

MONOGRÁFICO

Modelización y argumentación en la enseñanza de las Ciencias Experimentales

# ANÁLISIS SISTÉMICO DE LA EVOLUCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL MODELO ELÉCTRICO DE LOS ESTUDIANTES: CONTROL, ESTRUCTURAS Y PROCESOS

Recepción: 16/09/2018 | Revisión: 10/12/2018 | Aceptación: 08/02/2019

**Cristian MERINO**Pontificia Universidad  
Católica de Valparaíso  
cristian.merino@pucv.cl**Patricia MOREIRA**Pontificia Universidad  
Católica de Chile  
pmmoreira@uc.cl**Ainoa MARZABAL**Pontificia Universidad  
Católica de Chile  
amarzabal@uc.cl

**Resumen:** Los currículos de Ciencias señalan la relevancia de comprender los fenómenos eléctricos, debido a las múltiples aplicaciones tecnológicas actuales basadas en la electricidad. Sin embargo, los estudiantes tienen dificultades para comprender la naturaleza electromagnética de la materia, y se requieren evidencias empíricas de las formas en que las ideas de los estudiantes se van transformando a medida que adquieren experiencia y conocimiento conceptual sobre electricidad. Este estudio se focaliza en el análisis de las explicaciones de estudiantes de secundaria sobre fenómenos eléctricos, con el propósito de caracterizar la evolución de sus modelos expresados durante una secuencia didáctica basada en fenómenos de electrificación. La propuesta de análisis cualitativo, desde una perspectiva sistémica, identifica los componentes de estructura, proceso y control referidos por los 30 estudiantes de la muestra, en las explicaciones de cinco fenómenos observados, caracterizando la evolución del modelo eléctrico de los estudiantes. Nuestros resultados muestran que las trayectorias de aprendizaje de los estudiantes son poco convergentes y presentan discontinuidades. La descomposición del modelo eléctrico nos ha permitido evidenciar que los estudiantes construyen modelos limitados por los procesos observados, y tienen dificultades para transitar al nivel microscópico, lo que puede contribuir a orientar la selección de fenómenos por parte de los profesores para lograr procesos de modelización más efectivos.

**Palabras clave:** modelización; modelo eléctrico; estructura; control; proceso.

**SYSTEMIC ANALYSIS OF THE EVOLUTION OF THE COMPONENTS OF THE ELECTRICAL MODEL OF THE STUDENTS: CONTROL, STRUCTURES AND PROCESSES**

**Abstract:** Science curricula indicate the relevance of understanding electrical phenomena, due to the multiple current technological applications based on electricity. However, students have difficulty understanding the electromagnetic nature of matter, and empirical evidence is required of the ways in which students' ideas are transformed as they gain experience and conceptual knowledge about electricity. This study focuses on the analysis of secondary school students' explanations of electrical phenomena, with the purpose of characterizing the evolution of their models expressed during a didactic sequence based on electrification phenomena. The proposal of qualitative analysis, from a systemic perspective, identifies the structure, process and control components referred by the 30 students of the sample, in the explanations of five observed phenomena, characterizing the evolution of students' electrical model. Our results show that the learning trajectories of students are not convergent and present discontinuities. The decomposition of the electrical model has allowed us to show that students build models limited by the observed processes, and have difficulties to move to the microscopic level, which can help to guide the selection of phenomena by teachers to achieve more effective modeling processes.

**Keywords:** modelling; electric model; structure; control; process.

**ANÀLISI SISTÈMICA DE L'EVOLUCIÓ DELS COMPONENTS DEL MODEL ELÈCTRIC DELS ESTUDIANTS: CONTROL, ESTRUCTURES I PROCESSOS**

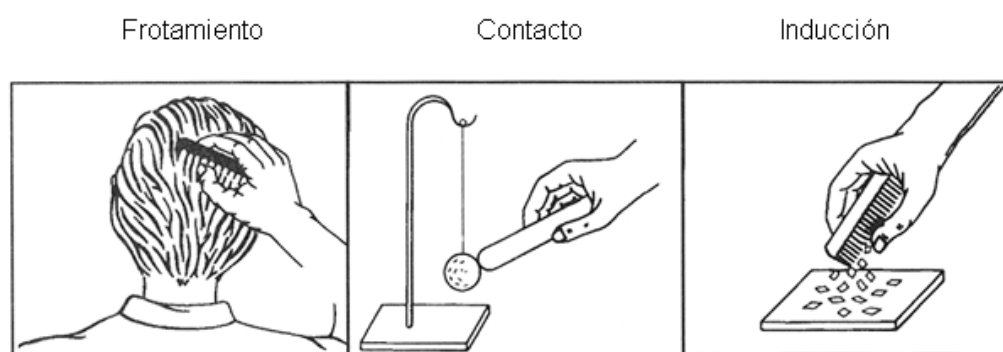
**Resum:** Els currículums de Ciències assenyalen la rellevància de comprendre els fenòmens elèctrics, a causa de les múltiples aplicacions tecnològiques actuals basades en l'electricitat. No obstant això, els estudiants tenen dificultats per comprendre la naturalesa electromagnètica de la matèria, i es requereixen evidències empíriques de les formes en què les idees dels estudiants es van transformant a mesura que adquireixen experiència i coneixement conceptual sobre electricitat. Aquest estudi es focalitza en l'anàlisi de les explicacions d'estudiants de secundària sobre fenòmens elèctrics, amb el propòsit de caracteritzar l'evolució dels seus models expressats durant una seqüència didàctica basada en fenòmens d'electrificació. La proposta d'anàlisi qualitativa, des d'una perspectiva sistèmica, identifica els components d'estructura, procés i control referits pels 30 estudiants de la mostra, en les explicacions de cinc fenòmens observats, caracteritzant l'evolució del model elèctric dels estudiants. Els nostres resultats mostren que les trajectòries d'aprenentatge dels estudiants són poc convergents i presenten discontinuïtats. La descomposició del model elèctric ens ha permès evidenciar que els estudiants construeixen models limitats pels processos observats, i tenen dificultats per transitar al nivell microscòpic, el que pot contribuir a orientar la selecció de fenòmens per part dels professors per aconseguir processos de modelització més efectius.

**Paraules clau:** modelització; model elèctric; estructura; control; procés.

## Introducción

Como muchos de los fenómenos físicos que se abordan durante la enseñanza secundaria, el estudio de la electricidad posee sus orígenes en la antigua Grecia. Hacia el año 600 a. C, Tales de Mileto observó que si frotaba un trozo de ámbar (resina vegetal fósil), este cuerpo adquiriría una nueva propiedad: atraer pequeños objetos. Desde las primeras interpretaciones de los filósofos griegos, que asociaban la atracción o repulsión entre objetos a teorías animistas (Furió y Guisasaola, 1998), hasta las actuales que se sitúan en el nivel atómico (Lewin, 2012), se han ido construyendo explicaciones tentativas a estos fenómenos que han ido contribuyendo, a lo largo de la historia, a la construcción de la noción actual de campo eléctrico (Viennot, 2001). Considerando sus múltiples aplicaciones tecnológicas y su permanencia en la vida adulta, el modelo eléctrico es uno de los modelos científicos escolares presentes en la mayoría de los currículums de ciencia en la educación secundaria (Guisasaola, 2014). Como parte de las teorías electromagnéticas, el modelo eléctrico permite explicar la conductividad eléctrica de los materiales, interpretar fenómenos electrostáticos por contacto, inducción y polarización, y establecer relaciones entre intensidad, diferencia de potencial, resistencia o potencial eléctrico en circuitos eléctricos (Marzabal Blancafort e Izquierdo-Aymerich, 2017).

La frotación, el contacto o la inducción, al ser tópicos fáciles de demostrar en el aula en comparación con otros experimentos de electromagnetismo, aparecen de forma recurrente en los libros de texto (Figura 1) (Marzabal Blancafort e Izquierdo-Aymerich, 2017). Sin embargo, su interpretación requiere un nivel de abstracción que permita al estudiante comprender la naturaleza electromagnética de la materia (Borges y Gilbert, 1999) y representarla de forma verbal o icónica (Gilbert y Justi, 2016; Taber, 2018).



Un cuerpo adquiere energía eléctrica de diversas formas.

Figura 1. Imagen texto escolar.  
Fuente: Texto escolar.

Para fomentar una comprensión sólida de la naturaleza electromagnética de la materia, los estudiantes deben comenzar a construir el concepto de campo eléctrico observando y explicando las interacciones entre cuerpos cargados y neutros (Park, Kim, Kim y Lee, 2001; Viennot, 2001). Se espera que, a partir de la observación de diversos fenómenos de inducción electromagnética, el modelo eléctrico de los estudiantes se transforme, acercándose progresivamente a las teorías

electromagnéticas actuales. Sin embargo, las evidencias de aprendizaje de los estudiantes, a través de las explicaciones que proporcionan de los fenómenos eléctricos, muestran movimientos hacia adelante y hacia atrás, y con frecuencia revelan desarrollos que van en la dirección opuesta a la prevista por los profesores (Duit y Von Rhöneck, 1998).

Tanto para este como para otros fenómenos que tienen una alta complejidad por su nivel de abstracción, explicación y visualización (Talanquer, 2011), se requieren evidencias empíricas de las formas en que las ideas de los estudiantes se van transformando a medida que adquieren experiencia y conocimiento conceptual (Borges y Gilbert, 1999; Merino y Sanmartí, 2008). En este contexto, este estudio se focaliza en el análisis de las explicaciones de estudiantes de Secundaria sobre fenómenos eléctricos, con el propósito de caracterizar la evolución de sus modelos expresados durante una secuencia didáctica basada en fenómenos de electrización.

## 1. El modelo eléctrico escolar

Un modelo científico es toda representación, utilizando cualquier modo semiótico, que permita pensar, hablar y actuar con rigor y en profundidad sobre un sistema en estudio (Halluon, 2004). Así, los modelos pueden considerarse como las unidades básicas del razonamiento del científico, que permiten comprender la situación que se está investigando y anticiparse a los hechos (Nersessian, 2008).

En el contexto didáctico los modelos científicos son adaptados por los docentes de acuerdo a la actividad científica escolar (Izquierdo-Aymerich y Adúriz-Bravo, 2003). Los estudiantes, al ser enfrentados a la tarea de interpretar un fenómeno específico, construyen representaciones que desde nuestro punto de vista pueden ser entendidos como modelos mentales, que agrupan conceptos, experiencias, analogías, relaciones, palabras, valores, etc., se espera que vayan evolucionando, aproximándose progresivamente al modelo científico escolar presentado por el profesor (Merino y Sanmartí, 2008; Sanmartí, 2002). Estos modelos son generalmente inestables e incompletos, y se expresan a través de las explicaciones, argumentaciones y predicciones que producen los estudiantes (Gilbert y Justi, 2016).

A lo largo de la escolaridad los modelos iniciales de los estudiantes evolucionan como resultado de las interacciones entre estudiantes, profesor y recursos de aprendizaje (Acher, Arcà, Sanmartí, 2007). Cuando estas interacciones favorecen la generación, aplicación y evaluación de los modelos de los estudiantes, promueven procesos productivos de transformación de sus modelos (Gilbert y Justi, 2016; Louca, Zacharias y Constantinou, 2011). El proceso descrito anteriormente se conoce como modelización, y su desarrollo exige toda una gama de capacidades descritas por Lopes y Costa (2007). En esta línea los avances de diversos autores han aportado esquemas destinados a orientar los procesos de modelización (Gilbert y Justi, 2016; Halloun, 2004; Merino e Izquierdo-Aymerich, 2011; Schwartz, Sadler, Sonnert y Tai, 2009). Entre ellos destacamos los propuestos por Gilbert y Justi (2016) y Schwartz y otros (2009), quienes postulan una serie de etapas para la modelización que se fundamentan en el socio constructivismo y operan de un modo cíclico.

co y recurrente, que en ambos casos involucran procesos de generación, aplicación, evaluación y transferencia de los modelos para favorecer su evolución, en la medida en que el modelo mental de los estudiantes se va reconstruyendo para lograr un mejor ajuste a los fenómenos observados (Nersessian, 2008).

En el contexto del modelo eléctrico, el desafío de los estudiantes es transformar su modelo intuitivo, situado generalmente en el nivel macroscópico, para transitar hacia el nivel microscópico, de tal manera que puedan explicar los fenómenos electrostáticos usando los tres niveles de representación: macroscópico, microscópico y simbólico (Figura 2) (Guisasola, 2014).

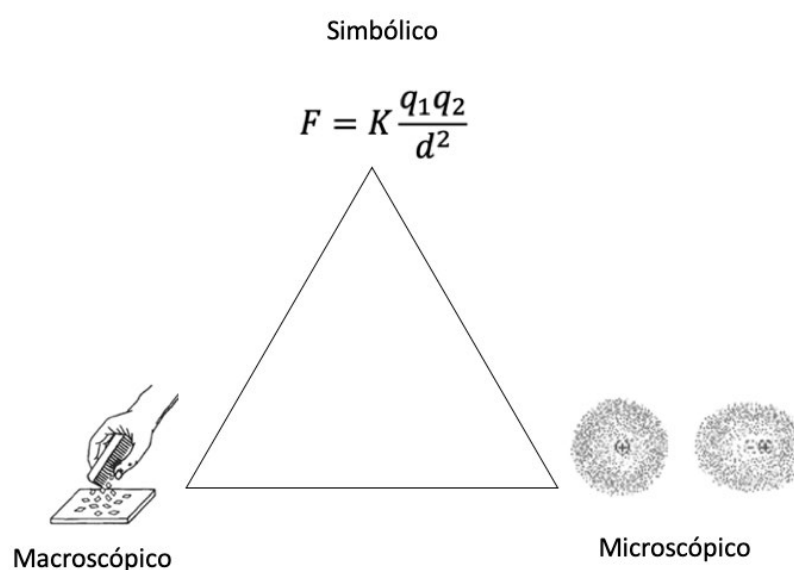


Figura 2. Niveles de representación del modelo eléctrico.  
Fuente: elaboración propia a partir de dibujos presentes en textos escolares.

Hasta la fecha, no hemos encontrado en la literatura trabajos que hayan identificado, específicamente, de qué manera se produce este tránsito hacia la visualización microscópica para el modelo eléctrico; sin embargo, sí existen trabajos que han caracterizado los modelos científicos escolares para explicar fenómenos eléctricos fundamentales. Estos estudios coinciden en observar semejanzas entre el desarrollo del pensamiento de los estudiantes y el desarrollo histórico del concepto de campo eléctrico (Furió y Guisasola, 1998; Guisasola, 2014), y consideran que el análisis histórico de cómo la ciencia se ha desarrollado en este campo particular permite inferir posibles categorías para comprender la evolución de las ideas de los estudiantes en el desarrollo del modelo eléctrico (Furió, Guisasola y Almudi, 2004). En la Tabla 1 se presentan los modelos científicos usados históricamente para explicar fenómenos eléctricos fundamentales, considerando los referentes empíricos incorporados y no incorporados en cada uno de ellos (Guisasola, 2014).

Modelo	Descripción	Referentes empíricos incorporados	Referentes empíricos no incorporados
Effluvia (Gilbert, s. XVI)	Carga eléctrica como una propiedad de los objetos que aparece al frotarlos con cuerpos “eléctricos” (vidrio y ámbar), y que produce la atracción de objetos livianos.	Carga por frotación. Atracción de objetos cargados. Atracción de objetos livianos. Materiales eléctricos y no eléctricos.	Repulsión. Signos en la carga eléctrica. Transferencia de electricidad. Carga por contacto, por inducción y polarización.
Fluido eléctrico (Gray, s. XVIII)	Electricidad como un fluido eléctrico que puede ser transferido de un cuerpo a otro, dándole la capacidad de atraer o repeler cuerpos livianos.	Carga por contacto Atracción y repulsión El exceso o falta de carga se asocia a + y - Materiales conductores y no conductores.	Fuerza eléctrica (interacción a distancia) se atribuye a una “atmósfera eléctrica”. Carga por inducción y polarización.
Acción a distancia (Aepinus, Priestley, Coulomb, s. XIX)	Electricidad como conjunto de cargas (flujo de electrones) que interactúan a distancia de acuerdo con la ley de Coulomb.	Carga por frotación, contacto e inducción. Atracción y repulsión. Los signos de las cargas se asocian con pérdida o ganancia de electrones.	No consideran la relevancia del medio en los fenómenos eléctricos.
Campo eléctrico (Faraday, Maxwell, s. XX)	Electricidad como conjunto de cargas (flujo de electrones) que interactúan a distancia de acuerdo con la ley de Coulomb, a través de un medio.	Carga por frotación, contacto e inducción. Atracción y repulsión Los signos de las cargas se asocian con pérdida o ganancia de electrones. La interacción no es inmediata porque depende del medio en el que tiene lugar.	-

Tabla 1. Modelos para describir fenómenos eléctricos fundamentales.  
Fuente: adaptado de Guisasola, 2014.

El modelo eléctrico que los estudiantes construyen intuitivamente en la inducción electromagnética coincide con el modelo *Effluvia*, desarrollado por Gilbert en el siglo XVI. Desde este modelo interpretativo, la atracción de objetos pequeños es una propiedad de los cuerpos que se activaría cuando se frota con cuerpos eléctricos como el vidrio o el ámbar.

De acuerdo con el desarrollo histórico del concepto de campo eléctrico, la distinción de los fenómenos de atracción y repulsión permite a los estudiantes identificar la existencia de cargas eléctricas negativas o positivas, que pueden transferirse entre cuerpos a través del contacto. Este segundo modelo, de *Fluido Eléctrico*, está asociado con las ideas desarrolladas por Gray en el siglo XVIII. Más adelante, al observar las interacciones electrostáticas entre cuerpos que no están en contacto, los estudiantes incorporan la noción de inducción eléctrica, a través de un modelo de *Acción a distancia* que asocia la pérdida o ganancia de electrones con la carga eléctrica, y que puede relacionarse con las ideas desarrolladas por Coulomb en el siglo XIX.

Finalmente, al considerar la influencia del medio en las interacciones electrostáticas, los estudiantes representan la electricidad como un flujo de electrones que interactúan a una distancia

de acuerdo con la ley de Coulomb, a través de un medio. De acuerdo con la mayoría de los planes de estudio en educación secundaria, este es el modelo eléctrico asociado a *Campo eléctrico* relacionado con las obras de Faraday y Maxwell en el siglo XX que se espera que logren los estudiantes (Guisasola, 2014).

## 2. De construyendo el modelo eléctrico escolar

La descripción de estos modelos eléctricos que históricamente se han ido desarrollando para explicar los fenómenos electrostáticos básicos, y que de acuerdo con la literatura representarían los modelos que los escolares van construyendo (Guisasola, 2014), contienen un buen número de elementos que se van enriqueciendo y transformando. El modelo eléctrico es un sistema complejo que tiene componentes estructurales interactivos que permiten la explicación de un conjunto diverso de fenómenos electrostáticos (Boulter y Buckley, 2000). Desde esta perspectiva sistémica, se puede emplear un sistema triangular para representar sus componentes, donde los vértices representan las ideas clave de los fenómenos en términos de: a. *Estructura*, haciendo referencia a los componentes materiales que interactúan en los fenómenos y sus propiedades; b. *Procesos*, aludiendo a los procesos físicos y químicos experimentados por los componentes materiales mediante interacciones; y c. *Control*, que hace referencia a los mecanismos que regulan las interacciones mencionadas (Boulter y Buckley, 2000).

Para poder identificar los diversos componentes de estructura, proceso y control que eventualmente pudieran invocar los estudiantes al expresar su modelo eléctrico, se identifican los diversos componentes que aparecen en cada uno de los modelos históricos de electricidad (Guisasola, 2014), y los hemos sistematizado en la Figura 3.

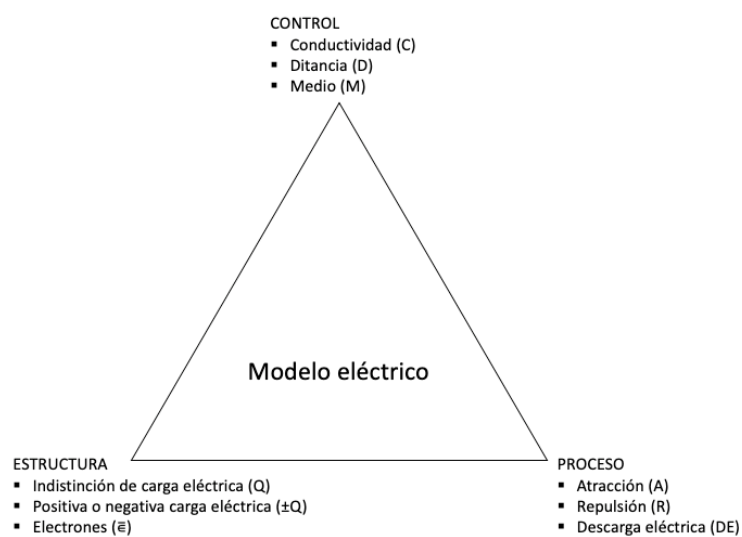


Figura 3. De construcción del modelo eléctrico escolar.  
Fuente: Tomado de Guisasola, 2014.

Así, comenzando con el vértice de la Estructura (Figura. 3 abajo a la izquierda), se observa que los estudiantes pueden identificar la presencia o ausencia de carga eléctrica, haciendo o no la distinción entre carga eléctrica positiva y negativa, y pueden también referir los electrones como componentes estructurales que intervienen en los fenómenos electrostáticos. De acuerdo con los componentes estructurales presentes, podemos situar el modelo eléctrico del estudiante en el nivel de representación macroscópica cuando refiere cargas eléctricas, en el nivel microscópico cuando refiere electrones, o identificar su capacidad de transitar entre los dos niveles de representación, cuando aparecen ambos componentes estructurales (Furió, Guisasola y Almudi, 2004). Considerando las evidencias que sugieren que los estudiantes encuentran dificultades cuando intentan comprender la naturaleza microscópica de la materia (Harrison y Treagust, 2002) y que también se enfrentan a tensiones al tratar de establecer relaciones entre niveles macroscópicos y microscópicos, es de esperar que los estudiantes presenten estas dificultades en la construcción y desarrollo del modelo eléctrico.

Continuando con el vértice de Proceso (Figura 3, abajo a la derecha), los alumnos identifican la presencia o ausencia de interacciones entre los cuerpos, en términos de la atracción o repulsión entre ellos, y la descarga eléctrica como interacción electrostática a distancia.

Con respecto al último vértice, Control, los estudiantes pueden identificar los factores que regulan los fenómenos electrostáticos, considerando la conductividad del material, la distancia entre los cuerpos y el medio que los separa.

Como decíamos, la presencia de estos tres componentes en los modelos eléctricos expresados por los estudiantes permitiría identificar el modelo histórico con el que se alinean las explicaciones de los estudiantes (Furió y Guisasola, 1998; Guisasola, 2014). Para ello, en la tabla a continuación, identificamos los componentes estructurales, de proceso y de control presentes en cada uno de ellos (Tabla 2).

Nivel	Modelo eléctrico	Descripción	Componentes del modelo		
			Estructura	Procesos	Control
N1	Effluvia	Carga eléctrica como una propiedad de los objetos que aparece al frotarlos con cuerpos "eléctricos" (vidrio y ámbar), y que produce la atracción de objetos livianos	Indistinción de carga eléctrica	Atracción	Conductividad
N2	Fluido eléctrico	Electricidad como un fluido eléctrico que puede ser transferido de un cuerpo a otro, dándole la capacidad de atraer o repeler cuerpos livianos.	↓ Positiva o negativa carga eléctrica	↓ Atracción y repulsión	Conductividad
N3	Acción a distancia	Electricidad como conjunto de cargas (flujo de electrones) que interactúan a distancia de acuerdo con la ley de Coulomb.	↓ Electrones	Atracción y repulsión	↓ Conductividad y distancia
N4	Campo eléctrico	Electricidad como conjunto de cargas (flujo de electrones) que interactúan a distancia de acuerdo con la ley de Coulomb, a través de un medio.	Electrones	↓ Atracción, repulsión y descarga eléctrica	↓ Conductividad, distancia y medio

Tabla 2. Componentes en los modelos eléctricos expresados por los estudiantes. Las flechas negras representan posibles transiciones de un modelo al siguiente. Fuente: propia.

En el proceso de aprendizaje, el desarrollo de los componentes estructurales, de proceso y de control de los modelos científicos escolares no se logra de manera independiente. Desde la visión sistémica se asume que existen interacciones entre los componentes estructura, proceso y control de los modelos científicos escolares (Borges y Gilbert, 1999), en términos de que la presencia o ausencia de un componente, media en la aparición de los otros (Bach y Márquez, 2017; Boulter y Buckley, 2000). Los estudios que se centran en el modelo de cambio geológico o en el ciclo del agua han mostrado que los componentes estructurales, de proceso y de control están relacionados entre sí en términos de su desarrollo (Bach y Márquez, 2017).

En síntesis, las dificultades de los estudiantes para modelizar el modelo eléctrico transitando progresivamente hacia la interpretación microscópica de los fenómenos electrostáticos justifica prestar mayor atención al desarrollo de sus modelos eléctricos, dadas sus múltiples aplicaciones tecnológicas. La literatura existente ha establecido similitudes entre el desarrollo histórico de este campo y la evolución de las ideas de los estudiantes cuando explican fenómenos eléctricos; sin embargo, todavía son necesarios estudios empíricos que se centren en las trayectorias de aprendizaje de los estudiantes en este dominio conceptual específico. El objetivo de esta investigación es, entonces, caracterizar la evolución de los modelos eléctricos expresados por estudiantes de secundaria al explicar una secuencia de fenómenos electrostáticos fundamentales orientados a la modelización.

### 3. Metodología

Para el logro de este objetivo hemos recurrido a un enfoque metodológico de corte cualitativo interpretativo (Hernández, Fernández y Baptista, 2010), que nos permita identificar los componentes del modelo eléctrico de los estudiantes, y la forma en que éstos evolucionan. Considerando que el foco de nuestro estudio es la evolución del modelo eléctrico de cada uno de los estudiantes, esta investigación puede ser considerada un estudio de casos. Los estudios de caso pretenden desarrollar un cuerpo de conocimiento que ayude a describir casos individuales para alcanzar abstracciones concretas y particulares pertinentes a la muestra analizada y, a partir de las cuales se puedan identificar patrones de comportamiento (Merriam, 1998). Para este estudio fue necesario acceder a las explicaciones formuladas por estudiantes de secundaria durante una secuencia de fenómenos electrostáticos fundamentales orientadas a la modelización. Por esta razón, se tomaron como casos los 30 estudiantes que participaron de una secuencia didáctica con estas características, tratándose entonces de un muestreo por conveniencia.

#### 3.1. Contexto y participantes

Este estudio fue desarrollado en Chile con un grupo de profesores de ciencias que ha trabajado en el diseño, implementación y evaluación de secuencias de enseñanza orientadas a la modelización. Daniela, una de las profesoras participantes, ha trabajado durante varios años en una escuela pública de Santiago de Chile. El tópico elegido para su secuencia didáctica fue Electricidad en octavo



grado (13-14 años) porque, a pesar de aplicar diversas estrategias de enseñanza en los últimos años, sus estudiantes siguen sin ser capaces de interpretar fenómenos eléctricos básicos a nivel de los electrones.

A partir de una revisión de la literatura tanto de los procesos de enseñanza y aprendizaje de electricidad y sobre modelización, y apoyándose en su propia experiencia y la de los otros participantes, Daniela diseñó e implementó una secuencia didáctica de cinco clases. Para el diseño de la secuencia, en primer lugar, se definió una hipótesis de progresión, anticipando la manera en la que se esperaba que las ideas de los estudiantes evolucionaran durante la secuencia didáctica, considerando los modelos eléctricos propuestos en la literatura existente (Guisasola, 2014). Si bien se asumió que hay múltiples factores que median en la forma como los estudiantes reconstruyen sus modelos mentales, el énfasis en la planificación se situó en la selección de fenómenos electrostáticos básicos que requieran explicaciones situadas en los niveles de desarrollo del modelo correspondientes a la hipótesis de progresión (Tabla 3), de acuerdo con los referentes empíricos de cada uno de ellos (Furió *et al.*, 2004).

Actividad	Fenómeno	Referencias empíricas	Nivel esperado
A1	Interacción entre un globo frotado y pequeños pedazos de papel	Un cuerpo cargado atrae cuerpos livianos	Effluvia
A2	Interacción entre dos globos frotados, unidos por una cuerda	Repulsión entre dos cuerpos con cargas eléctricas de igual signo	Fluido eléctrico
A3	Interacción entre un globo frotado y una bola de papel de aluminio	No interacción entre un cuerpo cargado y un cuerpo neutro no conductor	Fluido eléctrico
A4	Interacción entre un globo frotado y pequeños pedazos de papel atrapados en un vaso	Un cuerpo cargado atrae cuerpos livianos a distancia	Acción a distancia
A5	Interacción entre cabello humano y un jersey de lan	Descarga como evidencia de carga eléctrica, asociada con un flujo de electrones	Campo eléctrico

Tabla 3. Secuencia de fenómenos electrostáticos básicos seleccionados de acuerdo a la hipótesis de progresión. Fuente: propia.

En cuanto a la organización de la clase, ésta se orientó siguiendo la modelización como modelo didáctico. En la etapa inicial, se presentó un fenómeno y los estudiantes construyeron individualmente sus explicaciones respondiendo al interrogante *¿Por qué se produce este fenómeno?* A continuación, ellos evaluaron el ajuste de su modelo al fenómeno, contrastando sus ideas con las de sus pares. Después los estudiantes revisaron sus modelos mejorando ciertos aspectos, y finalmente, aplicaron sus modelos explicando nuevos fenómenos favoreciendo la transferencia (Schwartz *et al.*, 2009).

### 3.2. Recogida y análisis de datos

Los datos recopilados corresponden a las evidencias de trabajo de los estudiantes (producciones escritas) en las que desarrollaron explicaciones para los fenómenos observado en clase. Cada uno de los 30 estudiantes formuló cinco explicaciones diferentes, por lo que hay un total de 150 evidencias de los estudiantes que conforman los datos recopilados para este estudio.

En cuanto al análisis de datos, se utilizaron los modelos históricos identificados dentro del campo eléctrico. Esta decisión se tomó porque estudios anteriores han considerado que constituyen caracterizaciones apropiadas de las ideas utilizadas por los estudiantes cuando intentan explicar fenómenos eléctricos básicos (Furió *et al.*, 2004; Guisasola, 2014). Para el análisis de cada una de las explicaciones de los estudiantes fue necesario categorizar los componentes de estructura, proceso y control (presentados en la Figura 3) en cada una de las explicaciones, identificando el modelo histórico expresado por el estudiante.

A modo de ejemplo, para el caso del tercer fenómeno (interacción entre un globo frotado y una bola de papel de aluminio), encontramos explicaciones que podemos situar en los niveles descritos. Por ejemplo, cuando un estudiante explica el fenómeno como *“El globo al frotarse con el pelo tiene carga, pero la pelota de aluminio no tiene carga, por eso al acercarlos no ocurre nada”*, podemos identificar claramente el nivel Efluencia, ya que el estudiante cree que la propiedad eléctrica aparece cuando se frota el globo, sin hacer referencia a transferencias de cargas o electrones. Para ese mismo fenómeno, otro estudiante declara *“El péndulo no se mueve ya que la pelotita de aluminio tiene la carga desequilibrada, y la carga del globo la estabiliza o neutraliza”*, planteando la influencia entre las cargas de los dos objetos cuando estos se tocan, lo que evidencia la noción de “fluido eléctrico”.

Los descriptores para cada categoría primero fueron validados por los investigadores que participaron en nuestro proyecto de investigación, y luego fueron probados por medio de un análisis de réplica para lograr un índice Kappa de más del 70%. Como tal, esto confiere a nuestro análisis un nivel de confiabilidad suficiente (Hernández, Fernández y Baptista, 2010).

El análisis de las explicaciones de los estudiantes nos permitió identificar las estructuras, procesos y mecanismos de control que refieren (Boulter y Buckley, 2000), y los modelos eléctricos con los que están alineados (Guisasola, 2014).

## 4. Resultados

A continuación, se presentan el análisis de los datos organizado de acuerdo con cada uno de los componentes (estructura, procesos y control). Los datos se representan mediante gráficos de burbujas, que proporcionan una visión grupal en términos del porcentaje de estudiantes que alude a cada uno de los componentes. Las burbujas coloreadas se corresponden con el nivel esperado de acuerdo con la hipótesis de progresión de la profesora.

### 4.1. Estructura

En la Figura 4 se muestran los componentes materiales a los que hacen referencia los alumnos en las explicaciones de los cinco fenómenos presentados en la secuencia didáctica (ver Tabla 3).

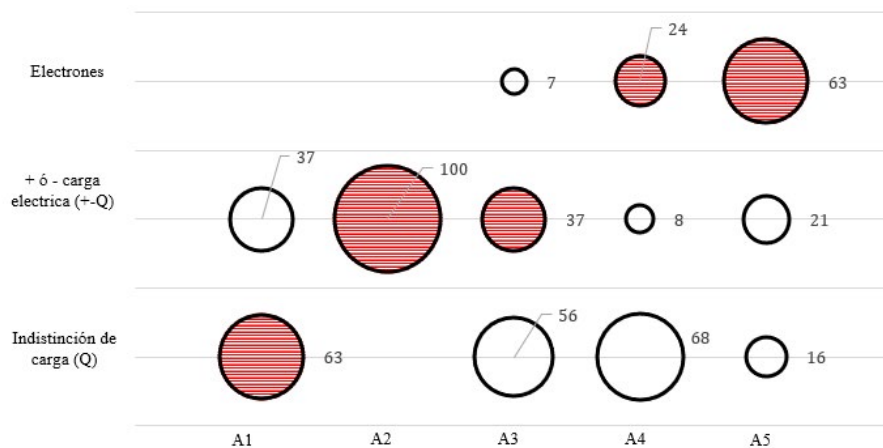


Figura 4. Clasificación de las explicaciones de los estudiantes entorno a estructura.  
Fuente: propia.

En las actividades A1 y A2 los estudiantes identificaron la presencia de carga eléctrica. Además, en la actividad A2 también pudieron reconocer la existencia de dos tipos de carga: positiva y negativa. Sin embargo, al explicar los fenómenos presentes en las actividades A3 y A4, los alumnos vuelven a la noción de presencia o ausencia de carga eléctrica sin identificar el tipo de carga (negativa o positiva). Finalmente, al tratar con el fenómeno en la actividad A5, los estudiantes emplean el concepto de electrones en sus explicaciones movilizándolo desde un nivel macro a microscópico, de acuerdo con las explicaciones expresadas en la actividad.

### 4.2. Procesos

La Figura 5 muestra el desarrollo de los estudiantes con respecto a las explicaciones ofrecidas en relación con los procesos físicos o químicos. Una vez más, esta trama considera las explicaciones correspondientes a cada uno de los 5 fenómenos planteados. Para los primeros cuatro fenómenos presentes en las actividades A1, A2, A3 y A4, los estudiantes se refirieron a los procesos de interac-

ción observables para ellos. Con respecto a los fenómenos presentes en las actividades A1 y A2, los alumnos eran capaces de referirse primero a la atracción y después a la repulsión (porque el hecho era observable). Sin embargo, para los fenómenos presentes en las actividades A3 y A4, la mayoría de los estudiantes solo identificaron la atracción a pesar de que la hipótesis de la progresión sugería que también deberían poder hacer referencia a la repulsión dentro de sus explicaciones. Finalmente, en el fenómeno estudiado en la actividad A5, la mayoría de los estudiantes reconoció el intercambio de electrones como el proceso observado.

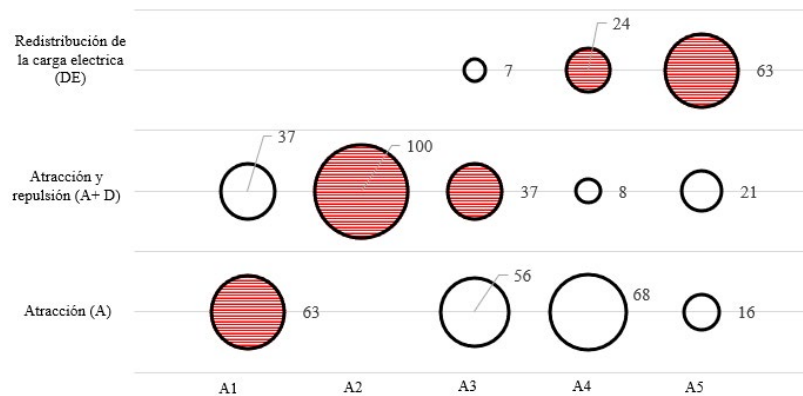


Figura 5. Clasificación de las explicaciones de los estudiantes entorno a estructura. Fuente: propia

### 4.3. Control

Por último, con respecto al triángulo sistémico, la Figura 6 organiza los modelos expresados por los estudiantes en función del control de las interacciones. Al igual que con los vértices anteriores, cada una de sus cinco explicaciones diferentes fueron graficadas.

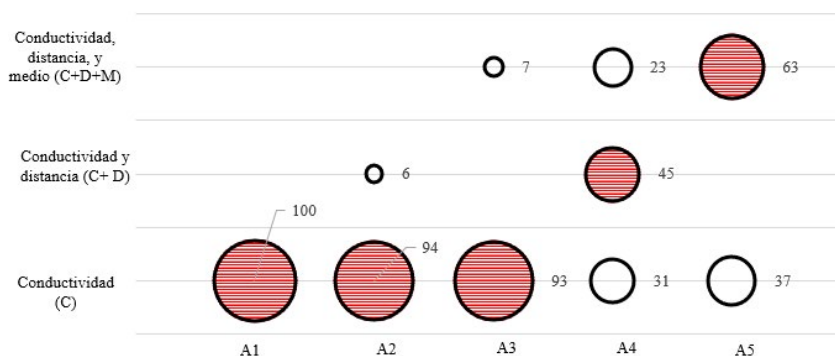


Figura 6. Clasificación de las explicaciones de los estudiantes entorno a control. Fuente: propia

La mayoría de los estudiantes incorporaron los diversos factores que intervienen en el proceso de regulación de las interacciones entre los cuerpos neutrales y cargados eléctricamente:

conductividad, distancia y medio. En este caso las ideas de los estudiantes siguen la hipótesis de progresión esperado por la profesora. En las tres primeras actividades (A1, A2 y A3) hacen referencia a la conductividad, en la cuarta actividad (A4) hacen referencia a la conductividad y la distancia, y en la quinta actividad (A5) hacen referencia a la conductividad, la distancia y el medio como componentes de control de la interacción electrostática.

## 5. Discusión y conclusiones

En este estudio se analizaron las explicaciones ofrecidas por estudiantes de octavo grado durante cinco clases de física centradas en la electricidad. La hipótesis de progresión anticipada por la profesora se basaba en una secuencia de cinco fenómenos, centrados en la observación de las interacciones entre cuerpos cargados y neutros, lo que permitiría, según la literatura, la construcción del concepto de campo eléctrico (Viennot, 2001). Dentro de la secuencia de enseñanza diseñada, se seleccionaron los cinco fenómenos específicos porque se asumió que sus referencias empíricas permitirían a los estudiantes formular explicaciones alineadas con el modelo de campo eléctrico esperado (Furió *et al.*, 2004). La progresión observada desde una perspectiva global es poco convergente y presenta discontinuidades (Duncan y Hmelo-Silver, 2009), lo que parecería confirmar que los estudiantes construyen un modelo distinto para cada fenómeno (Knuutila, 2005), y que no siguen la progresión prevista por la profesora (Duit y Von Rhöneck, 1998). Si bien la hipótesis de la progresión fue útil para la planificación de las secuencias de enseñanza, el desempeño de los estudiantes mostró trayectorias de aprendizaje que no se ajustaron a la progresión esperada (Smith *et al.*, 2006).

Sin embargo, explorar la evolución de cada uno de los componentes del modelo eléctrico (Boulter y Buckley, 2000), y las interacciones entre estos componentes (Borges y Gilbert, 1999) nos permite caracterizar de mejor manera la transformación de las ideas de los estudiantes durante la secuencia de fenómenos eléctricos fundamentales. Consideremos que hay una interacción cuando la presencia o la ausencia de los componentes media en la aparición de otros (Bach y Márquez, 2017; Boulter y Buckley, 2000). En este caso, se puede ver la interacción entre los componentes Estructura y Proceso. Los modelos expresados por los estudiantes muestran el nivel de alineación entre ambos componentes, dado que la representación de ambas formas es idéntica, como puede apreciarse al comparar las Figuras 4 y 5.

De acuerdo con la hipótesis de progresión propuesta por la profesora, desde el punto de vista de la estructura, se esperaba que a partir de la actividad A2 los estudiantes distinguieran las cargas positivas y negativas (Furió y Guisasola, 1998; Guisasola, 2014). Esta transición se observa para todos los estudiantes al observar procesos de repulsión en la actividad A2, sin embargo, esta distinción no está presente en las explicaciones de más de la mitad de los estudiantes en la actividad A3. En la actividad A4, los estudiantes debieran referirse a la carga eléctrica de los cuerpos, situándose en el nivel microscópico (Furió *et al.*, 2004); sin embargo, esta transición se logra para un número significativo de estudiantes en la actividad A5. Esto podría deberse a que, desde el punto de vista de los procesos observados, en la actividad A4 no se observa interacción entre los

cuerpos, mientras que en la actividad A5 se observa una descarga eléctrica entre dos cuerpos que se encuentran a una cierta distancia.

Así, el análisis de nuestros datos evidencia que los procesos de interacción electrostática observados son críticos para la activación de los componentes estructurales (Viennot, 2001): la observación de la existencia de los procesos de atracción y repulsión conlleva la identificación de dos tipos de carga eléctrica opuestas; pero estos componentes estructurales, en las explicaciones de una parte significativa de la muestra analizada, solamente se activan cuando se observan procesos de repulsión. Así entonces, identificamos una interacción clara entre los componentes de estructura y proceso en la evolución del modelo eléctrico a nivel macroscópico: en la medida en que los estudiantes observan procesos de atracción y repulsión, son capaces de identificar las cargas eléctricas positivas y negativas de los cuerpos como componentes estructurales.

A medida que van avanzando en la secuencia de fenómenos electrostáticos, la mayoría de los estudiantes refieren solamente aquellos procesos que pueden observar, limitando sus explicaciones a sus percepciones. Esto podría estar relacionado con las dificultades de los estudiantes con respecto a la transición al nivel microscópico, que ya había sido identificado tanto por la profesora como en la literatura (Harrison y Treagust, 2002). Las explicaciones analizadas muestran que solamente al observar el proceso de descarga eléctrica, los estudiantes activan los electrones como componente estructural, aunque un buen número de estudiantes no logran situar en el nivel microscópico en sus explicaciones. Así, el análisis de la evolución del modelo eléctrico de los estudiantes evidencia la misma interacción entre los componentes de estructura y procesos que ya había sido identificado en la literatura para el modelo de cambio geológico y el ciclo del agua (Bach y Márquez, 2017). En relación con los componentes de control, dentro de las explicaciones formuladas por los estudiantes no observamos interacciones significativas con los componentes estructurales y de procedimiento. Esto se puede afirmar ya que, aun cuando no hay convergencia en los componentes de estructura y proceso con la hipótesis de progresión planteada por la profesora, la mayoría de los estudiantes pueden identificar en todos los casos los factores que controlan los procesos de los fenómenos observados.

Nuestros resultados muestran que la selección de fenómenos de acuerdo con sus referentes empíricos no es suficiente para favorecer procesos continuos que permitan una modelización productiva (Louca, Zacharia y Constantinou, 2011). La descomposición del modelo eléctrico en los componentes Estructura, Proceso y Control puede contribuir a fortalecer los criterios del profesorado para la selección de los fenómenos y la forma de secuenciarlos. Al respecto, dado que el desempeño de los estudiantes muestra que la mayoría de ellos activan los componentes estructurales y procesuales más simples cuando consideran que son suficientes para explicar el fenómeno, se requiere una intervención intencionada pedagógicamente por el profesor, que favorezca que estos elementos aparezcan en el modelo eléctrico que expresan los estudiantes en sus explicaciones. Por último, en referencia a los componentes reguladores, la secuencia de fenómenos propuesta mostró ser adecuada para favorecer la incorporación progresiva de los tres componentes reguladores al modelo eléctrico que expresan los estudiantes, probablemente porque se corresponden con las incorporaciones más sustantivas en el desarrollo histórico del modelo eléctrico (Furió *et al.*, 2004; Guisasaola, 2014).

En cuanto a la evolución de las ideas de los estudiantes que participaron en este estudio, los modelos eléctricos propuestos en la literatura desde una perspectiva teórica (Guisasola, 2014) fueron adecuados para identificar el modelo eléctrico de los estudiantes. Además, la incorporación de la perspectiva sistémica nos permitió identificar los componentes de cada uno de estos modelos, y caracterizar sus interacciones. Desde ese punto de vista, hemos podido la interacción entre los componentes de estructura y proceso y las dificultades de transición al nivel microscópico en este dominio conceptual. Esto podría proporcionar una explicación tentativa a las discontinuidades en la evolución del modelo eléctrico y la falta de convergencia con la hipótesis de progresión intencionada por el profesor, que ya habían sido reportados en la literatura (Duit y von Rhöneck, 1998). Estos hallazgos, si bien permiten una buena caracterización de los modelos expresados en las explicaciones de los estudiantes, y pueden orientar la selección de fenómenos del profesorado para favorecer procesos de modelización (Duggan y Gott, 1995), están limitados debido al tamaño de la muestra y al bajo nivel de convergencia en el desempeño de los estudiantes (Duncan y Hmelo-Silver, 2009). En ese sentido, es necesario continuar explorando la evolución del modelo eléctrico expresado por los estudiantes, en estudios a mayor escala, para ir refinando y fortaleciendo este resultado, que consideramos por ahora promisorio (Duschl, Maeng y Sezen, 2011).

Después de todo, son retos que nos quedan por seguir explorando para consolidar una propuesta que nos permita contribuir a los procesos de aprendizaje de los estudiantes, a la gestión del profesor en los procesos de modelización y a la formación inicial y continua de profesores para el desarrollo del modelo eléctrico en el contexto escolar, dada su relevancia en la sociedad actual.

### Agradecimientos

Este trabajo deriva del Proyecto Fondecyt 1160148 titulado “*Caracterización del desarrollo profesional de profesores de ciencias en la apropiación de un modelo didáctico con elementos de indagación para promover el desarrollo de las competencias científicas en los estudiantes chilenos*”, financiado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT), Gobierno de Chile.

### Referencias bibliográficas

- Acher, A., Arcá, M., y Sanmartí, N. (2007). Modeling as a teaching learning process for understanding materials: A case study in primary education. *Science Education*, 91(3), 398-418.
- Bach, J., y Márquez, C. (2017). El estudio de los fenómenos geológicos desde una perspectiva sistémica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 25(3), 302.
- Borges, A., y Gilbert, J. (1999). Mental models of electricity. *International Journal of Science Education*, 21, 95-117.
- Boulter, C. J., y Buckley, B. C. (2000). Constructing a typology of models for science education. En J. K. Gilbert y C. Boulter (Eds.), *Developing models in Science education* (pp. 41-57). Dordrecht: Springer.

- Duggan, S., y Gott, R. (1995). The place of investigations in practical work in the UK National Curriculum for Science. *International Journal of Science Education*, 17(2), 137-147.
- Duit, R., y von Rhöneck, C. (1998). Learning and understanding key concepts of electricity. En A. Tiberghien, E. Leonard Jossem y J. Barojas (Eds.), *Connecting research in Physics education with teacher education. An International Commission on Physics Education book*.
- Duncan, R. G., y Hmelo-Silver, C. E. (2009). Learning progressions: Aligning curriculum, instruction, and assessment. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 606-609.
- Duschl, R., Maeng, S., y Sezen, A. (2011). Learning progressions and teaching sequences: A review and analysis. *Studies in Science Education*, 47(2), 123-182.
- Furió C., Guisasola, J., y Almudi, J.M. (2004). Elementary electrostatic phenomena: historical hindrances and student's difficulties. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology*, 4(3), 291-313.
- Furió, C., y Guisasola, J. (1998). Difficulties in learning the concept of electric field. *Science Education*, 82(4), 511-526.
- Gilbert, J. K. y Justi, R. (2016). *Modelling-based teaching in science education* (Vol. 9). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Guisasola, J. (2014). Teaching and learning electricity: The relations between macroscopic level observations and microscopic level theories. En R. Matthews (Ed.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 129-156). Dordrecht: Springer.
- Halloun, I. (2004). *Modeling theory in science education*. Londres: Kluwer Academic Publishers.
- Harrison, A. G., y Treagust, D. F. (2002). The particulate nature of matter: Challenges in understanding the submicroscopic world. En J. K. Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D. F. Treagust y J. H. van Driel (Eds.), *Chemical education: Towards research-based practice* (pp. 189-212). Dordrecht: Springer.
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación*. Perú: McGraw Hill Educación.
- Izquierdo-Aymerich, M. y Adúriz-Bravo, A. (2003). Epistemological foundations of school science. *Science & Education*, 12, 27-43.
- Knuuttila, T. (2005). Models, representation, and mediation. *Philosophy of Science*, 72(5), 1260-1271.
- Lewin, W. (2012). *Por amor a la física*. Barcelona: Debate.
- Louca, L. T., Zacharia, Z. C., y Constantinou, C. P. (2011). In quest of productive modeling-based learning discourse in elementary school science. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(8), 919-951.
- Lopes, J. y Costa, N. (2007). The evaluation of modelling competences: difficulties and potentials for the learning of science. *International Journal of Science Education*, 29(7), 8811-851. Marzabal Blancafort, A., e Izquierdo-Aymerich, M. (2017). Análisis de las estructuras textuales de los textos escolares de química en relación con su función docente. *Enseñanza de las ciencias*, 35(1), 111-132
- Merino, C., y Sanmartí, N. (2008). How young children model chemical change. *Chemistry Education Research and Practice*, 9(3). doi: <https://doi.org/10.1039/b812408f>
- Merino, C., e Izquierdo-Aymerich, M. (2011). Contribution to modelling in chemical change | Aportes a la modelización según el cambio químico. *Educación Química*, 22(3), 212-223.
- Merriam, S. B. (1998). *Qualitative research and case study applications in education*. San Francisco: Jossey-Bass.
- Nersessian, N. J. (2008). *Creating scientific concepts*. Cambridge, MA: MIT.



- Park, J., Kim, I., Kim, M., y Lee, M. (2001). Analysis of students' processes of confirmation and falsification of their prior ideas about electrostatics. *International Journal of Science Education*, 23(12), 1219–1236.
- Schwartz, M. S., Sadler, P. M., Sonnert, G., y Tai, R. H. (2009). Depth versus breadth: How content coverage in high school science courses relates to later success in college science coursework. *Science Education*, 93(5), 798-826.
- Smith, C. L., Wiser, M., Anderson, C. W., y Krajcik, J. (2006). Implications of research on children's learning for standards and assessment: a proposed learning progression for matter and the atomic-molecular theory. *Measurement: Interdisciplinary Research & Perspective*, 4(1-2), 1-98.
- Taber, K. (2018). Representations and visualisation in teaching and learning chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 19(2), 405–409.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: the many faces of the chemistry “triplet”. *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195.
- Viennot, L. (2001). Reasoning in Physics. The part of common sense. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publisher.