa.*

7. *Modelo físico en el cual la materia a nivel fundamental presenta propiedades tanto ondulatorias como corpusculares.*

5. *Existen partículas que en determinadas circunstancias se comportan como si fuesen ondas y ondas que a veces lo hacen como partículas (partículas cuánticas). De allí la dualidad onda partícula.*

Categoría 2.M: Aluden al comportamiento dual de un objeto cuántico o de fenómenos, con mayor especificidad.

1. Propiedad característica de los objetos cuánticos de comportarse como partículas y como ondas.
2. Es una propiedad de partículas llamadas objetos cuánticos cuyo comportamiento es tanto de partícula como de onda.
3. El comportamiento de los objetos cuánticos que a veces se comportan como ondas y en otras ocasiones como partículas.
4. Los objetos cuánticos en determinadas experiencias se comportan como ondas y otras como partículas.
8. Fenómeno o comportamiento que puede presentar un mismo objeto según las circunstancias. Ej.: fotones o electrones que pueden manifestar propiedades ondulatorias y también corpusculares.
10. El distinto comportamiento de los objetos cuánticos frente a diferentes situaciones. A veces se comportan como onda y a veces como partículas.
11. Así como a un campo electromagnético se le asocia una partícula (fotón) a una partícula se le asocia un campo de materia. Fotones y partículas a veces muestran un comportamiento corpuscular y a veces un comportamiento ondulatorio.

En el cuestionario previo encontramos que algunos de los profesores limitan la dualidad sólo a la luz (6 y 9) o sólo a las partículas (6, 7, 8 y 11). En cuanto a los que hablan de dualidad, unos mencionan ondas y partículas simultáneamente (1, 2 y 5) y sólo dos se refieren a fenómenos que se explican con un modelo o con el otro (4 y 10). Después de la intervención, encontramos mejoras sensibles: han desaparecido las respuestas que sólo le atribuyen el comportamiento dual a la luz y se han reducido a dos las que sólo lo hacen a las partículas (6 y 7). La mayoría, refieren la dualidad a los nuevos objetos cuánticos, aunque dos sujetos continúan atribuyendo a los cuantones el carácter de onda y partícula simultáneamente (1 y 2).

V. ANÁLISIS POR SUJETO Y POR CATEGORÍA. DIAGRAMAS DE EVOLUCIÓN

Para una mejor visualización se construyeron *diagramas de evolución* en que se representan en el eje vertical las categorías iniciales y finales establecidas y las trayectorias de evolución de los profesores (figura 1). Las tres categorías que resultan de la encuesta previa corresponden a categorías representacionales independientes, mientras que en la encuesta posterior las respuestas pueden agruparse en dos conjuntos anidados muy cercanos ya que, si bien uno de ellos sólo alude a partículas, a estas partículas se les confiere un comportamiento especial y diferente, es decir, un modelo más cercano a la física cuántica.

El número entre corchetes indica la *cantidad de individuos* que componen cada categoría. Los números entre paréntesis sobre las líneas, identifican *los individuos* que siguen esa trayectoria de evolución. Así, por ejemplo, de los 5 individuos que componen inicialmente la categoría 1.C, sólo uno cuya respuesta fue codificada con el número 5, evoluciona a la categoría 2.L y los otros cuatro lo hacen a la categoría 2.M (respuestas 1, 2, 4 y 10).

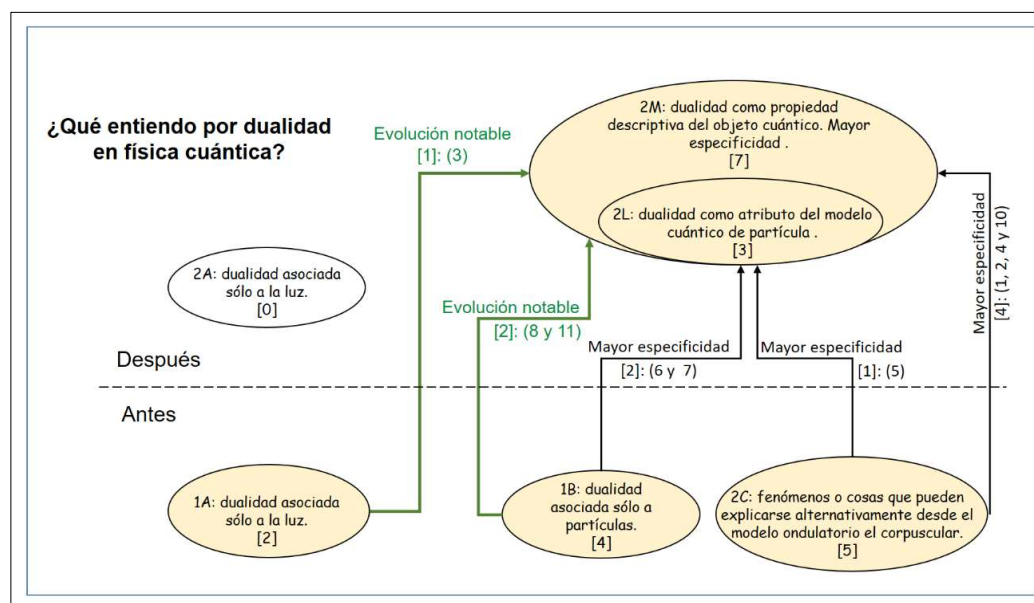


Figura 1: Diagrama de evolución de las concepciones de los profesores. Se muestran las trayectorias entre categorías de partida (1.x) y de llegada (2.x). La *cantidad de individuos* que componen cada categoría se muestra entre corchetes y los números entre paréntesis identifican los sujetos.

Es importante destacar que nadie luego del curso atribuye la dualidad únicamente a la luz, es decir se ha removido una idea generalizada y muy frecuente en los libros de textos de física general, según la cual, se asocia un comportamiento dual a la radiación a través de la descripción en detalle del efecto fotoeléctrico, sin avanzar en el tratamiento de fenómenos que pongan en evidencia el comportamiento dual de la materia.

La evolución desde los grupos 1.A y 1.B al grupo 2.M debe ser tenida en cuenta con igual peso de relevancia ya que en ambos casos se tiene una visión inicial parcial de la dualidad asociada, o bien a partículas, o bien a ondas. Los avances más notables se dan en las respuestas 3 (categoría 1.A), 8 y 11 (categoría 1.B) las cuales asociaban inicialmente la dualidad únicamente a la luz o a las partículas y luego coinciden en que éste es un comportamiento que puede observarse en ambos entes por igual y en las respuestas 1, 2, 4 y 10 (categoría 1.C).

La evolución del grupo 1.C al 2.M representa un importante avance conceptual, ya que las respuestas en la encuesta posterior reflejan mayor proximidad a la idea científica de dualidad en el sentido de reconocerla como una propiedad de los objetos cuánticos o como característica del modelo cuántico, dejando atrás ideas ambiguas de la dualidad como comportamientos o fenómenos circunstanciales, o incluso respuestas que parecen aludir a definiciones de diccionario.

La tabla II muestra las respuestas que han alcanzado el mejor nivel de comprensión, a partir del menor nivel de partida, o bien a partir de una formación inicial aceptable, lo que hemos dado en llamar *avance notable*.

Tabla II: Avances notables: Evolución desde un nivel inicial aceptable o bajo, al mejor nivel de comprensión alcanzado (el número que antecede identifica el sujeto).

De la dualidad asociada sólo a la luz o sólo a las partículas	→	A la dualidad como propiedad de los objetos cuánticos
3. Necesidad de explicar físicamente a la luz, sin contar con un único modelo explicativo y por lo tanto hacer uso de ambas posibilidades		3. El comportamiento de los objetos cuánticos que a veces se comportan como ondas y en otras ocasiones como partículas.
8. Admitir que una partícula puede/tiene un comportamiento ondulatorio asociado (De Broglie).		8. Fenómeno o comportamiento que puede presentar el mismo objeto según las circunstancias. Ej.: fotones o electrones manifiestan propiedades ondulatorias y corpusculares
11. Partícula con las características de las ondas. Modelo que contiene propiedades de las ondas y de las partículas		11. A un campo electromagnético se le asocia una partícula (fotón) a una partícula se le asocia un campo de materia. Fotones y partículas a veces muestran un comportamiento corpuscular y a veces un comportamiento ondulatorio.
De la dualidad en sentido general	→	A la dualidad como propiedad de los objetos cuánticos
1. Doble naturaleza. Comportamiento dual explicado a través de partículas u ondas.		1. Propiedad característica de los objetos cuánticos de comportarse como partículas y como ondas.
2. Se trata de fenómenos que pueden explicarse utilizando modelos ondulatorios y corpuscular.		2. Es una propiedad de partículas llamadas objetos cuánticos cuyo comportamiento es tanto de partícula como de onda.
4. Hay fenómenos que se explican con modelos ondulatorios y otros con el modelo de partícula.		4. Los objetos cuánticos en determinadas experiencias se comportan como ondas y otras como partículas.
10. Fenómenos que pueden ser explicados desde el punto de vista de partícula o desde el punto de vista ondulatorio.		10. El distinto comportamiento de los objetos cuánticos frente a diferentes situaciones. A veces se comportan como onda y a veces como partículas.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos la evolución de algunas categorías conceptuales que surgen del análisis de las representaciones de profesores de física en torno al concepto de dualidad en física cuántica como resultado de un curso de formación basado en la discusión de un modelo de estructura de la materia-radiación más actual, las limitaciones de los modelos de onda y partícula clásicos y los principales aspectos controversiales de la física cuántica.

En particular, mostramos un ejemplo de la evolución de los modelos de un grupo de profesores con relación a la dualidad en física cuántica y presentamos los diagramas de evolución que permitieron analizar más claramente los modelos de partida y de llegada y los avances experimentados en los tópicos analizados.

La caracterización realizada muestra que, en el caso del concepto de dualidad, inicialmente limitado a la energía en forma mayoritaria, se supera la definición del fotón como mera partícula de energía y las concepciones evolucionan hacia una idea de objeto cuántico más general para el que ya no es tan importante decidir si es una partícula o una

onda, pues posee las propiedades definitorias de ambas, que es, justamente, una de las principales características del comportamiento cuántico.

El estudio mostró que los cambios de concepciones no suelen ser abruptos y que existen concepciones o modelos intermedios en el trayecto que va desde las ideas iniciales a las deseadas en la enseñanza, tal como lo propone Clement (2000). La física cuántica ofrece un área muy poco explorada en este sentido.

Reconocemos que cada muestra de alumnos es única, que el contexto y la historia previa de cada alumno son factores importantes en la manera en que ven el mundo y que, en ese sentido, es de interés caracterizar cada muestra, sin buscar generalizaciones. No obstante, los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la enseñanza a través de modelos sigue siendo una de las alternativas más fructíferas en la didáctica de las ciencias. La caracterización de las concepciones de los alumnos, sean profesores o alumnos de grado, es una herramienta importante como punto de partida y de cierre al concluir la enseñanza. En este trabajo proponemos, además de la caracterización de concepciones previas y posteriores al cursado, una metodología para el análisis y la presentación de los resultados que puede aportar a comprender la distribución de esas concepciones en el seno de una muestra particular.

Como comentario final, no es grato destacar que la reticencia inicial de los docentes respecto de la enseñanza de la FQ, probablemente enraizada en el reconocimiento de las propias dificultades de comprensión, fue reemplazada paulatinamente por el deseo de intentar trasladar la experiencia didáctica transitada a sus alumnos. Esto se plasmó en las presentaciones finales a cargo de los asistentes y en los comentarios expresados en diferentes instancias a lo largo del curso. Naturalmente, estos resultados pueden ser ampliados y mejorados en nuevos estudios.

En nuestra investigación también analizamos la evolución de las concepciones de los profesores sobre la interpretación probabilística, las relaciones de incerteza y la superposición de estados en física cuántica, que serán objeto de otros trabajos.

REFERENCIAS

- Auletta, G. Fortunato, M. y Parisi, G. (2009). *Quantum Mechanics*, Cambridge University Press: UK.
- Brookes, D. T. y Etkina, E. (2007). Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. *Physical Review, Special Topics, Physics Education Research*, 3, 010105.
- Bunge, M. (1982). *Filosofía de la Física*. Trad. cast. de J. L. García. Barcelona: Ariel.
- Castrillón, J., Freire, O. y Rodríguez, B. (2014). Mecánica cuántica fundamental, una propuesta didáctica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(1), 1-12. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000100023>
- Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. En Giere, R. (ed.), *Cognitive models of Science: Minnesota studies in the philosophy of science*, 129-186. University of Minnesota Press: Minneapolis, M. N.
- Clavijo, M., Walteros, A. y Cortés, C. (2019). La actividad experimental como una parte fundamental para la enseñanza de la "física moderna: el caso de la mecánica cuántica. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (45), 191-206.
- Clement J. (2000). Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1041-1053.
- Clement J. (2008). Co-construction estudiante/maestro de modelos visualizables en grandes discusiones grupales. En J. J. Clement and M.A. Rea-Ramirez (eds.), *Model Based Learning and Instruction in Science*, 11–22. Salt Lake City: Springer.
- Cohen, L., Marion, L., y Morrison, K. (2007) *Research Methods in Education*. Sexta Ed., Taylor & Francis: NY
- Fanaro, M., Otero, M. R. y Elgue, M. (2016). Secuencia para enseñar conceptos acerca de la luz desde el enfoque de Feynman para la Mecánica Cuántica en la Escuela Secundaria: un análisis basado en la teoría de los campos conceptuales. *Cad. Bras. Ens. Fis.*, 33(2), 477-506. <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2016v33n2p477>
- Fernández, P. (2014) *Teorías y modelos en la enseñanza -aprendizaje de la Física Moderna*. Tesis Doctoral en Física, <https://www.uv.es/jsolbes/documentos/tesis%20patricia%20f.pdf>

- Fernández P., González E. y Solbes J. (2005). De los corpúsculos de luz al efecto fotoeléctrico. Una propuesta didáctica con base en la discusión de modelos. *Revista de Enseñanza de la Física*, 18(1), 69-80.
- Fernández, P., González E. y Solbes J. (1997). La inclusión de temas actuales de Física en el Polimodal. Algo más que ampliación de contenidos. *Revista Educación en Ciencias*. 3, 5-10.
- Feynman, R., Leighton, R. y Sands, M. (1987). *Física*. V. III: Mecánica Cuántica. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana.
- Fischler, H. y Lichtfeldt, M. (1992). Modern Physics and Students' Conceptions. *Int. Journal. Sci.* 14(2), 181-190.
- Gil, D. y Solbes, J. (1993). The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. *International Journal of Science Education*, 15, 255-260.
- González E., Fernández P. y Solbes J. (2000) Dificultades de docentes de ciencia en la conceptualización de temas de física actual. *Memorias V Simposio de Investigadores en Enseñanza de la Física* (V SIEF). Vol. I, octubre, Santa Fe, Argentina.
- González, S. (2015). La enseñanza de conceptos básicos de física cuántica para un aprendizaje significativo del Modelo Atómico Actual. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Greca, I. M., y Freire, O. J. (2003). Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? *Science & Education*, 12, 541–557. <https://doi.org/10.1023/A:1025385609694>
- Greca, I. y Moreira, A. (1999). O que estão entendendo alunos universitários nas aulas de mecânica quântica. *II ENPEC*. Brazil.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35, 15-21.
- Johnston, I., Crawford, K. y Fletcher, P. (1998) Student difficulties in learning quantum mechanics, *Int. J. of Sci. Educ* 20(4), 427-440.
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P., y Stavrou, D. (2003). An Instructional Model for a Radical Conceptual Change Towards Quantum Mechanics Concepts. *Science Education*, 87(2), 257–280. <https://doi.org/10.1002/sce.10033>
- Kragh, H. (2007). *Generaciones Cuánticas. Una historia de la Física en el siglo XX*. Akal: Madrid.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., y Van Joolingen, W. R. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>
- Lévy-Leblond, J. M. (2003). On the Nature of Quantons. *Science & Education*, 12, 495–502. <https://doi.org/10.1023/A:1025382113814>
- Lind, G. (1980). Models in Physics: Some pedagogical reflections based on the history of science, *Eur. J. Sci. Educ.*, 2(1), 15-23.
- National Committee on Science Education Standards and Assessment, National Research Council (1996). *National Science Education Standards*. National Academy Press: Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/4962>
- Neressian, N. (1992) Constructing and Instructing: The role of "Abstraction Techniques" in creating and learning Physics. En Duschl R. & Hamilton R. (eds.) *Philosophy of Sc. Cognitive Psychology, and Educational Theory and Practice.*, 48-67.
- Neressian, N. (2002). The cognitive basis of model-based reasoning in science. En P. Carruthers, S. Skitch y M. Siegal (eds.), *The cognitive basis of science*. N.Y.: Cambridge University Press.
- Ohanian H. (1995). *Principles of Quantum Mechanics*. Prentice Hall: New Jersey.
- Oñorbe, A. (1996). Avance de la ciencia en el curriculum. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 10, 7-9.

Pereira, A., Ostermann, F. y Cavalcanti, C. (2009). On the use of a virtual Mach-Zehnder interferometer in the teaching of quantum mechanics. *Physics Education*, Bristol, (44), 281-291.

Petri, J. y Niedderer, H. (1998). A learning pathway in high school level quantum atomic physics. *Int. J. of Sci. Educ.* 20(9), 1075-1088.

Posner, G., Strike, K., Hewson, P. y Gertzog, W. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.

Sinarcas, V. y Solbes, J. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de Las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 31(3), 9–25. <https://doi.org/10.5565/rev/ens-cien/v31n3.768>

Solbes, J. (1996) La Física Moderna y su Enseñanza. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 10, 9-67.

Solbes, J., Bernabeu, J., Navarro, J y Vento, V. (1988). Dificultades en la enseñanza aprendizaje de la física cuántica. *Revista Española de Física*, 2, 22-27.

Solbes, J., Fernández, P. y González, E. (2001). Carencias en la formación docente en temas de física contemporánea en Argentina. *Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*. Número Especial Revista de Enseñanza de las Ciencias VI Congreso Internacional de Investigaciones en Enseñanza de las Ciencias. Vol. II, Barcelona, España.

Solbes, J. y Sinarcas, V. (2009). Utilizando la historia de la ciencia en la enseñanza de los conceptos claves de la física cuántica. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 23, 123-151.

Solbes, J. y Sinarcas, V. (2010). Una propuesta para la enseñanza aprendizaje de la física cuántica basada en la investigación en didáctica de las ciencias. *Revista de Enseñanza de la Física*, 23(1 y 2), 57-84.

Vosniadou, S. (2000). Cómo aprenden los niños. *Educational practices series*, en: <http://www.ibe.unesco.org>

Vosniadou, S. (2013). Model based reasoning and the learning of counter-intuitive science concepts, *Infancia y Aprendizaje*, 36(1), 5-33, DOI: 10.1174/021037013804826519