Análisis de textos escritos de los estudiantes al finalizar una secuencia didáctica para enseñar mecánica cuántica basada en el enfoque de Feynman

Analysis of students' written texts at the end of a didactic sequence to teach quantum mechanics based on the Feynman approach

Análise de textos escritos dos alunos ao finalizar uma sequência didática para ensinar mecânica quântica baseada na abordagem de Feynman

María de los Ángeles Fanaro[1, 3]
mariangelesfanaro@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-9290-5450

Keidy Alejandra Alvarado Puentes[2]
kalvarado@educacionbogota.edu.co
https://orcid.org/0000-0003-0909-3779

Juan Suasnábar[1]
juansuas@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8977-9230

[(1)]Núcleo de Estudios Educacionales y Sociales (NEES) Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
[(2)]Colegio Friedrich Naumann, Secretaria de Educación Bogotá, Colombia.
[(3)]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

Artículo recibido en octubre de 2021, arbitrado en noviembre de 2021 y aprobado en diciembre de 2021

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de los textos producidos por estudiantes del último año de una escuela secundaria colombiana al finalizar una secuencia didáctica de situaciones para enseñar el modelo cuántico del electrón, basado en el enfoque de Feynman. La enseñanza utilizó una metodología didáctica basada en preguntas y tareas, que promovían la conceptualización, en el sentido propuesto desde la Teoría de los Campos Conceptuales de Gérard Vergnaud. En trabajos anteriores se analizó la conceptualización en base a las respuestas de los estudiantes para cada situación de enseñanza. En este trabajo, en cambio, se analizan los textos producidos por los mismos estudiantes, al finalizar la secuencia. De esta forma se tiene una mejor comprensión acerca de cuáles situaciones resultaron favorables para la conceptualización, y cuáles necesitan ser reformuladas en próximas implementaciones. El trabajo contribuye así en la presentación de una metodología original para analizar y conocer el funcionamiento didáctico de la propuesta para enseñar el modelo cuántico del electrón.

***Palabras clave**: análisis textual; análisis de redes; conceptualización; mecánica cuántica; escuela secundaria*

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the texts produced by last year students in a Colombian high school; as the final part of a didactic sequence of situations aimed to teach the quantum model of the electron, based on the Feynman approach. The teaching used a didactic methodology based on questions and tasks, which promoted the conceptualization, in the sense proposed from Gérard Vergnaud's Theory of Conceptual Fields. In previous works, there was an analysis of the conceptualization, based on the students' responses for each taught situation. In this work, on the other hand, the texts produced by the same students are analyzed at the end of the sequence. In this way, there is a better understanding of which situations were favorable for the conceptualization, and which ones needed to be reformulated in future implementations. The work thus contributes to the presentation of an original methodology to analyze and learn about the didactic operation on the proposal to teach the quantum model of the electron.

***Keywords:** textual analysis**;** network, quantum physics; high school*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise dos textos produzidos por estudantes do último ano de uma escola secundária colombiana ao finalizar uma sequência didática de situações para ensinar o modelo quântico do elétron, baseado na abordagem de Feynman. O ensino utilizou uma metodologia didática baseada em questões e tarefas, que promoviam a conceituação, no sentido proposto desde a teoria dos Campos conceituais de Gérard Vergnaud. Em trabalhos anteriores, analisou-se a conceituação com base nas respostas dos estudantes para cada situação de ensino. Neste trabalho, ao contrário, analisam-se os textos produzidos pelos mesmos estudantes, ao finalizar a sequência. Desta forma, tem-se uma melhor compreensão sobre quais situações resultaram favoráveis para a conceitualização, e quais precisam ser reformuladas em próximas implementações. O trabalho contribui, assim, na apresentação de uma metodologia original para analisar e conhecer o funcionamento didático da proposta para ensinar o modelo quântico do elétron.

***Palavras-chave:** análise textual; análise de rede; conceituação; mecânica quântica; ensino médio*

INTRODUCCIÓN

La necesidad de enseñar una física más actual en la escuela, ha sido reclamada desde hace varios años, desde distintas investigaciones (Akarsu, 2010; Cid y Dasilva, 2011; Cuesta y Mosquera, 2016; Fanaro, 2009; Fernández, González y Solbes, 2005; Frechina, 1996; Gil,

Senent y Solbes, 1987; Greca, 2000; Greca y Moreira, 2001; Jaramillo, 2015; Johnston, Crawford y Fletcher, 1998; Martínez, Savall, Doménech, Rey y Rosa, 2016; Monteiro, 2010; Moreno y Guarín, 2010; Muller, 2008; Pantoja, Moreira y Herscovitz, 2013; Savall, 2015; Sinarcas y Solbes, 2013). De nuestra parte, desde hace más de quince años se viene trabajando sobre la forma de enseñar conceptos fundamentales de mecánica cuántica desde un enfoque alternativo y complementario al enfoque tradicional (el formalismo Hamiltoniano canónico, desarrollado previamente por E. Schrödinger, W. Heisenberg y P. Dirac entre 1925 y 1926). De esta forma, nos propusimos el diseño de situaciones didácticas que se fundamenta en el enfoque "Path Integrals" de Richard Feynman para la Mecánica Cuántica (Feynman, 1985) debido a la ventaja que implica para su enseñanza: se enfoca en un modelo accesible a los conocimientos de los estudiantes de nivel secundario porque utiliza un marco geométrico-vectorial (Arlego, 2008). Para conocer el funcionamiento de las secuencias, luego de su implementación, se analizó el proceso de conceptualización, es decir la identificación de las propiedades y características de los sistemas cuánticos como el electron, y la apropiación del modelo que permite la descripción del modelo cuántico. Los trabajos donde se analiza la conceptualización de los estudiantes se encuentran publicados y pueden consultarse en (Fanaro, 2009; Alvarado Puentes, 2021).

En este trabajo se presenta un análisis de los textos escritos por un conjunto de N=117 estudiantes del último año de una escuela secundaria colombiana, a partir de la implementación de una secuencia didáctica (conjunto de situaciones) formulada para enseñar el modelo cuántico para el electrón basado en el enfoque propuesto originalmente por el Físico Richard Feynman (Feynman, 1985; Feynman y Hibss, 1965). La secuencia didáctica completa con sus fundamentos físicos (donde se explican las adaptaciones de la idea original) y didácticos se encuentra ampliamente desarrollada en trabajos anteriores, donde el lector interesado puede remitirse para su comprensión (Arlego, 2008; Fanaro, 2009; Alvarado Puentes, 2021). La secuencia didáctica elaborada en base a este enfoque tuvo como eje vertebrador el análisis del Experimento de la Doble Rendija (EDR) (en su versión simulada con software informático) para analizar el comportamiento cuántico de los electrones, y la universalidad de la mecánica cuántica. Se adaptaron las integrales a sumas de vectores, permitiendo el trabajo geométrico vectorial, utilizando el concepto físico de "acción" que incluye

el concepto de "masa" y la construcción de "caminos" para referirnos a la conexión entre coordenadas, es decir la unión entre una posición inicial y tiempo inicial, a otra posición final, en cierto tiempo final (no es la trayectoria de la partícula, claramente), llamando a esta adaptación técnica de "Considerar los caminos alternativos" abreviado como CCA (Arlego, 2008 y Fanaro, 2009).

Como parte de la adaptación realizada, se plantea el concepto más intuitivo que se puede tener acerca de la probabilidad como la posibilidad de detectar al electrón en cierto lugar de la pantalla, sabiendo que en esta adaptación didáctica no se diferencian los conceptos de probabilidad y densidad de probabilidad, porque requeriría considerar elementos de la Teoría de la medida, con matemática no disponible en nuestros estudiantes, y que además desviarían la atención de lo que se quiere enseñar.

Así, el objetivo de la secuencia didáctica es que los estudiantes comparen los resultados experimentales que se obtienen al realizar el experimento EDR (simulado) y lo propuesto por la técnica CCA, y calculen la probabilidad de detección del electrón. En un curso más avanzado, es claro que se deberán hacer las consideraciones pertinentes acerca de que lo que considera es cómo se distribuyen esas medidas de las detecciones en "intervalos alrededor de cierta distancia x al centro de la pantalla", y que entonces se debe referir a la densidad de probabilidad, ya que se está tratando con una variable continua.

Al finalizar la implementación se solicitó a los estudiantes que elaboraran, en forma personal, una síntesis de lo que a su criterio había sido más relevante en todo el proceso de estudio de mecánica cuántica realizado. Para ello se les indicó que podían utilizar gráficos, esquemas y otros, sin sobrepasar las dos páginas de extensión.

El análisis de los textos escritos, reconocidos como sistemas externos de representación (Martí y Pozo, 2000), ha sido abordado en varias ocasiones como metodología para el estudio del lenguaje para la Educación en Ciencias. Se reconoce que éste puede ser útil para comprender los procesos de aprendizaje de los estudiantes, estableciendo relaciones entre el

análisis del discurso escrito y la comprensión de la evolución conceptual de los estudiantes (Duit, Roth, Komorek, y Wilbers, 1998; Tamayo Alzate, 2001; Figura, Tamayo y Puig, 2005).

Por ejemplo, en el trabajo de Duit *et al*. (1998) se destaca la relación entre el análisis del discurso y el cambio conceptual, considerando además la importancia de las ideas previas y del contexto en la construcción individual y social del conocimiento. En otros casos, se ha explorado la relación entre el discurso escrito y el desarrollo del conocimiento de los estudiantes, destacándose a su vez la importancia de la escritura en la comprensión de nuevos conceptos y en el cambio conceptual (Fellows, 1994). Estos estudios también han permitido conocer las características particulares y las maneras como los profesores utilizan el discurso para orientar y evaluar el proceso de enseñanza-aprendizaje (Edwards y Mercer 1988; Lemke 1997). Estos estudios se escapan a los objetivos de este trabajo.

En esta investigación se tomaron a las palabras y su ubicación y cercanía entre ellas (es decir, la palabra y las cinco palabras inmediatamente anterior y posterior de ella) para tener indicios de lo que para los estudiantes fue clave durante la secuencia, y da orientaciones acerca de qué cuestiones resultaron favorables para el aprendizaje de los estudiantes, y cuáles necesitan ser reformuladas en próximas implementaciones.

MÉTODO

Se recolectaron 117 producciones escritas de los estudiantes las cuales se transformaron a formato digital (.txt) mediante el uso de un reconocedor de voz que elabora un archivo de texto a partir de la lectura en voz alta, para luego poder ser analizadas con el software libre AntConc. Se trata de una herramienta gratuita y multiplataforma que se utiliza para el análisis de corpus textuales.

Por otra parte, se empleó el *software Gephi*, que es una aplicación de código abierto y multiplataforma (Bastian *et al*., 2009) utilizado a menudo para el Análisis de Redes Sociales (ARS), como un modo de acercamiento cuantitativo a los fenómenos sociales. Como señala Sanz Menéndez (2003) *"*es una aproximación intelectual amplia para identificar las estructuras

sociales que emergen de las diversas formas de relación, pero también un conjunto específico de métodos y técnicas" (p.23). Los orígenes del ARS se encuentran en los años 30 y 40, y ha tenido influencias de la antropología, de la sociología y de la matemática, también desde los aportes de la Gestalt y la sociometría, y la teoría de los grafos; desde su comienzo ha tenido una inspiración y metodología claramente estructural, pero desde una perspectiva relacional (Lozares, 1996). El ARS parte de una definición de red amplia:

> Cuando se habla de una Red, se entiende como un grupo de individuos que, en forma agrupada o individual, se relacionan con otros con un fin específico caracterizado por la existencia de flujos de información. Las redes pueden tener muchos o pocos actores y una o más clases de relaciones entre pares de actores. Una Red se compone, por tanto, de tres elementos básicos los cuales son: nodos o actores, vínculos o relaciones, y flujo (Velázquez Álvarez y Gallegos Norman, 2005. p.3).

Como señalan los autores, al momento de pensar una Red es necesario contemplar tres elementos: actores, vínculos y flujos. Dada la perspectiva relacional del ARS no es posible pensar en la existencia de uno de los tres elementos de forma independiente, por ejemplo, la existencia de actores y la ausencia absoluta de vínculos entre ellos (lo que sería lo mismo que señalar existencia de individuos aislados).

Dos grupos de medidas básicas se consideran para el estudio de las estructuras subyacentes de las redes sociales, también llamadas variables estructurales cuya existencia es la que da cuenta de la presencia o no de una red social:

- Estructurales en sentido estricto: relativas a la estructura general; y

- Posicionales: relativas a la posición de cada actor dentro de la red.

Dentro de las primeras, la principal es la densidad del grafo, es decir, la razón entre el número de vínculos existentes en una red y el número máximo posible si todos los nodos estuviesen conectados entre sí al menos una vez, a partir de una escala que va de 0 (inexistencia de relaciones) a 1 (todas las relaciones posibles). La segunda medida importante relativa a la estructura general de la red es el diámetro. Podemos definirlo conceptualmente

como la distancia geodésica -camino entre nodos- más larga entre dos nodos cualquiera de la red. Entre ambas medidas podemos ver cuán conexa es una red.

RESULTADOS

Análisis de las síntesis de los estudiantes por concordancias

El objeto del estudio que se presenta es el de identificar los conceptos que los estudiantes manifestaron como importantes y la manera en que fueron utilizados. Desde nuestra aproximación teórica, consideramos que los diez conceptos clave que la secuencia didáctica planteada buscó desarrollar son los siguientes: *Acción, Ángulo, Suma de vectores, Masa, Caminos, Vectores asociados, electrones, canicas, Probabilidad (de detección), Curva (de probabilidad) máximos y mínimos.*

Para la obtención de términos especializados y relacionados con el tema del corpus, se introdujo previamente una *stop-list* que contiene palabras meramente gramaticales o "vacías" de significado como preposiciones, conjunciones o artículos. Un primer análisis realizado con el *software* libre AntConc, arrojó un listado de las palabras que fueron empleadas por los estudiantes en las síntesis, según su frecuencia de aparición.

Luego de realizar el proceso de lematización (proceso que realizaron los investigadores en forma totalmente manual) el conteo de palabras utilizadas en las 117 síntesis desarrolladas por los estudiantes fue de 21.640 palabras, distribuidas en 2.763 familias de palabras (*tokens*). Un ejemplo de estas familias de palabras es: experimento, experiencia, experimental, experimentado. Del conjunto de palabras más utilizadas en las síntesis de los estudiantes listamos en el cuadro 1, las veinte palabras más utilizadas por ellos, con una frecuencia de uso de 678 veces la primera palabra y 118 la última palabra listada (cuadro 1)

Muchas de estas palabras representan conceptos claves propiamente trabajados en la secuencia, pero algunas otras representan conceptos que serían subsidiarios de la conceptualización pretendida. Por otra parte, conceptos que desde nuestro punto de vista eran

centrales, como “acción” y “masa” presentaron una frecuencia alta (en el análisis de *wordlist* la palabra "acción” fue utilizada en total 105 veces, quedando respectivamente “acción” y “masa” en los lugares 21 y 26 de las palabras más utilizadas) pero, fuera del rango de las 20 más utilizadas, tal y como se decidió acotar para este análisis. Por ejemplo, el concepto de “masa” fue utilizado como mínimo una vez, pero sólo en 34 de las síntesis (alrededor del 35%) y el concepto “acción” fue utilizado al menos una vez en algo más de la mitad de las síntesis, por este motivo no se presenta su análisis. A su vez, como se indicó, existen en esta lista otras palabras que no constituyen conceptos centrales, pero colaboran a la conceptualización como, por ejemplo; “rendija”; “pared”; “resultado”; “observar”.

Cuadro 1. Las veinte palabras más utilizadas por los estudiantes (en su conjunto) durante la síntesis, ordenadas en forma decreciente en frecuencia, según el análisis de Listado de Palabras de AntConc

canica	electrón	caminos	rendijas	gráfica	experimento	máximo	pared	diferente	distribución
678	638	568	503	372	287	258	242	237	232
vector	probabilidad	suma	ángulo	directo	resultado	forma	observar	calcular	cuántica
221	217	194	160	157	148	142	135	119	118

Nota. En la primera fila se presenta la palabra, y en la segunda la frecuencia de uso en las N= 117 síntesis.

Las dos palabras más frecuentes resultaron ser “canica” y “electrón” con una frecuencia de 678 veces y 638 veces respectivamente, y podemos notar que su utilización es entre 5 y 6 veces por síntesis en promedio, lo cual resulta natural puesto que el objeto de la secuencia es el estudio del comportamiento de ambos. Le siguen en orden de frecuencia las palabras “caminos y rendijas" que, en promedio, fueron utilizadas entre 4 y 5 veces por síntesis. Las palabras “vector” “probabilidad” y “suma” se encuentran utilizadas en similar cantidad de veces (en promedio casi dos veces por síntesis), lo cual resulta bueno desde el punto de vista de la importancia asignada por los estudiantes. En el lugar de frecuencia 20 de la lista, notamos la palabra “cuántica” con una frecuencia de 118, indicando que, en promedio, fue utilizada una vez por cada estudiante.

Este primer análisis resultó orientador para conocer globalmente la frecuencia de las palabras que utilizaron los estudiantes, y que hacen referencia a los conceptos; realizamos un análisis de concordancias (utilizando la herramienta “*concordance tool*” de AntConc), para estudiar en qué forma fueron relacionadas las palabras más frecuentes en el corpus de las

síntesis escritas por los estudiantes que resulten también las más próximas a los conceptos que se buscaban conceptualizar, resultando así las concordancias entre los conceptos: experimento - canica - electrón - camino - vector - ángulo - suma - probabilidad - gráfico - máximo.

De esta forma, se construyó la matriz rectangular que se presenta en el cuadro 2. En esta matriz, además de colocar la cantidad de concordancias entre las palabras, se ordenaron según si los conceptos eran relativos a la presentación de los experimentos (canicas, electrones, observación y experimento) con color celeste; si se referían a la técnica de cálculo (camino, directo, vector, ángulo, suma, calcular, probabilidad) con color amarillo; o si se referían a la interpretación de los resultados de la técnica a los experimentos planteados en la secuencia (gráfica, máximos), con color verde.

Cuadro 2. Matriz de doble entrada que forma una matriz donde cada celda indica la cantidad de veces que las familias de palabras se encuentran próximas a una distancia de n=5 (5 palabras a la izquierda o 5 palabras a la derecha)

	canica	electrón	observar	experimento	caminos	vector	probabilidad	suma	ángulo	directo	calcular	gráfica
canica, canicas												
electrón, electrones	118											
experimento, experiencia, experimentado, experimental	55	57	13									
camino	7	45	9	7								
vector, vectores, vectorial	1	4	4	3	51							
probabilidad, probabilidades, probable, probables	17	36	3	6	43							
suma, sumamos, suman, sumando, sumar, sumarlos	4	2	1	1	47	59	6					
ángulo, ángulos	2	2	1	0	48	32	3	22				
directo, directa, directamente, directos	4	10	1	2	176	19	5	13	21			
gráfica, curva, gráfica, graficamos, graficar, graficas	29	18	14	11	10	4	25	6	3	1	2	
máximo, máximos	18	15	10	1	1	4	5	3	4	1	0	19

Nota. Esta distribución fue elegida dado que es la longitud recomendada por los creadores del *software* AntConc.

En el cuadro 2 es posible observar que, con relación a la parte experimental con electrones y con canicas, naturalmente la mayor cantidad de asociaciones se realizó entre los conceptos electrones y canicas (118 concordancias), y aproximadamente el mismo número de concordancias experimento-electrón y experimento-canica (55 y 57 concordancias respectivamente). Interpretamos que la asociación entre estos conceptos es fuerte, dado que; en todas las narraciones, se presenta la relación entre ellos. Un ejemplo de concordancias

experimento-canica y experimento-electrón se presentan en las síntesis del estudiante A69 (gráfico 1).

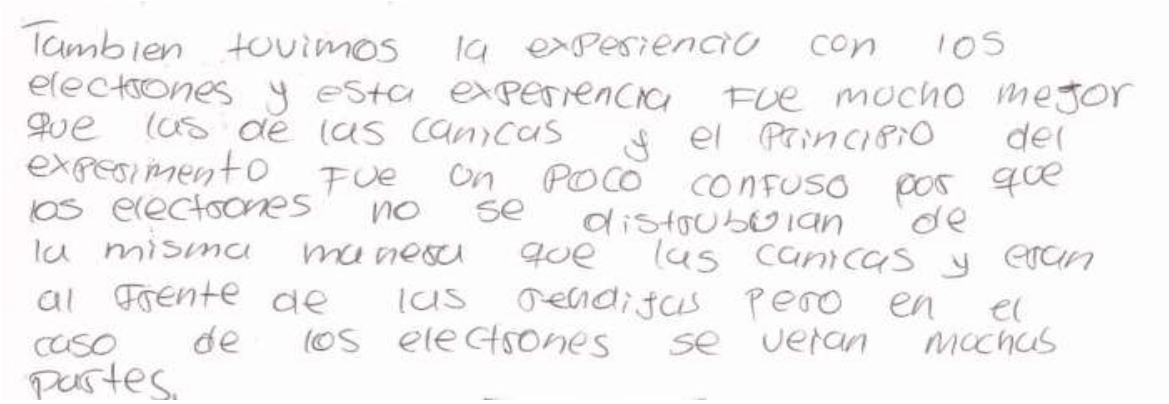


***Gráfico 1*. Síntesis de A69, donde el estudiante presenta una concordancia experimento-canica, así como una concordancia experimento-electrón al indicar un comportamiento diferencial entre ellos.**

En cuanto a los conceptos relativos a la técnica CCA, es posible notar que los estudiantes hicieron un buen número de asociaciones entre el concepto de “suma” con el de “vectores” (59 concordancias), lo cual es muy bueno, aunque en algunas síntesis se sigue haciendo referencia a la suma pero de caminos (en lugar de vectores) lo cual estaría indicando que se presentó en estos casos, obstáculos en la conceptualización, dado que en el proceso de modelación (consecuente con la transposición didáctica implementada) resulta poco natural a los estudiantes poder esclarecer que lo que se suma son vectores, es decir, entes abstractos, aunque estén relacionados a los caminos, no son los caminos en sí.

Se presenta en el gráfico 2, algunos fragmentos de la síntesis A38, donde se encuentran juntos los conceptos de “suma” con “vectores” y a su vez se hace alusión a la contribución a la suma de los distintos grupos de vectores.

Según se muestra en el gráfico 3, en el siguiente fragmento de síntesis se observa que algunos de los estudiantes relacionan los conceptos de suma con caminos (y no de suma de vectores) evidenciando un obstáculo en su conceptualización.

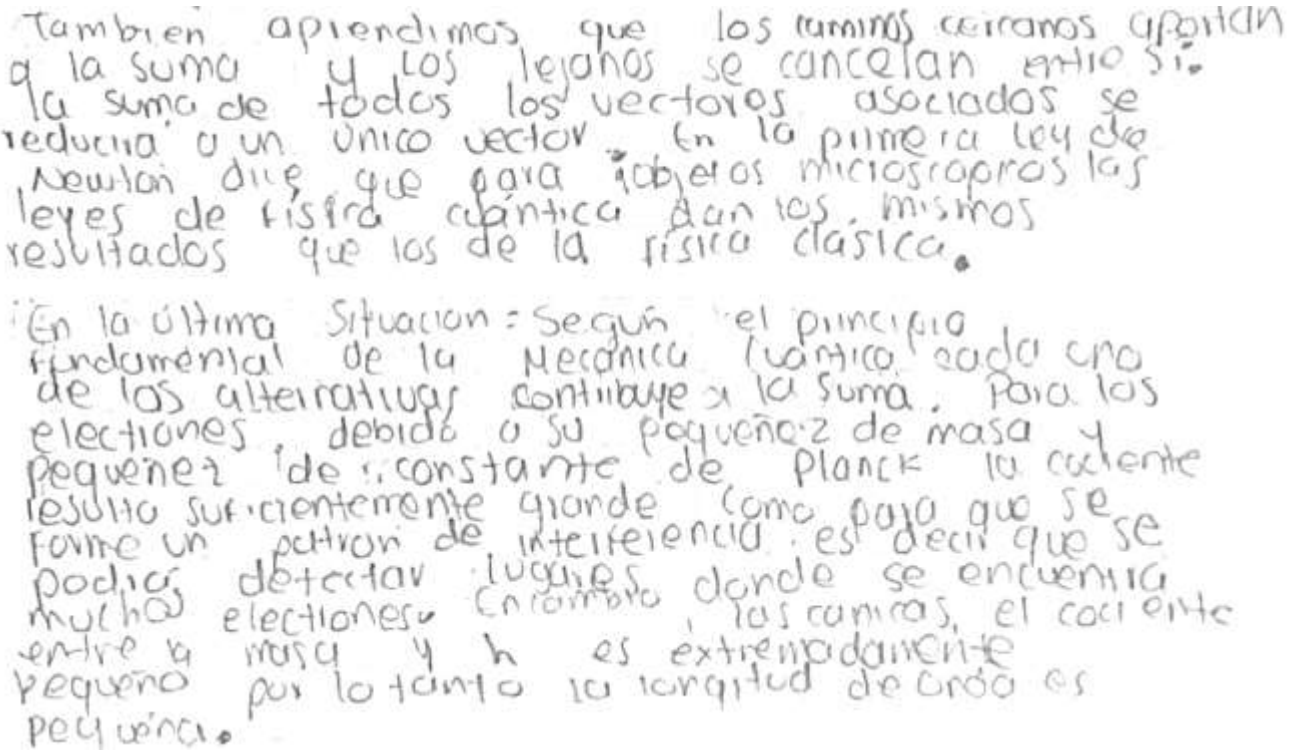


Gráfico 2. **Síntesis de A38, donde el estudiante presenta una concordancia suma-vectores y explica que los vectores asociados a los caminos cercanos son los que aportan a la suma, mientras que los alejados se anulan.**

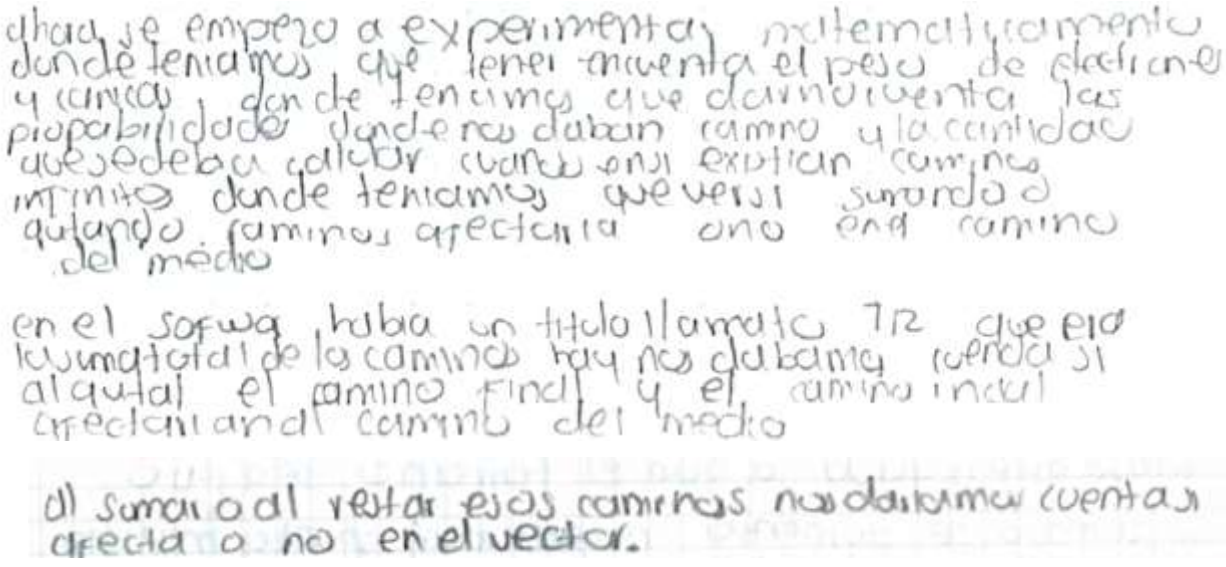


Gráfico 3. **Síntesis de A63. En esta síntesis el estudiante presenta una concordancia suma-caminos.**

También se presentó una gran asociación entre la palabra caminos con la palabra directo (117 concordancias) lo cual estaría indicando una buena conceptualización en un aspecto central de la técnica, que privilegia al camino directo en el aporte para el cálculo de la probabilidad, tanto en el caso de los electrones, como en el de las canicas (ejemplo en el gráfico 4).

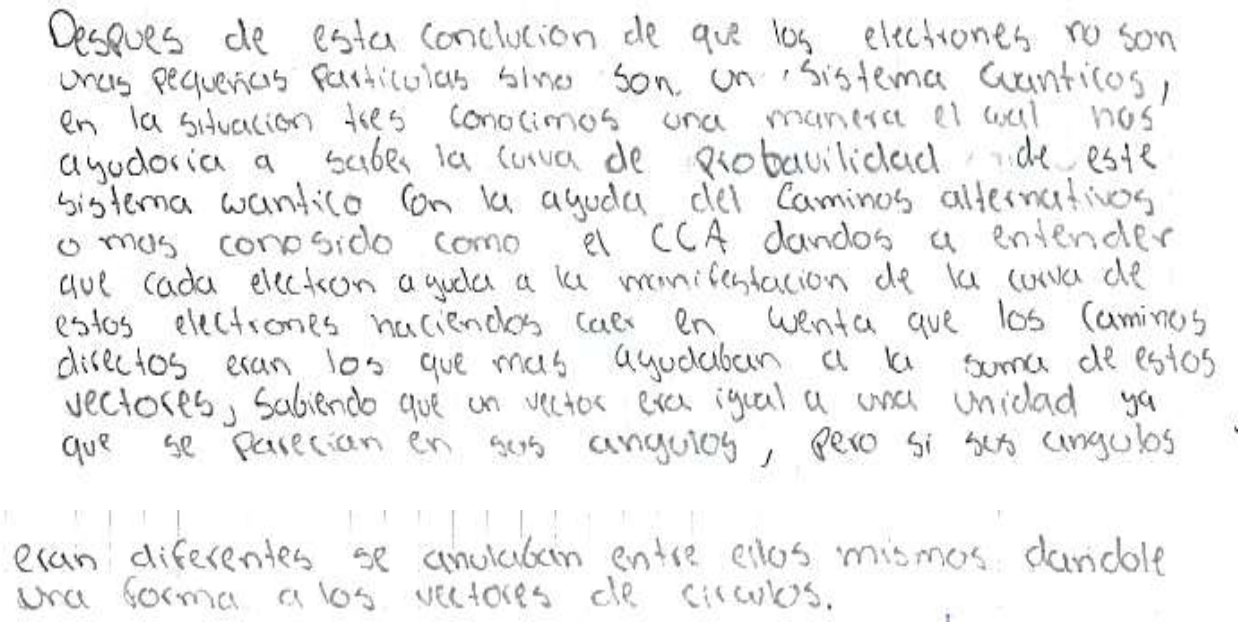

Despues de esta conclucion de que los electrones no son unas pequeñas Particulas sino son un sistema Cuanticos, en la situacion tres conocimos una manera el cual nos ayudaria a saber la curva de probabilidad de este sistema wantico con la ayuda del Caminos alternativos o mas conocido como el CCA dandos a entender que cada electron ayuda a la manifestacion de la curva de estos electrones haciendos caer en cuenta que los Caminos directos eran los que mas ayudaban a la suma de estos vectores, sabiendo que un vector era igual a una unidad ya que se parecian en sus angulos, pero si sus angulos eran diferentes se anulaban entre ellos mismos dandole una forma a los vectores de circulos.

***Gráfico 4*. Síntesis de A5 el estudiante indica que el camino-directo es el que aporta (ayuda) en el cálculo de la probabilidad para el caso de los electrones.**

Finalmente, en relación con la interpretación de los resultados de la técnica CCA al aplicarla en electrones y en canicas, las asociaciones fueron en número similar. Así, se tuvieron para los conceptos de máximo-electrones y máximo-canicas, 18 y 15 concordancias respectivamente, mientras que casi no se presentaron concordancias significativas entre las palabras ángulo y curva de probabilidad (sólo 3), lo cual nos hubiese dado indicios de que fue conceptualizado tal cual esperábamos en la interpretación de la técnica aplicada al caso de la Experimento de la Doble Rendija (EDR) tanto con electrones como con canicas. Dándonos un indicador de la necesidad de enfatizar este aspecto en próximas implementaciones. Los gráficos 5 y 6 muestran ejemplos de algunas de las concordancias encontradas.

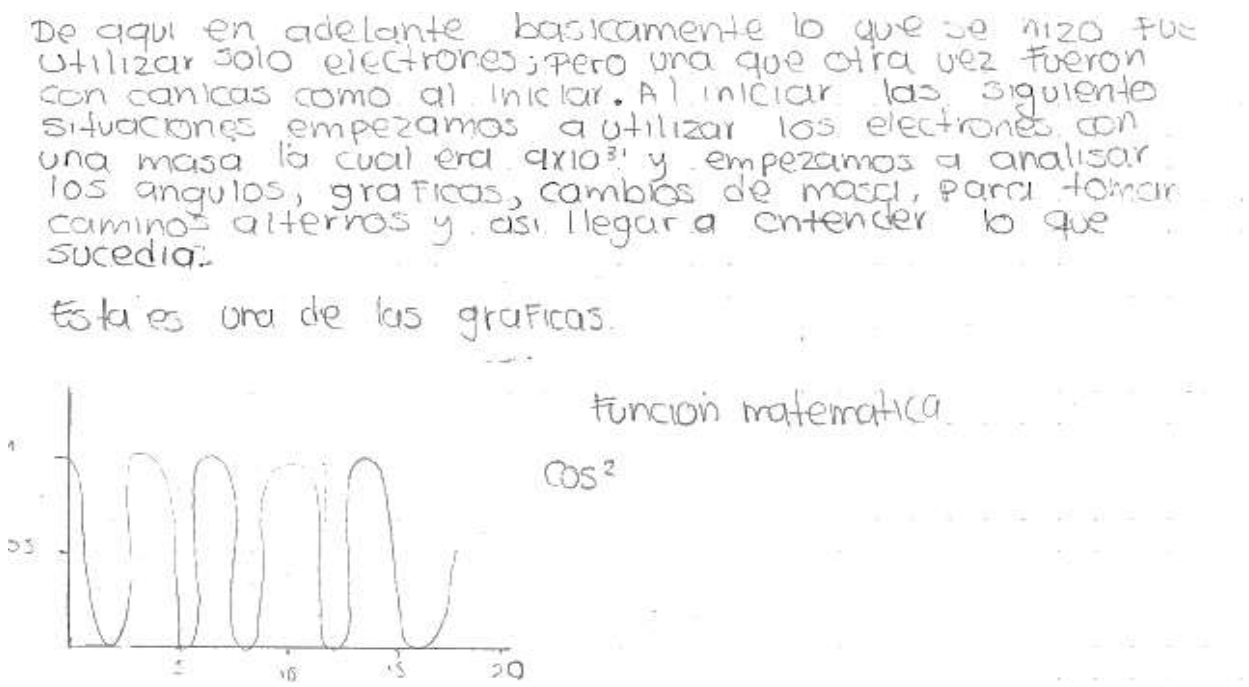


Gráfico 5. **Síntesis de A18. En la cual el estudiante expresa la necesidad de analizar los ángulos y las gráficas para tomar la decisión sobre el comportamiento de los caminos alternativos.**

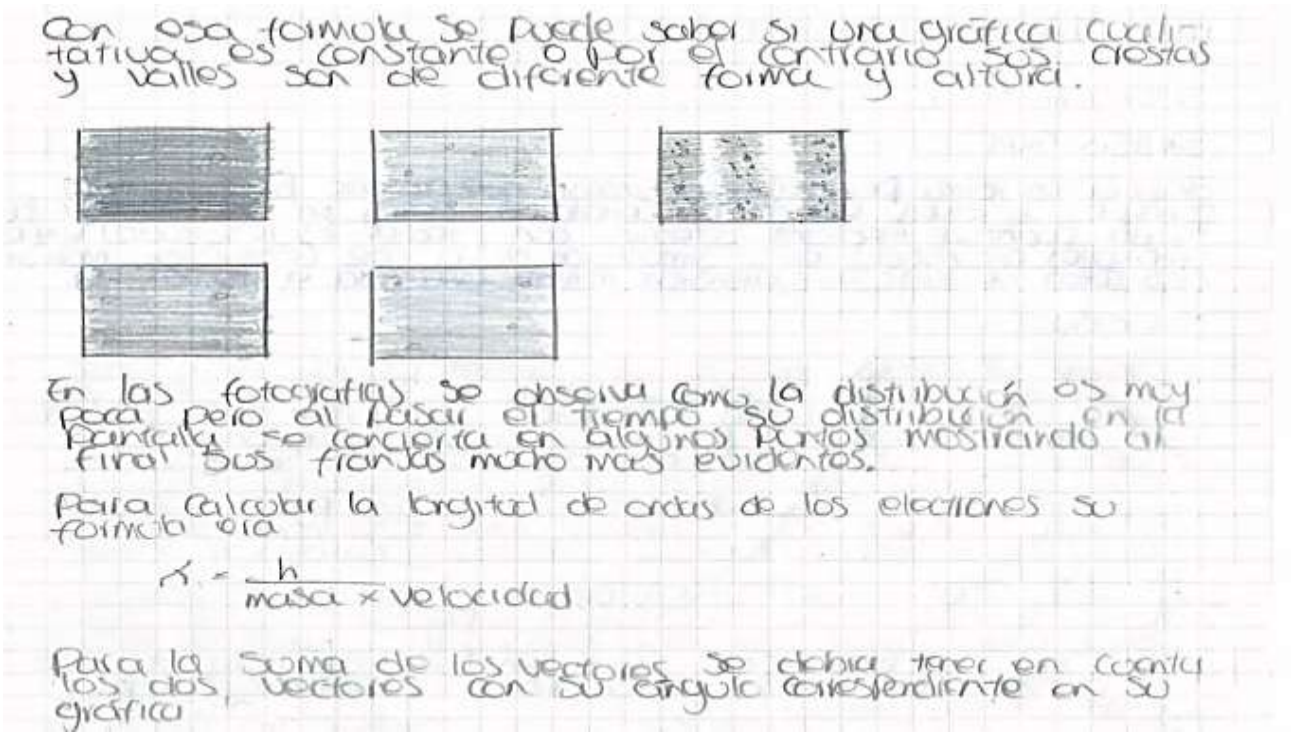


Gráfico 6. **Síntesis A 20. En la cual el estudiante expresa que para la suma de los vectores se debe tener en cuenta el ángulo entre los dos vectores y su gráfica.**

Resultado del análisis de REDES de conceptos con *Gephi*

A partir de la tabla de concordancias, se realizó un análisis de redes en el *software Gephi,* obteniéndose como resultado un grafo no dirigido (donde la arista (a, b) = (b, a)) de 14 nodos y 85 aristas. Eso se representa en el grafo obtenido que se muestra en el Gráfico 7. Este es un grafo muy conexo, ya que posee una densidad de 0,934 y un diámetro de 2. Las aristas representan la 'concordancia' entre términos, es decir la cercanía de estos conceptos en una frase de cada síntesis escrita por los estudiantes. Luego, el tamaño de los nodos viene dado por el grado de cada nodo, en donde, la cantidad de relaciones que posee, es decir los nodos más grandes son los más vinculados; así también el tamaño de las etiquetas de nodos. En este caso, es posible notar que las palabras “electrón”, “vector”, “directo”, “gráfica”, “suma”, “camino” y “probabilidad” son las que más vinculaciones entre sí tienen en los textos de los estudiantes. Respecto de las aristas, el grosor de la arista está dado por el peso, que es en sí la frecuencia de aparición del vínculo (concordancia). Como puede observarse en el grafo, los vínculos más fuertes fueron entre “camino” y “directo”, y entre “canicas” y “electrón”. Es decir, se dio prioridad al camino directo y a la relación electrón-canica, enfatizada desde la secuencia didáctica en tanto a establecer su diferencia.

Luego, a partir de la aplicación del cálculo de *Modularity Class* se identifican dos comunidades por cercanía al interior del grafo, que son las que están representados por los dos colores: rosa y verde (gráfico 7). En este caso, nuestra interpretación es que ambas comunidades de conceptos pertenecen a las dos fases bien diferenciadas de la secuencia: por un lado, los conceptos relativos a la técnica de Sumar los Caminos alternativos, que implica los conceptos de caminos, vector, cálculo, ángulo, suma y probabilidad. Por otro lado, la otra comunidad relaciona los conceptos relativos al experimento de la doble rendija con canicas y con electrones: experimento, máximo, distribución. Atribuimos estas dos comunidades de conceptos, bien relacionadas al interior de cada una, pero bien diferenciadas una de la otra, a la dificultad de los estudiantes en conceptualizar la modelización. Es decir, interpretamos la presencia de dos comunidades de palabras como la dificultad para relacionar lo que el modelo predice, y describe con los resultados en sí, tal cual muestra el experimento, como si teoría (el

modelo científico adaptado) y realidad (observación de resultados del experimento) fueran hechos totalmente separados.

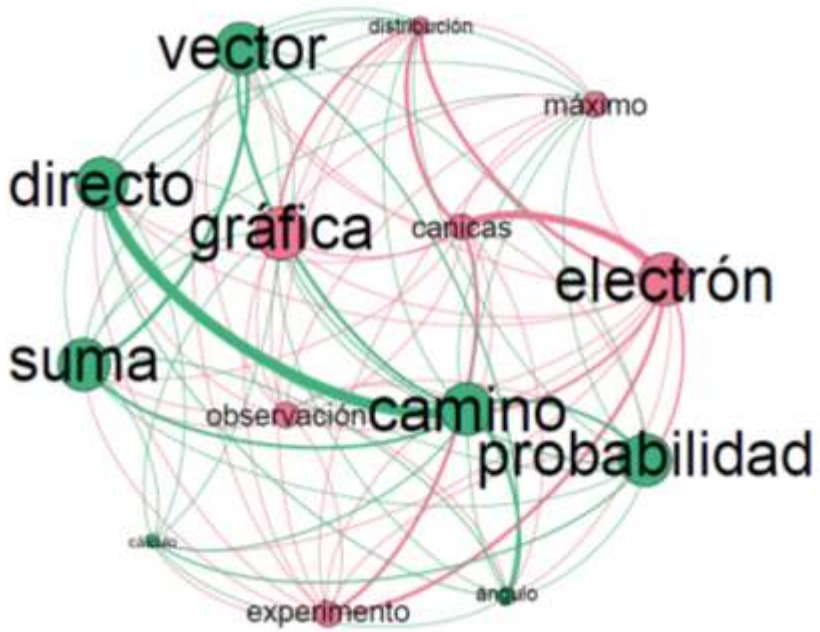


***Gráfico 7*. Grafo obtenido con *Gephi* a partir de las concordancias entre las palabras más utilizadas en las síntesis de los estudiantes.** *Nota.* Los colores rosa y verde representan las dos comunidades de conceptos identificadas por el *software*.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta, por un lado, una metodología de análisis que proviene de otras áreas del saber, como lo es el análisis textual y el análisis de redes sociales, y muestra su potencial para la investigación en la enseñanza de las Ciencias, en este caso, da indicios sobre los conceptos que resultaron más importantes para los estudiantes. Por otro lado, se muestra cómo los resultados obtenidos con esta metodología de análisis resultan ser compatibles con otras metodologías más cualitativas y descriptivas, como lo fue el estudio de la conceptualización realizado previamente, en base a la identificación de teoremas y conceptos en acto que pudieron guiar la resolución de las actividades por parte de los estudiantes.

Luego de realizar el análisis textual de lo que escribieron los estudiantes al momento de finalizar la secuencia con los dos instrumentos (*AntConc y Gephi*) los resultados obtenidos son

complementarios y nos permiten afirmar que los estudiantes utilizaron e hicieron referencia a los conceptos científicos que fueron objeto de la implementación tales como: experimento - canica - electrón - camino - vector - ángulo - suma - probabilidad - gráfico – máximo.

Además, se encontraron concordancias que dan evidencia de desarrollos en la conceptualización a lo largo de toda la secuencia, de las cuales en las síntesis se encuentran referencias a:

• Presentación de las experiencias EDR (canicas, electrones, observación y experimento).

• Uso y aplicación de la técnica de cálculo CCA (camino, directo, vector, ángulo, suma, calcular, probabilidad).

• Interpretación de los resultados de la técnica CCA a las experiencias planteadas en la secuencia (gráfica, máximos).

Por otra parte, este análisis nos muestra la presencia de un obstáculo en la conceptualización en relación con la interpretación del modelo, el cual representa de alguna forma a la realidad pero que no es en sí ella misma. Así desde la perspectiva de Adúriz, Bravo, y Morales (2002), se presentan obstáculos en la conceptualización debido al número de operaciones de transposición que sufren los modelos científicos para llegar a ser modelos didácticos. En este caso, a un punto de detección del electrón al que llamamos camino se le asigna un vector cuya magnitud no cambia, pero al que sí le cambia su dirección, según sea el valor de la acción el cual luego se suma con los vectores asociados a los otros caminos. Lo que los estudiantes terminan expresando varias veces es que las operaciones de suma se hacen con los caminos y no con los vectores que los caminos tienen asociados. Esto nos lleva a reflexionar sobre la necesidad de desarrollar nuevas implementaciones insistiendo dentro de la secuencia sobre este nivel de abstracción, soportado en el trabajo del profesor quien debe estar atento a la presencia de estos posibles obstáculos en el desarrollo conceptual del

aprendizaje de los estudiantes, en este campo conceptual y en casi todos los demás, ya que la modelización es la esencia de la ciencia.

REFERENCIAS

Adúriz-Bravo, A. y Morales, L. (2002). El concepto de modelo en la enseñanza de la Física – consideraciones epistemológicas, didácticas y retóricas. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 19, 1, 76-88.

Akarsu, B. (2010). Einstein's redundant triumph "quantum physics": An extensive study of teaching/learning quantum mechanics in college. Lat. Am. J. Phys. Educ., 3(2), pág. 273-285.

Arlego, M. (2008). Los fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela secundaria utilizando el concepto de integral de camino. *Revista electrónica de investigación en educación en ciencias*, 3 (1) 59-66

Alvarado Puentes, K. y Fanaro, M. A. (2019) Conceptualización del modelo cuántico para el comportamiento de los electrones según el enfoque de Feynman. *Revista Científica* Número especial

Alvarado Puentes, K. y Fanaro, M. A. (2020a) La conceptualización de un grupo de estudiantes de la escuela secundaria del comportamiento de los electrones según el enfoque de Feynman: un análisis de correspondencias múltiples. *Revista Tecné, Episteme y Didaxis: TED*. (En prensa)

Alvarado Puentes, K. y Fanaro, M. A. (2020b) Técnica de cálculo de probabilidad para la distribución de los electrones en el experimento de la doble rendija: análisis de la conceptualización. *Revista Enseñanza de la Física* 32.15-23

Alvarado Puentes, K. (2021) Enseñanza y aprendizaje de aspectos fundamentales de Física Cuántica en la escuela secundaria colombiana a partir del enfoque de Feynman. Tesis Doctoral. Doctorado en Enseñanza de las Ciencias Mención Física. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Accesible en https://www.ridaa.unicen.edu.ar/xmlui/handle/123456789/2899

Bastian M., Heymann S., Jacomy M. (2009). Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. International AAAI Conference on Weblogs and Social Media. Accesible en: https://gephi.org/users/publications/

Cid, M. y Dasilva, A. (2011). Modelos atómicos: ¿Ensino contextualizado? *Boletim das ciências*, 24(73), 1-23

Cuesta, Y. y Mosquera, C. (2016). Algunas re-flexiones en torno a las implicaciones de la ndc en educación en ciencias: el caso de la enseñanza de la mecánica cuántica. *Tecné, Episteme y Didaxis*, ted, número extraordinario, 867-873

Duit, R.; Roth, W.M.; Komorek, M. y J. Wilbers (1998). Conceptual change cum discourse analysis to understand cognition in a unit on chaotic systems: towards an integrative persepctive on learning science. *International Journal of Science Education*, 20(9), 1059-1074

Edwards, D. y Mercer, N. (1988). El conocimiento compartido: el desarrollo de la comprensión en el aula. Barcelona: Paidós

Fanaro, M. (2009). *La enseñanza de la mecánica cuántica en la Escuela Media* (tesis de doctorado). Universidad de Burgos, Burgos, España. Accesible en http://hdl.handle.net/10259/109

Fellows, N. J. (1994). A window into thinking: Using students writing to understand conceptual change in science learning. *Journal of Research in Science Teaching*. 31, 9. 985 - 1001

Fernández, P., González, E. y Solbes, J. (2005). Evolución de las representaciones docentes en la física cuántica. *Enseñanza de las Ciencias*, número extra, 1-5

Feynman, R. (1985) *QED The strange theory of light and matter*. Penguin Books. USA: Princeton University Press

Feynman, R. y Hibss A. (1965) *Quantum Mechanics and Path Integrals*. McGraw-Hill, Inc. USA.

Frechina, J. (1996). El uso de los textos originales de los científicos y sus dificultades en el caso de la enseñanza de la mecánica cuántica. Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, 10(1), pág. 93 - 100

Gil, D., Senent, F. y Solbes, J. (1987). La introducción a la física moderna: un ejemplo paradigmático de cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, número extra (1), 209 - 210

Greca, I. (2000). ¿Es posible hacer comprensible la mecánica cuántica? *Revista de Enseñanza de la Física*, *13*(2), 13 - 19

Greca, I. y Moreira, M. (2001). Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. *Investigações em Ensino de Ciências*, *6*(1), 29-56

Jaramillo, J. (2015). Implementación de una propuesta didáctica apoyada en el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (tic) para la enseñanza y el aprendizaje de la Mecánica Cuántica Funda- mental (mcf) en el nivel medio en Colombia (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Johnston, I., Crawford, K. y Fletcher, P. (1998). Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, 20(4), 427 - 446

Lemke, J. L. (1997). *Aprender a hablar ciencia.* Barcelona: Paidós. Trad. Ana García et al. Talking science: language, learning and values. Norwood: Ablex Publishing Corporation

Lozares, C. (2006). La teoría de redes sociales. *Papers Revista de Sociología,* 4

Martí, E. y Pozo, J. (2000). Más allá de las representaciones mentales: la adquisición de los sistemas externos de representación. *Infancia y Aprendizaje: Journal for the Study of Educationand Development*, 23:90, 11-30. Disponible en http://dx.doi.org/10.1174/021037000760087946

Martínez, J., Savall, F., Doménech, J., Rey, A. y Rosa, S. (2016). La enseñanza problematizada de la física cuántica en el nivel introductorio. Una propuesta fundamentada. Revista de Enseñanza de la Física, *28*(2), 77 - 100

Monteiro, M. (2010). Discursos de profesores e de livros didáticos de física do nível médio e|m abordagens sobre o ensino da física moderna e contemporânea: al- gumas implicações educacionais (tesis doctoral). Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Brasil

Moreno, H. y Guarín, E.D. (2010). Nociones cuánticas en la escuela secundaria: Un estudio de caso. Lat. Am. J. Phys. Educ, *4*(3), 669 - 676

Muller, D. (2008). Designing effective multimedia for physics education (tesis doctoral). University of Sydney, Sydney, Australia

Pantoja, G., Moreira, M. y Herscovitz, V. (2013). La enseñanza de conceptos fundamentales de mecánica cuántica a alumnos de graduación en física. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, *9*(1), 22-39

Sanz Menéndez, L. (2003). Análisis de Redes Sociales: o cómo representar las estructuras sociales subyacentes. *Unidad de Políticas Comparadas* (CSIC) Documento de Trabajo 03 07. Julio, 2003

Savall, F. (2015). L'ensenyament problematitzat de la física quàntica en batxillerat com a instrument de millora de l'aprenentatge (tesis de doctorado). Universidad de Alicante, Alicante, España

Sinarcas, V., y Solbes, J. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, *31*(3), 9 - 25

Tamayo Alzate, O. A. (2001). *El análisis del discurso escrito y la comprensión de la evolución conceptual de los estudiantes*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. Disponible en https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/4688/oeta1de3.pdf?sequence=1&isAllowed

Tamayo, O y Puig, N. (2005). Características del discurso escrito de los estudiantes en clases de ciencias. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*. 3. 85 -110

Velázquez Álvarez, A. y Aguilar Gallegos, N. (2005) *Manual Introductoria al Análisis de Redes Sociales*. México: Universidad Autónoma del Estado de México. Centro de Capacitación y Evaluación para el Desarrollo Rural S.C

Vergnaud, G. (1990). *La théorie des champs conceptuels, Recherches en Didactique des Mathématiques*. *10* (2/3). La Pensée Sauvage, Marseille