



Uso de casos biográficos para el aprendizaje de la biología cuántica

Alejandra García Franco
Departamento de Procesos y Tecnología
UAM Cuajimalpa

Felipe Aparicio Platas
Departamento de Ciencias Naturales
UAM Cuajimalpa

Armando Gama Goicochea
División de Ingeniería Química y Bioquímica
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

Abstract

It is widely acknowledged that science and engineering university students should learn not only the principles and methods of science but also its nature. Reasons to include aspects of the Nature of Science (NOS) in the curricula are diverse and there is a current debate about the best ways to achieve it. In this paper we present the usage of historical cases in a 'Quantum Mechanics for Biology' course. Students were asked to do research on one historical character and relate her/his life to her/his contributions to science and then present findings in a paper and in an oral presentation to the rest of the group. Some of the students answered a questionnaire and were interviewed and they stated that the activity was enlightening and motivating, led to a better understanding of the concepts involved in the course and of the nature of science in general.

Keywords

Case based teaching, quantum biology, nature of science, higher education.

Palabras clave

Enseñanza basada en casos, biología cuántica, naturaleza de la ciencia, educación superior.

Introducción

La idea de que los estudiantes universitarios deben aprender sobre la naturaleza de la ciencia (NdC) ha estado presente en las discusiones sobre didáctica de las ciencias hace ya bastantes años. Las razones por las que se promueve el aprendizaje de la naturaleza de las ciencias son diversas y van desde una formación integral para una vida democráti-

ca, en la que las decisiones sobre ciencia y tecnología son cada vez más relevantes para la vida de los individuos, hasta la necesidad de que los estudiantes reconozcan la forma de proceder de los científicos para recurrir a ellas en sus propios trabajos de investigación (Sandoval, 2005). La forma de enseñar la naturaleza de las ciencias es, sin embargo, objeto de discusiones actuales (Duschl y Grandy, 2012; Abd-el-Khalick, 2012).

En este artículo, presentamos un trabajo realizado en la asignatura de Biología Cuántica en el que participaron estudiantes universitarios de las licenciaturas de Biología Molecular y Matemáticas Aplicadas. Utilizamos una aproximación de enseñanza conocida como 'Enseñanza basada en casos' (case based teaching). Los estudiantes investigaron sobre algún principio o desarrollo de la mecánica cuántica y alguno de los científicos asociados a éste. La intención era que los estudiantes aprendieran los principios de mecánica cuántica involucrados, pero también que reflexionaran sobre la forma en la que ciertos aspectos de la vida y del contexto social del científico pudieron haber sido relevantes para su trabajo.

En este artículo presentamos los fundamentos teóricos de la propuesta, la descripción de la forma en la que se llevó a cabo y algunos resultados de su implementación a partir del análisis de los documentos finales de los estudiantes así como de sus respuestas a cuestionarios abiertos y entrevistas.

La enseñanza de la naturaleza de la ciencia

Cada vez es más claro que la comprensión de la ciencia tiene muchas facetas y que va más allá de la comprensión de los conceptos

científicos. Incluso en los niveles preuniversitarios, los currículos actuales demandan que los estudiantes aprendan no sólo lo que sabemos sobre algún tema científico, sino que también aprendan cómo lo sabemos. Es decir se trata de familiarizarse los modelos y teorías de la ciencia, así como entender la forma en la que éstos se construyen, se validan y se modifican. En palabras de Hodson (1994), se busca que los estudiantes sean alfabetizados científicamente: “que aprendan ciencia, sobre la ciencia y a hacer ciencia”.

La idea de que la naturaleza de la ciencia debe ser un objetivo explícito de la enseñanza de las ciencias ha sido discutida por los educadores en ciencias desde la última década del siglo pasado (Lederman, et al, 2002; Acevedo, 2004) y ha sido reconocida como uno de los paradigmas de la enseñanza en ciencias debido a su relevancia para la vida en un mundo incierto como el actual (Garritz, 2010).

Si bien, no hay una definición única sobre la naturaleza de la ciencia, se han identificado algunos aspectos de consenso entre la comunidad que trabaja estos temas (Lederman, 2006). Acevedo (2004, p.135) lo describe de esta manera:

La NdC es un término poliédrico que se refiere a una gran variedad de asuntos relacionados con la filosofía, la sociología y la historia de la ciencia (...) para muchos autores de didáctica de las ciencias, la NdC se refiere de manera especial a la epistemología de la ciencia y se dirige sobre todo a los valores y supuestos inherentes al conocimiento científico (...) para otros autores el concepto de NdC abarca mayor diversidad de aspectos, tales como

qué es la ciencia, su funcionamiento interno y externo, cómo construye y desarrolla el conocimiento que produce, los métodos que emplea para validar y difundir este conocimiento, los valores implicados en las actividades científicas, las características de la comunidad científica, los vínculos con la tecnología, las relaciones de la sociedad con el sistema tecnocientífico y, viceversa, las aportaciones de éste a la cultura y al progreso de la sociedad; esto es, la noción de NdC incluye cuestiones epistemológicas, sociológicas y psicológicas.

Particularmente, dentro de los aspectos sociales de la ciencia identificados en la propuesta de Lederman et al (2002, p. 501) se reconoce que: “Como empresa humana, la ciencia se practica en un amplio contexto cultural y los científicos son un producto de esa cultura” y “el conocimiento científico proviene de la imaginación y la creatividad humanas, al menos parcialmente (...) De aquí se sigue que la ciencia está influida por diversos elementos y ámbitos de la sociedad y la cultura donde se inserta y desarrolla. Los valores de la cultura determinan hacia donde se dirige la ciencia, cómo se interpreta, se acepta y se utiliza. Así mismo, la ciencia influye en la sociedad y en la cultura en la que está inserta”.

La importancia de que los estudiantes de licenciatura aprendan acerca de la naturaleza de la ciencia no puede subestimarse. La gran mayoría de estudiantes de licenciatura de carreras científicas no seguirán una carrera académica sino que se incorporarán a la fuerza de trabajo de maneras diversas, muchas de las cuales pueden implicar comunicación sobre la ciencia. Esto es relevante si

los estudiantes llegan a ser docentes porque aun cuando no se puede establecer una relación directa entre las concepciones que los docentes tienen sobre la ciencia y las formas en las que las enseñan es posible pensar que éstas juegan algún papel en el tipo de actividades que los docentes sugieren y en cómo interpretan las respuestas de los estudiantes (Driver, et. Al, 1996).

La forma en la que es más conveniente enseñar la naturaleza de la ciencia es aún objeto de debates (Duschl y Grandy, 2012; Abd-El-Khalick, 2012). Sin embargo, los investigadores coinciden en que la enseñanza debe ser explícita, es decir, no basta con que los estudiantes lleven a cabo actividades científicas y aprendan conceptos científicos, sino que los componentes de la NdC deben formar parte integral de la enseñanza. El caso histórico-biográfico que nosotros presentamos permite a los estudiantes llevar a cabo una investigación sobre aspectos específicos de la ciencia, de momentos estelares y desarrollos específicos. Esta aproximación busca explícitamente promover que los estudiantes desarrollen una comprensión epistemológica informada sobre la generación y validación del conocimiento científico, y la naturaleza del conocimiento resultante (Abd-el-Khalick, 2012).

La enseñanza basada en casos

La enseñanza basada en casos tiene su origen en la enseñanza de la medicina y de las leyes. En la educación científica, el uso de la enseñanza basada en casos es más reciente y se identifica según Herreid (1997) con la publicación del libro de J. Conant *Understanding Science* (1957) cuya presentación en los seminarios de la Universidad Harvard está identificado como la primera ocasión

en la que se consideraron de forma explícita aspectos sobre la naturaleza de la ciencia en cursos universitarios (Duschl y Grandy, 2012). La intención de Conant de comunicar no sólo los conocimientos científicos, sino la forma en la que se llevan a cabo los descubrimientos científicos se convirtió en una de las primeras aproximaciones para aprender y enseñar ciencia con base en las historias y las narrativas de las formas de actuar de los científicos.

La enseñanza basada en casos parte del supuesto de que las historias son atractivas para los seres humanos. Somos más capaces de recordar y de involucrarnos en la resolución de un problema o una tarea que está ‘dentro’ de una historia. El uso de casos biográficos, como los que J. Conant presentaba en los seminarios en Harvard, buscan familiarizar a los estudiantes con la forma en la que los científicos construyen el conocimiento. De esta forma se busca que comprendan mejor, aspectos de la ciencia y la tecnología modernas, que reconozcan las dificultades que han enfrentado los desarrollos científicos, y que reflexionen sobre las influencias sociales y personales en éstos.

El uso de casos en la educación científica ha adquirido fuerza hace ya algunas décadas y, por lo tanto, se presenta actualmente en modalidades diversas. No existe un único método para la enseñanza basada en casos, dado que estos pueden tomar muchas formas: abiertos, cerrados, semi-abiertos, experimentales, documentales, de controversia (Herreid, 1997). “El caso que nosotros presentamos permitió que los estudiantes se convirtieran ellos mismos en los ‘contadores de historias’ al llevar a cabo una investigación sobre el personaje elegido y narrar su historia para otros.

La enseñanza de la Mecánica Cuántica

Nadie duda de las aportaciones de la mecánica cuántica (MC) y del cambio radical que ésta implica en nuestra comprensión de la naturaleza. Esto hace necesario que todos los estudiantes universitarios de carreras científicas tengan acceso a este conocimiento por el creciente número de aplicaciones que se han encontrado en campos diversos (Garritz, 2011). Sin embargo también es claro que incluso estudiantes de física tienen problemas conceptuales para la comprensión de los principios fundamentales de la MC (Johnston, Crawford y Fletcher, 1998) y que se requieren formas alternativas para su enseñanza (Müller y Weisner, 2002).

Algunos de los avances más recientes y prometedores de la MC se han dado en la posibilidad de explicar fenómenos biológicos como los patrones de migración de aves y la fotosíntesis. El campo de la Biología Cuántica es muy prometedor y apasionante para quienes lo estudian (Lambert et al., 2013; Amador y Aispuru-Guzik, 2011), por ello los autores, docentes de la licenciatura de Biología Molecular, propusieron el curso de “Biología Cuántica” como una asignatura optativa.

Este curso no tenía antecedentes en la Universidad donde trabajamos por lo tanto fue necesario diseñar el programa a cubrir, además del método de presentación de los temas y el de evaluación. Dado que es un tema muy novedoso no existen libros de texto y la información disponible es aún muy poca y especializada, lo cual va mucho más allá del alcance de un curso de licenciatura. Requiere además de conocimientos físicos y matemáticos que los alumnos de la licenciatura mencionada típicamente no tienen. Frente a estas restricciones el reto era presentar temas de mecánica cuántica con

un enfoque biológico sin enfatizar desarrollos matemáticos pero al mismo tiempo sin sacrificar el rigor de los conceptos. La motivación para proponer un curso de esta naturaleza en el contexto descrito se origina en el cada vez más demandante y competitivo campo profesional de los científicos contemporáneos. Es así que licenciaturas relativamente novedosas, tales como Biología Molecular, deben preparar a profesionales enterados de una amplia gama de campos modernos, puesto que la tendencia global va hacia borrar las fronteras tradicionales entre las ciencias, convirtiéndose en modalidades transdisciplinarias. En particular, como se dijo anteriormente, trabajos de investigación de frontera muy recientes han demostrado que algunos de los procesos biológicos más cotidianos, como la fotosíntesis, están íntimamente relacionados con fenómenos de origen cuántico. Además, es importante exponer a los alumnos a las formas de pensamiento y a los paradigmas planteados por la mecánica cuántica ya que son esencialmente diferentes a los empleados en la biología tradicional y por lo tanto complementan y robustecen su formación.

La importancia de los factores afectivos (Pardilla y Van Driel, 2011) en un tema como la mecánica cuántica ha sido indagada previamente y queda claro que, desde el punto de vista de los docentes, es un tema complejo que genera rechazo en los estudiantes. Una buena comprensión de la MC puede resultar motivante (Moreira, 2009) pues permite a los estudiantes de niveles no tan avanzados explicar fenómenos complejos. Sin embargo, esto requiere de aproximaciones para la enseñanza de la MC que consideren las ideas de los estudiantes y que les ayuden a reflexionar tanto sobre los conceptos como sobre la forma en la que éstos son construidos.

Metodología

Descripción de la investigación

El trabajo que reportamos se llevó a cabo en el año 2015 con un grupo de la asignatura de Biología Cuántica. El grupo consistía de 10 alumnos, 6 de la licenciatura de Biología Molecular y 4 de la licenciatura de Matemáticas Aplicadas. Los docentes fueron dos profesores (segundo y tercer autores) del Departamento de Ciencias Naturales con amplia experiencia docente.

Como parte de los trabajos del curso, se pidió a los estudiantes desarrollar un caso biográfico (Morris y Gal, 2003). Para ello eligieron un concepto de la mecánica cuántica e investigaron sobre éste y alguno de los científicos que lo desarrolló (esta selección se hizo a partir de conceptos propuestos por los docentes). Se pidió que los casos presentaran el momento histórico en que ocurrió el desarrollo, la vida personal de los personajes involucrados, los aspectos sociales, económicos, profesionales a los que estaban sujetos. Se solicitó que los estudiantes identificaran cualquier posible afinidad o diferencia que el(la) alumno(a) encontrara con los personajes de su historia. Se sugirió un formato general a seguir para la presentación del trabajo escrito, el cual permitía la adaptación al estilo e intereses personales de cada alumno. Se les proporcionó además una rúbrica que detallaba qué y cómo se evaluaría cada uno de los aspectos. En la Tabla 1, se muestran los casos elegidos por los estudiantes.

La propuesta fue adaptada de Morris y Gal (2003) con el objetivo explícito de permitir a los estudiantes comprender el lado humano del quehacer científico, promover el conocimiento de la historia de un campo científico, y concientizar a los alumnos sobre la forma en que acontecimientos tales como guerras,

situaciones políticas y económicas, y avances tecnológicos afectan al desarrollo de la ciencia.

Ninguno de los estudiantes participantes había sido expuesto formalmente a temas de mecánica cuántica, con la excepción de conceptos tales como orbitales atómicos y moleculares, y números cuánticos. Las herramientas matemáticas con las que se suponía que los estudiantes estaban familiarizados eran únicamente el cálculo diferencial e integral de funciones de una variable.

El curso tiene una duración total de doce semanas. Los estudiantes eligieron el concepto que investigarían en la semana 5. Dos semanas después (en la semana siete) entregaron la primera versión escrita del trabajo con el propósito de recibir retroalimentación y en la semana nueve entregaron la segunda versión de su reporte escrito. Finalmente, en la semana 11, entregaron la versión final, al mismo tiempo que presentaban oralmente sus casos.

Para la exposición se asignó una duración de media hora para cada expositor, complementado con diez minutos para preguntas y discusión. La audiencia consistió no sólo de los profesores del curso sino también de profesores invitados del mismo departamento, así como de alumnos que no cursaban la asignatura y que tenían interés en los casos a presentarse.

La evaluación del trabajo escrito así como la presentación oral constituyó el 50 % de la evaluación del curso.

Para evaluar el impacto de esta actividad se revisaron los trabajos producidos por los estudiantes y se hizo un análisis de contenido (Mayring, 2014) para identificar

Tabla 1. Casos elegidos por los estudiantes

Interpretación de Copenhague	Niels Bohr
Interpretación de universos múltiples	Hugh Everett
Ecuación de onda	Erwin Schroedinger
Principio de incertidumbre	Werner Heisenberg
Suma sobre trayectorias	Richard Feynman
Efecto Josephson	Brian Josephson
Efecto Hall cuántico fraccionario	Robert Laughlin
Observación de condensación de Bose Einstein	Eric Cornell
Obtención del grafeno	Andre Geim
El bosón de Higgs	Peter Higgs

los aspectos que mencionan con respecto a aspectos de la Naturaleza de la Ciencia. Se hizo también un cuestionario de preguntas abiertas seguido de una entrevista a dos estudiantes (Est. 4 y Est. 5) para indagar sobre sus percepciones y aprendizajes al realizar este trabajo.

Resultados

De acuerdo con los docentes del curso, en las exposiciones de los casos, los alumnos fueron más allá de lo que se esperaba. En algunos casos hicieron desarrollos matemáticos más sofisticados que los que se hicieron en clase y aprendieron de forma casi autodidacta y con notable rigor aspectos básicos de la MC. De acuerdo con su percepción, los alumnos demostraron interés genuino por sus casos, así como un auténtico entusiasmo por aprender más, hacerse preguntas, lo cual les permitió llevarse enriquecedoras reflexiones.

Análisis

A partir del análisis de contenido de los trabajos entregados por los estudiantes resaltaremos algunos de los aspectos que los estudiantes encontraron relevantes respecto a las características personales de

los científicos y de sus historias de vida en el desarrollo del conocimiento y comprensión de la MC. Incorporamos también las respuestas en el cuestionario y entrevista. Los estudiantes han sido identificados con iniciales para garantizar el anonimato. Los textos han sido editados mínimamente para su mejor comprensión.

Características personales de los científicos

Algunos estudiantes mencionaron características personales de los científicos que les sorprendieron y que les hicieron reflexionar sobre las visiones estereotipadas que se tienen comúnmente. Citamos aquí algunas de las reflexiones de los estudiantes que nos parecen significativas:

Este físico [Erwin Schroedinger] tiene características muy peculiares lo que hace que marque una huella en nuestro pensamiento, como la idea de poder ver en el mismo plano el arte de seducir féminas, como de imaginar y vislumbrar grandes ecuaciones físicas (...) es de gran interés personal hacer énfasis en cómo llegó a romper diferentes paradigmas gracias

a una astuta visión de ver las cosas y realizar lo que se deba de hacer sin importar la complejidad matemática que le podría avecinar, esto es perder el miedo y disfrutar el trabajo (Est. 1)

Me parece que Everett fue un personaje importante en la mecánica cuántica (...) en la ciencia, es bastante difícil que la comunidad científica acepte nuevas ideas, a pesar de que Everett era una persona muy inteligente, no supo tomar las actitudes adecuadas frente a los defensores de la interpretación ortodoxa, lo que causó su deserción de la mecánica cuántica. Everett tenía las capacidades para continuar en el campo de lo cuántico, y pudo haber aportado mucho más a esta rama de la ciencia (Est. 2)

Relaciones de la vida de los científicos con su propia vida

Algunos estudiantes reconocen aspectos de la vida de los científicos elegidos que son similares a su propia vida.

Me identifico con la edad a la que descubrió el efecto Josephson pues tengo 22 años (...) no deja de sorprenderme que a esta edad haya podido descubrir dicho efecto, sin siquiera haber terminado sus estudios (...) el hecho de que haya querido explicar la ciencia con ayuda del misticismo oriental se me hace un poco descabellado (...) la línea entre la genialidad y la locura es tan fina, que puede llegar a desvanecerse (Est.3)

Aspectos sociales de la construcción del conocimiento científico

Algunos alumnos identifican la forma en la que el contexto social es relevante en el proceso de desarrollo del conocimiento científico.

Encontré que para Bose era difícil poder sobresalir en esa época por sus raíces de ser hindú no era tomado en cuenta en su trabajo, dado esas circunstancias decidió apoyarse de Albert Einstein quien estaba en el auge de la ciencia de aquel tiempo (Est. 4/Ent)

Relación entre la vida de los científicos y el conocimiento científico

Nunca había visto un enfoque tan personal hacia los genios, siempre se ven los experimentos, se ven los logros, pero nunca si era una persona deprimida, si tenía varias parejas, si engañaba a su esposa, realmente esa parte nunca le dan importancia y sí influye mucho en cómo eres como persona y también influye en cómo piensas (Est. 5/Ent)

“(...) yo pensaba que Einstein lo veía todo, me sorprendió una parte porque tenía toda la información pero no podía resolverlo porque no sabía tantas matemáticas para resolver lo que él quería, te das cuenta que necesitas de colegas, al juntarte lo puedes resolver” (Est. 4/Ent)

Sobre el aprendizaje basado en casos

Algunos estudiantes reconocen que esta aproximación de enseñanza es novedosa en la educación superior:

“(…) esta dinámica [la enseñanza basada en casos] fue muy extraña, nunca la había hecho pero realmente en lo personal me gustó mucho porque conoces a la persona, conoces lo que estaba pensando, qué era lo que estaba pasando, cuál es su contexto (…) por qué fue que pensó así y ya después ver el efecto o el fenómeno que estaba estudiando te hace entenderlo mucho más a que si lo ves aislado o nada más te dicen el teorema de Pitágoras es tal y no sabes quién es Pitágoras ni por qué pensaba así” (Est. 3)

“Uno toma una clase y dices -sí le entiendo y tal- pero cuando uno hace, yo me di cuenta que **estaba haciendo un trabajo sobre biología cuántica** pues era algo que siempre había soñado, estaba trabajando con lo que siempre soñé desde que era adolescente. Te queda más claro porque tú lo dices a tu forma, tú lo escribes a tu forma, cómo lo entiendes tú. Esas son las ideas y como que tú las defiendes. Tú te quedas con algo.” (Est. 4)

La comprensión de la Mecánica Cuántica

Los estudiantes reconocen aspectos relacionados con la posibilidad de comprender temas de la Mecánica Cuántica que probablemente pensaban fuera de su alcance:

Se fueron formando uniones entre lo que ya conocía experimentalmente y lo que realmente estaba pasando (…) y las aplicaciones y que sea un tema de vanguardia que ahorita se está investigando, es muy padre, la información era actualizada, publicaciones de hace un año, del año pasado y eso fue muy padre (Est. 5/Ent)

Antes de tomar el curso consideraba bastante difícil poder hablar sobre estos temas tan interesantes pero complicados (…) después de hacer mi trabajo de investigación pude concluir que no se me hizo pesado hacerlo, tal vez por la forma en que entendí el tema o por el entusiasmo que le di a la materia y al trabajo que fue lo que más me gustó de mi trimestre (Est. 4/Ent)

Reflexiones finales

Hemos encontrado que el uso de casos biográficos fortalece el aprendizaje de temas científicos que son tradicionalmente poco atractivos y difíciles para los estudiantes. Los estudiantes mencionan cómo, cuando un descubrimiento en el laboratorio o un desarrollo matemático se contextualizan en un momento histórico y se describen como el resultado de arduos esfuerzos por muchas personas durante periodos largos de tiempo, éstos se “humanizan”. Es decir, descubrimientos importantes se vuelven menos intimidantes intelectualmente. Desarrollar los casos biográficos permite que los estudiantes transformen su concepción del desarrollo científico ayudando a remover el estereotipo del científico aislado como generador del avance del conocimiento.

Algunos de los estudiantes hicieron un in-

tento por relacionar de forma explícita la vida de los científicos y los aspectos relevantes de su biografía lo cual es importante para reconocer que la ciencia está hecha por hombres (y mujeres) en situaciones específicas, con debilidades personales. Así mismo, conocer el contexto en el que se sitúa el problema estudiado puede contribuir a que los estudiantes reconozcan aspectos específicos de la construcción social del conocimiento científico.

El desarrollo de este trabajo fortaleció el conocimiento sobre la NdC de los estudiantes participantes, lo cual puede notarse a partir de las impresiones de los estudiantes sobre su propio trabajo y en las reflexiones que hacen en el trabajo escrito. La NdC debe ser un contenido transversal en la formación universitaria, dado que muchos estudiantes de ciencias pueden terminar sus licenciaturas sin haber hecho una reflexión sobre la ciencia y su naturaleza, lo cual es una carencia en su formación.

Sin embargo, para tener mayor impacto sería necesario construir una aproximación de enseñanza que incluya el componente reflexivo puesto que los aspectos biográficos y sociales de la ciencia fueron considerados por los estudiantes más como un accesorio del trabajo que como parte de los objetivos principales.

Creemos que un trabajo como este puede ser más fructífero si, como mencionaba Klopfer (1964, citado en Abd-el-Khalick, 2012), los estudiantes están conscientes desde el inicio que el objetivo del caso biográfico no es sólo la comprensión del contenido científico, sino también la reflexión sobre la ciencia y los científicos. Diversas aproximaciones han mostrado que el uso de casos biográficos puede ser muy útil para discutir y reflexio-

nar acerca de muchos de los aspectos de la NdC (Niaz, 2009), sin embargo, éstos deben hacerse más evidentes y deben ir más allá de la incorporación de la información biográfica al desarrollo conceptual.

A partir de la respuesta de los estudiantes a la actividad propuesta estamos convencidos de que esta es una aproximación valiosa que vale la pena mejorar para aplicarse de nuevo con una intención más explícita respecto al aprendizaje de la NdC.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer muy especialmente a todos los alumnos que tomaron el curso de biología cuántica, por su entusiasta participación y esfuerzo. AGG y FA agradecen el apoyo del CA de Fisicoquímica y Diseño Molecular.

Referencias

Abd-el-Khalick, F. Teaching With and About Nature of Science, and Science Teacher Knowledge *Domains, Science & Education*, On-line first, 2012.

Amador-Bedolla C. y Aispuru-Guzik, A. La biología cuántica ¿un nuevo campo de la química? *Educación Química*, 22(1), 8-11, 2011.

Conant, J. Harvard case histories in experimental science, (Vols 1 & 2). Cambridge, MA: Harvard University Press, 1957. Disponible en línea http://archive.org/stream/harvardcasehisto010924mbp/harvardcasehisto010924mbp_djvu.txt

Duschl, R. y Grandy, R. Two Views About Explicitly Teaching Nature of Scien-

- ce. *Science & Education*, On-line first. 2012.
- Garritz, A. La enseñanza de la química para la sociedad del siglo XXI, caracterizada por la incertidumbre *Educación Química*, **21**(1), 2-15, 2010.
- Herreid, C.F. What Is a Case? *Journal of College Science Teaching*, 27(2): 92-94, 1997.
- Johnston, K. Crawford y Fletcher, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics *International Journal of Science Education*, **20** (4), 427-446, 1998.
- Klopfer, L. E. (1964), The Use of Case Histories in Science Teaching. *School Science and Mathematics*, 64: 660-666.
- Lambert, N., Chen, Y.-N., Li, C.-N., Chen, G.-Y. y Nori, F. Quantum Biology. *Nature Physics*, 9, 10-18, 2013.
- Lederman, N. G., Abd-El-Khalick, F. Bell, R. L., Schwartz, R. S. Views of Nature of Science Questionnaire: Toward Valid and Meaningful Assessment of Learners' Conceptions of Nature of Science, *International Journal of Science Education*, **39** (6), 497-521, 2002.
- Lederman, N. G. Research on Nature of Science: Reflections on the Past, Anticipations of the Future, *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, **7** (1), 2006. Disponible en línea: <http://www.ied.edu.hk/apfslt/>
- Mayring, P. Qualitative content analysis: theoretical foundation, basic procedures and software solution. Klagenfurt, 2014. Disponible en línea <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0168-ssoar-395173>
- Moreira, M. El modelo estándar de la física de partículas *Revista Brasileña de Enseñanza de Física*, **31**(1), 1306, 2009.
- Morris, T. E y Gahl, S. A recipe for invention: Scientists biographies. *National Center for Case Study in Science Teaching* Disponible en línea. <http://sciencecases.lib.buffalo.edu> 2003.
- Muller, R. y Wiesner, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics*. 70, 200-209, 2002.
- Niaz, M. *Critical Appraisal of Physical Science as a Human Enterprise. Dynamics of Scientific Progress. Dordrecht: Springer.* 2009.
- Padilla, K. y Van Driel, J. H. Relationships among cognitive and emotional knowledge of teaching quantum chemistry at university level, *Educación Química*. 2012.
- Sandoval, W. Understanding students' practical epistemologies and their influence on learning through inquiry. *Science Education*, 89(4), 634-656. 2005.