



Universitat Autònoma de Barcelona

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús establertes per la següent llicència Creative Commons:  [http://cat.creativecommons.org/?page\\_id=184](http://cat.creativecommons.org/?page_id=184)

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <http://es.creativecommons.org/blog/licencias/>

**WARNING.** The access to the contents of this doctoral thesis it is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>



**UAB**

Universitat Autònoma  
de Barcelona

**DEPARTAMENT DE DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I DE LES  
CIÈNCIES EXPERIMENTALS**

**ANÁLISIS DEL  
APRENDIZAJE DE  
CONCEPTOS DE  
ELECTROSTÁTICA EN LA  
FORMACION DEL  
PROFESORADO DE FÍSICA**

**DOCTORAT EN EDUCACIÓ: DIDÀCTICA DE LA MATEMÀTICA I  
DE LES CIÈNCIES (ÀMBIT I)**

**AUTOR: NICOLÁS GARRIDO SÁNCHEZ**

**DIRECTOR: VÍCTOR LÓPEZ SIMÓ**

**ENERO 2022, BELLATERRA, CATALUNYA**



**Departament de Didàctica de la Matemàtica i de les Ciències Experimentals**

**Análisis del aprendizaje de conceptos de Electrostática en la formación del profesorado de Física**

**Doctorat en Educació: Didàctica de la Matemàtica i de les Ciències (Àmbit I)**

Autor: Nicolás Garrido Sánchez

Director: Dr. Víctor López Simó

Directora emérita: Dra. Roser Pintó Casulleras

Tutora: Dra. Digna Couso Lagarón

Enero 2022, Bellaterra, Catalunya

## Presentación

El presente trabajo corresponde a la tesis del estudiante Nicolás Garrido Sánchez para obtener el grado de Doctor en Educación en el ámbito de la didáctica de las ciencias experimentales de la Universitat Autònoma de Barcelona

A este trabajo final le anteceden dos publicaciones realizadas durante el período de elaboración de esta tesis, las que además emanan de ella. Dichas publicaciones son:

Garrido, N., López, V., y Pintó, R. (2019). Analysis of the learning of electrostatic concepts in pre-service physics teachers. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1287 (1), 012034.  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1287/1/012034/meta>

Garrido, N., López, V., y Pintó, R. (2021). Analysis of the explanations of pre-service physics teachers about the Faraday Cage Effect and the Pointed Conductor Effect. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1929 (1), 012031  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1929/1/012031/meta>



## **Agradecimientos**

Quisiera agradecer a las siguientes personas:

A Roser Pintó, por confiar en mis capacidades y acompañarme durante todo mi camino de formación académica de postgrado.

A Víctor López por guiar esta tesis, por su paciencia, ideas y colaboración durante todos los años de trabajo que precedieron a este documento.

A Digna Couso, por haber aceptado ser mi tutora de tesis y por todo lo enseñando. También a las diferentes profesoras y profesores del Departament que me han acompañado y asesorado a lo largo de estos años: Mercè Izquierdo, Mercè Junyent, Anna Marbà, Genina Calafell, Conxita Márquez, Jordi Domènech y Mariona Espinet.

A mis padres: Gloria y Andrés, y a mi compañera Soledad por siempre apoyarme e instarme a explorar nuevos desafíos.

A la carrera de Pedagogía en Física y Matemática de la Universidad de Santiago de Chile, por permitirme llevar a cabo esta investigación en sus aulas, y a los estudiantes participantes de este estudio por su entusiasmo y ganas de aprender.

A los colegas del Liceo José Victorino Lastarria por su amistad y por alentarme a avanzar en una carrera académica.

## Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar las explicaciones de profesores de física en formación cuando experimentan con distintos fenómenos electrostáticos incluidos en una secuencia de enseñanza y aprendizaje (SEA). Los participantes fueron 67 estudiantes de Pedagogía en física y matemática de la Universidad de Santiago de Chile. El estudio fue realizado en el contexto de un curso del programa de estudios de la carrera, utilizando así la metodología de investigación-acción. El propósito de incorporar la perspectiva de modelos a la enseñanza de los docentes en formación es que sean capaces de construir explicaciones científicas basadas en evidencias, teorías e ideas aceptadas por la comunidad científica, permitiéndoles interpretar fenómenos cotidianos tales como la frotación y posterior atracción de cuerpos, y el efecto de la jaula de Faraday. Se espera que los estudiantes utilicen el modelo de distribución e interacción entre cargas eléctricas, y luego expliquen fenómenos más complejos con el modelo de campo eléctrico, para finalmente utilizar ambos de manera simultánea.

Se recogieron 1809 respuestas (explicaciones escritas y dibujos) de 27 actividades en una secuencia de 12 horas (4 sesiones de 3 horas cada una). Los datos obtenidos son de tipo cualitativo. Estos datos fueron analizados mediante la técnica de análisis de contenido, que arrojó 40 categorías que se presentan en redes sistémicas y que luego fueron cuantificadas. Posteriormente, se agruparon las respuestas en 4 niveles de adecuación a los modelos. Finalmente, se analizó el grado de impacto de las características didácticas de la SEA en los resultados de aprendizaje, utilizando la herramienta chi cuadrado ( $\chi^2$ ).

Los resultados de la investigación muestran una mejora significativa de las explicaciones de los estudiantes a lo largo de la secuencia debido a diversos factores, como la presencia de discusiones mediadas por el docente, interacción entre pares, experiencias previas reales y experiencias hipotéticas. También encontramos que el nivel de las respuestas disminuye generalmente al pasar de un dispositivo experimental a otro, aunque la explicación subyacente sea la misma; y que en el caso de los fenómenos que requieren dos explicaciones de distinto tipo, una es desarrollada en más profundidad que la otra en un mismo modelo.

Se concluye que, en electrostática, todos los fenómenos aparentemente simples requieren explicaciones complejas, y que cada fenómeno electrostático conlleva una amplia variedad de explicaciones identificadas. También se concluye que la clave para entender el modelo de distribución e interacción de cargas es diferenciar los procesos de reordenamiento de transferencia de cargas, y uno de los retos de la enseñanza de la física es pasar de pensar en propiedades a pensar en interacciones.

## **Abstract**

The objective of this work is to analyze the explanations of preservice physics teachers when experimenting with different electrostatic phenomena included in a teaching and learning sequence (TLS). The participants were 67 students of Pedagogy in Physics and Mathematics at Universidad de Santiago de Chile. The study was conducted in the context of a course of the study program, thus using action research methodology. The purpose of incorporating the perspective of models into the teaching of pre-service teachers is for them to be able to construct scientific explanations based on evidence, theories and ideas accepted by the scientific community, allowing them to interpret everyday phenomena such as the rubbing and subsequent attraction of bodies, and the Faraday cage effect. Students are expected to use the model of distribution and interaction between electric charges, and then explain more complex phenomena with the electric field model, to finally use both simultaneously.

1809 responses (written explanations and drawings) were collected from 27 activities in a sequence of 12 hours (4 sessions of 3 hours each). The data obtained are qualitative. These data were analyzed using the content analysis technique, which yielded 40 categories that are presented in systemic networks, and which were then quantified. Subsequently, the responses were grouped into 4 levels of adaptation to the models. Finally, we analyzed the degree of impact of the didactic characteristics of the TLS on the learning outcomes using the chi-square tool ( $\chi^2$ ).

Research results show a significant improvement in student explanations throughout the sequence due to various factors, such as the presence of teacher-mediated discussions, peer interaction, real previous experiences, and hypothetical experiences. We also found that the level of responses generally decreases when moving from one experimental device to another, even if the underlying explanation is the same; and that in the case of phenomena that require two explanations of different types, one is developed in more depth than the other in the same model.

It is concluded that, in electrostatics, all apparently simple phenomena require complex explanations, and that each electrostatic phenomenon carries a wide variety of identified explanations. Apparently, the key to understanding the charge distribution and interaction

model is to differentiate the processes of charge reordering and charge transfer, and one of the challenges of teaching physics is to move from thinking about properties to thinking about interactions.

## **TABLA DE CONTENIDO**

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Planteamiento del problema</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Planteamiento de la investigación</b>	<b>27</b>
<b>2.3 Objetivos y preguntas de investigación</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO</b>	<b>30</b>
<b>3.1 La enseñanza y aprendizaje de las ciencias</b>	<b>31</b>
3.1.1 Una aproximación al aprendizaje de las ciencias	31
3.1.1.1. Breve historia de la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias	31
3.1.1.2. Algunos consensos en didáctica de las ciencias	35
3.1.1.3. La educación en ciencias en Chile	37
3.1.2 Ideas del alumnado en ciencias y su progresión	39
3.1.2.1. Las ideas alternativas: origen y tipologías	39
3.1.2.2. Relevancia de conocer y estudiar las ideas previas	44
3.1.2.3. De las ideas alternativas a las progresiones de aprendizaje	46
3.1.3 La modelización como práctica científica clave	48
3.1.3.1. Los modelos científicos	49
3.1.3.2. De los modelos mentales a los modelos científicos escolares	50
3.1.3.3. La modelización y el ciclo de modelización	51
3.1.3.4. La modelización en la formación inicial del profesorado	53
3.1.3.5. Las explicaciones basadas en modelos	56
3.1.4 El diseño didáctico en la enseñanza de las Ciencias.	60
3.1.4.1. Las secuencias de enseñanza y aprendizaje (SEA)	60
3.1.4.2. El diseño de SEAs	61
<b>3.2 La enseñanza y aprendizaje de la electrostática</b>	<b>63</b>
3.2.1 Una aproximación a la electrostática	63
3.2.1.1. ¿Qué es la electrostática?	63
3.2.1.1. Breve historia de la electrostática y el electromagnetismo.	64
3.2.2 Los modelos clave en la electrostática	66
3.2.2.1 El Modelo de Distribución e Interacción de Cargas (M-DIC)	67
3.2.2.2 El Modelo de Campo Eléctrico para una carga Puntual (M-CE)	72
3.2.2.3 Un Modelo Híbrido: el campo eléctrico en una distribución de cargas	75
3.2.3. La didáctica de la electrostática	78
3.2.3.1 Sobre el aprendizaje de la carga y la interacción entre cargas	78
3.2.3.2 Sobre el aprendizaje del concepto de Campo Eléctrico	80
3.2.3.2 Sobre la representación del campo eléctrico	84
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA</b>	<b>86</b>
<b>4.1 Contexto y participantes</b>	<b>87</b>
4.1.1 Contexto	87
4.1.2 Participantes del estudio	90
<b>4.2 Secuencia de Enseñanza y Aprendizaje (SEA)</b>	<b>91</b>

4.2.1 Enfoque de enseñanza de la SEA	91
4.2.2 Contenidos de aprendizaje de la SEA	92
4.2.3 Estructura y objetivos de la secuencia	94
4.2.3.1 Sesión N° 1 “Frotación, Polarización y Contacto”	95
4.2.3.2 Sesión N° 2 “Electroscopio”	98
4.2.3.3 Sesión N° 3 “Campo Eléctrico y su representación”	101
4.2.3.4 Sesión N° 4 “Distribución uniforme de cargas sobre un conductor”	105
<b>4.3 Recogida y análisis de datos</b>	<b>108</b>
4.3.1 Fundamentos metodológicos de la investigación	108
4.3.2 Técnica y estrategias de recogida de datos	110
4.3.3 Estrategias de análisis de datos	112
4.3.3.1 Fase 1	113
4.3.3.2 Fase 2	117
4.3.3.3 Fase 3	118
4.3.3.4 Fase 4	120
4.3.4 Detalle del sistema de categorías para el análisis didáctico de la SEA	123
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>126</b>
<b>5.1 Tipología explicaciones identificadas</b>	<b>127</b>
5.1.1 Tipología explicaciones identificadas basadas en el modelo de distribución e interacción de cargas	127
5.1.1.1 Categorías para las explicaciones sobre carga por frotación	127
5.1.1.2 Categorías para las explicaciones sobre carga por polarización	130
5.1.1.3 Categorías para las explicaciones sobre carga por inducción	132
5.1.1.4 Categorías para las explicaciones sobre carga por contacto	134
5.1.1.5 Resumen y gradación de las respuestas obtenidas en torno al modelo de distribución e interacción de cargas	136
5.1.2 Tipología explicaciones identificadas basadas en el modelo de campo eléctrico	138
5.1.2.1 Categorías para las explicaciones sobre la naturaleza de la interacción entre cargas	138
5.1.2.2 Categorías para las explicaciones sobre el significado de las Líneas de Campo Eléctrico	140
5.1.2.3 Categorías para las explicaciones sobre el significado de la densidad de líneas de campo eléctrico	142
5.1.2.4 Resumen y gradación de las respuestas obtenidas entorno al modelo de campo eléctrico	144
5.1.3 Tipología explicaciones identificadas basadas en la combinación entre el modelo de distribución e interacción de cargas y el modelo de campo eléctrico	146
5.1.3.1 Categorías para las explicaciones sobre el efecto de la jaula de Faraday	146
5.1.3.2 Categorías para las explicaciones sobre el efecto punta	149
5.1.3.3 Resumen y gradación de las respuestas obtenidas entorno al modelo de campo eléctrico	150
<b>5.2 Evolución de las explicaciones en las respuestas de los estudiantes a lo largo de la SEA.</b>	<b>152</b>
5.2.1 Evolución de las explicaciones asociadas al modelo de distribución e interacción de cargas	152
5.2.1.1 Evolución de las explicaciones de la carga por frotación	152
5.2.2.2 Evolución de las explicaciones de la carga por polarización	154
5.2.2.3 Evolución de las explicaciones sobre la carga por inducción	157
5.2.2.4 Evolución de las explicaciones sobre la carga por contacto	159
5.2.2.5 Representación gráfica de la progresión de las explicaciones relativas al modelo de distribución e interacción de cargas	161
5.2.2 Evolución de las explicaciones asociadas al modelo de campo eléctrico	163
5.2.3.1 Evolución de las explicaciones sobre la naturaleza de la interacción entre cargas	163
5.2.3.2 Evolución de las explicaciones sobre las líneas de campo eléctrico	164
5.2.3.3 Evolución de las explicaciones sobre la densidad de líneas de campo eléctrico	166
5.2.2.4 Representación gráfica de la progresión de las explicaciones relativas al modelo de campo eléctrico	166

5.2.3 Evolución de las explicaciones asociadas al modelo híbrido (DIC + CE)	168
5.2.3.1 Evolución de las explicaciones sobre el efecto jaula de Faraday	168
5.2.3.2 Evolución de las explicaciones sobre el efecto punta	169
5.2.3.3 Representación gráfica de la progresión de las explicaciones relativas al modelo híbrido	171
<b>5.3 Análisis de la influencia de las características didácticas de la SEA sobre las explicaciones de los estudiantes</b>	<b>172</b>
5.3.1 Análisis de la evolución de las respuestas de los estudiantes según el tipo de interacción de aula	176
5.3.1.1 Explicación del profesor	177
5.3.1.2 Discusión con el profesor	184
5.3.1.3 Discusión entre pares	187
5.3.1.4 No hay discusión ni explicación relacionada	189
5.3.2 Análisis de la evolución de las respuestas de los estudiantes según el tipo de experiencia	193
5.3.2.1 Experiencia real	195
5.3.2.2 Experiencia hipotética	197
5.3.2.3 Experiencia previa real	200
5.3.2.4 Experiencia previa hipotética	203
5.3.2.5 No hay experiencia relacionada	206
5.3.3 Análisis de la evolución de las respuestas de los estudiantes según el tipo de dispositivo experimental	208
5.3.3.1 Igual dispositivo experimental	209
5.3.3.2 Distinto dispositivo experimental	211
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, LIMITACIONES E IMPLICACIONES</b>	<b>213</b>
<b>6.1 Conclusiones de los resultados de la investigación</b>	<b>214</b>
6.1.1 Conclusiones referidas a la primera pregunta de investigación: Sobre la tipología y variedad de explicaciones identificadas	214
6.1.1.1 En electrostática todos los fenómenos aparentemente simples requieren explicaciones complejas	214
6.1.1.2 Cada fenómeno electrostático conlleva una amplia variedad de explicaciones identificadas	215
6.1.1.3 ¿Reordenamiento o transferencia? La clave de la comprensión del Modelos de Distribución e Interacción de cargas	218
6.1.1.4 Los experimentos en electrostática: el reto de pasar de pensar en propiedades a pensar en interacciones	219
6.1.2 Conclusiones referidas a la segunda y tercera pregunta de investigación: sobre la evolución de las ideas y la influencia de las características didácticas	220
6.1.2.1 Existe convergencia en la progresión de las ideas, pero no siempre es lineal	220
6.1.2.2 Los fenómenos, y no solo las ideas, influyen en las explicaciones	221
6.1.2.3 El diseño didáctico como andamiaje para el aprendizaje	222
<b>6.2 Limitaciones de la investigación</b>	<b>224</b>
6.2.1 Respecto al rol del investigador	224
6.2.2 Respecto a la muestra y población	225
6.2.3 Respecto al diseño de la investigación	225
6.2.4 Respecto de los instrumentos de recogida y análisis de datos	226
<b>6.3 Implicaciones para la investigación y para la docencia</b>	<b>227</b>
6.3.1 Futuras líneas de investigación	227
6.3.2 Implicaciones didácticas para la docencia	228
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>231</b>



## TABLAS

<b>Tabla 1</b> Cinco modelos filosóficos de explicación científica relevantes para la educación científica (Braaten y Windschitl, 2011, p 643-644). .....	57
<b>Tabla 2</b> Relación de objetivos y dificultades de aprendizaje en la interpretación coulombiana de la naturaleza eléctrica de la materia (Guisasola. J, 1996, p. 270).....	79
<b>Tabla 3</b> Relación de objetivos y dificultades de aprendizaje en la interpretación de las interacciones eléctricas de acuerdo con la teoría de campo eléctrico (Guisasola. J, 1996, p. 272) .....	81
<b>Tabla 4</b> Participantes del estudio por año y género.....	90
<b>Tabla 5</b> Métodos de electrización en función del tipo de material.....	92
<b>Tabla 6</b> Definición de los componentes de cada modelo usados en el estudio.....	94
<b>Tabla 7</b> Objetivos de aprendizaje para cada sesión de la secuencia.....	95
<b>Tabla 8</b> Actividades donde se recogieron los datos .....	112
<b>Tabla 9</b> Criterio para la elaboración de categorías a partir de los códigos.....	116
<b>Tabla 10</b> Equivalencia para las categorías inductivas con los niveles de adecuación al modelo de distribución e interacción de cargas .....	137
<b>Tabla 11</b> Equivalencia para las categorías inductivas con los niveles de adecuación al modelo del modelo de campo eléctrico y su representación .....	145
<b>Tabla 12</b> Equivalencia para las categorías inductivas con los niveles de adecuación para el Modelo Híbrido .....	151
<b>Tabla 13</b> Evolución de las explicaciones para la carga por frotación. Se remarcan los valores más altos .....	152
<b>Tabla 14</b> Evolución de las explicaciones de la carga por polarización. Se remarcan los valores más altos... ..	154
<b>Tabla 15</b> Evolución de las explicaciones de la carga por inducción. Se remarcan los valores más altos.....	157
<b>Tabla 16</b> Evolución de las explicaciones de la carga por contacto. Se remarcan los valores más altos .....	159
<b>Tabla 17</b> Evolución de las explicaciones sobre la naturaleza de la interacción entre cargas. Se remarcan los valores más altos .....	163
<b>Tabla 18</b> Evolución de las explicaciones sobre las líneas de campo eléctrico. Se remarcan los valores más altos .....	164
<b>Tabla 19</b> Evolución de las explicaciones sobre la densidad de líneas de campo eléctrico. Se remarcan los valores más altos .....	166
<b>Tabla 20</b> Evolución de las explicaciones sobre el efecto jaula de Faraday. Se remarcan los valores más altos .....	168
<b>Tabla 21</b> Evolución de las explicaciones sobre el efecto punta. Se remarcan los valores más altos .....	169
<b>Tabla 22</b> Recuento sobre el cambio de nivel de las respuestas por cada situación consecutiva donde se observa el mismo tipo de explicación. Además, se muestra la clasificación sobre las características didácticas de la SEA por cada situación consecutiva.....	174
<b>Tabla 23</b> Distribución por nivel de adecuación de respuestas que se mantienen y de respuestas no trazables con una respuesta. ....	175
<b>Tabla 24</b> Recuento sobre el cambio de nivel de las respuestas por cada tipo de interacción se observa quién(es) lideran la discusión. Se remarcan los valores más altos.....	176

<b>Tabla 25</b> imágenes que ayudaron para sostener la explicación de la polarización de un dieléctrico y la inducción sobre un conductor .....	179
<b>Tabla 26</b> Ejemplo de mejora de respuesta para la polarización tras ninguna discusión ni explicación relacionada .....	190
<b>Tabla 27</b> Recuento de respuestas por cada nivel donde se observa el contexto de la discusión. Se remarcan los valores más altos .....	193
<b>Tabla 28</b> Recuento de las respuestas por cada nivel donde se observa el tipo de dispositivo experimental. Se remarcan los valores más altos.....	208

## FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ejemplo de respuesta de estudiante en el piloto de la investigación.....	21
<b>Figura 2</b> Problema de investigación.....	22
<b>Figura 3</b> Ejemplo de problema tradicional del cálculo de la intensidad del campo eléctrico en el contexto de cargas puntuales y su solución.....	24
<b>Figura 4</b> Montajes experimentales utilizados en la SEA.....	28
<b>Figura 5</b> Las tres esferas de actividad para científicos e ingenieros (NRC, 2012).....	33
<b>Figura 6</b> Dibujo de Sistema Sol-Tierra para explicar la forma de la órbita y el cambio de estaciones del año.....	40
<b>Figura 7</b> Imagen que muestra una descripción de las fuerzas sobre una atleta (Carrascosa, 2005, p 198) que no coincide con el conocimiento científico vigente.....	41
<b>Figura 8</b> Imagen que describe la visión por medio de rayos visuales.....	42
<b>Figura 9</b> Gráfico que representa la progresión de aprendizaje de estudiantes sobre acústica (Hernández et al, 2015).....	47
<b>Figura 10</b> Fases de un ciclo de modelización en Couso et al (2020), p.68.....	53
<b>Figura 11</b> Imágenes para mostrar la atracción y repulsión (Serway et al., 2010, p 501) (Tipler y Mosca, 2010, p 694).....	69
<b>Figura 12</b> el objeto cargado a la izquierda induce cargas en la superficie del aislante. En la imagen de la derecha un peine cargado atrae trozos de papel porque las cargas se desplazan en el papel (Serway et al., 2010, p 501).....	69
<b>Figura 13</b> imágenes que muestra la carga por inducción y la descarga por contacto (Serway et al., 2010, p 500) (Tipler y Mosca, 2010, p 697).....	70
<b>Figura 14</b> Balanza de Torsión de Coulomb (Serway et al., 2010).....	71
<b>Figura 15</b> Magnitud de la fuerza eléctrica Ley de Coulomb.....	71
<b>Figura 16</b> Relación entre intensidad de campo eléctrico y fuerza coulombiana.....	72
<b>Figura 17</b> Representa las líneas de campo para dos cargas puntuales de signo contrario.....	74
<b>Figura 18</b> Imagen de ambos textos para realizar una analogía entre el campo gravitacional y el campo eléctrico (Serway, 2010) (Tipler y Mosca, 2010, p765).....	76
<b>Figura 19</b> donde muestra que el potencial sobre un conductor debe permanecer constante (Tipler y Mosca, 2010, p787).....	76
<b>Figura 20.</b> Plan de estudios de la carrera de Pedagogía en Física y Matemática (PLEFM) de la USACH, se destaca la asignatura “Electromagnetismo” en el sexto semestre.....	89
<b>Figura 21</b> Imagen de la actividad 1.....	96
<b>Figura 22</b> Imagen de la actividad 2-3.....	96
<b>Figura 23</b> Imagen del montaje de la actividad 2-3 reproducida por un estudiante.....	97
<b>Figura 24</b> Imagen de globos adheridos a una pared luego de ser frotados.....	97
<b>Figura 25</b> Imagen del dossier de los estudiantes en la actividad 4.....	98
<b>Figura 26</b> Imagen del dossier de los estudiantes en la actividad 5.....	98
<b>Figura 27</b> Imágenes de las actividades 6-7-8.....	99
<b>Figura 28</b> Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 6-7.....	99
<b>Figura 29</b> Imágenes de las actividades 9-10-11.....	100

<b>Figura 30</b> Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 9-10 .....	100
<b>Figura 31</b> Imágenes de las actividades 12-13 .....	101
<b>Figura 32</b> Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 12-13 .....	101
<b>Figura 33</b> Imágenes de las actividades 14-15 .....	102
<b>Figura 34</b> Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 14-15 .....	102
<b>Figura 35</b> Pelota de plumavit polarizada y atraída por un generador Van de Graaff encendido .....	102
<b>Figura 36</b> Electroscopio inducido por un generador Van de Graaff encendido.....	103
<b>Figura 37</b> Imágenes de las actividades 16-17-18.....	103
<b>Figura 38</b> Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 16-17 .....	104
<b>Figura 39</b> Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 19-20 .....	104
<b>Figura 40</b> Fotografía de un estudiante participando en la actividad 21 .....	105
<b>Figura 41</b> Imágenes del dossier de los estudiantes en las actividades 22-23 .....	105
<b>Figura 42</b> Imagen de la actividad 24.....	106
<b>Figura 43</b> Imagen del dossier de los estudiantes en la actividad 24 .....	106
<b>Figura 44</b> Imágenes del dossier de los estudiantes en la actividad 25-26.....	107
<b>Figura 45</b> Imagen del dossier de los estudiantes en la actividad 27 .....	107
<b>Figura 46</b> Fases del análisis de los datos.....	112
<b>Figura 47</b> Listado de dossiers digitalizados en Atlas.ti.....	113
<b>Figura 48</b> Lista de citas que corresponden a las respuestas a analizar.....	114
<b>Figura 49</b> Codificación inductiva.....	115
<b>Figura 50</b> Agrupación de códigos para la elaboración de categorías para cada tipo de explicación según el criterio de análisis de cada modelo .....	117
<b>Figura 51</b> Tabla de coocurrencia para el efecto de la jaula de Faraday .....	118
<b>Figura 52</b> Tabla de coocurrencia para la carga por inducción .....	118
<b>Figura 53</b> Gráfica de burbujas que ilustra la progresión del nivel de adecuación del modelo híbrido.....	119
<b>Figura 54</b> Ambiente de trabajo en Microsoft Excel donde se realiza el conteo de respuestas por categoría y por nivel de adecuación al modelo, y la construcción de la gráfica para el efecto de la jaula de Faraday. ....	120
<b>Figura 55</b> Hoja de cálculo utilizada para reemplazar los códigos por valores numéricos con el fin de cuantificar los cambios de nivel entre pares de actividades. Ejemplo de respuestas de carga por polarización. ....	121
<b>Figura 56</b> Hoja de cálculo que muestra los cambios en el nivel de adecuación al modelo de las respuestas de los estudiantes cada dos actividades. Ejemplo de actividades sobre la carga por polarización.....	121
<b>Figura 57</b> Conteo de la cantidad de respuestas que suben, bajan, se mantienen en el nivel o bajan a descripción por cada par de actividades. Ejemplo de actividades sobre la carga por polarización. ....	122
<b>Figura 58</b> Conteo de la cantidad de respuestas que suben, bajan, se mantienen en el nivel o bajan a descripción por cada par de actividades, vinculado a las características didácticas de la SEA. ....	122
<b>Figura 59</b> Red sistémica para las categorías sobre las características didácticas de la SEA .....	125
<b>Figura 60</b> Red Sistémica para la carga por frotación.....	129
<b>Figura 61</b> Red Sistémica para la carga por polarización.....	132
<b>Figura 62</b> Red Sistémica para la carga por inducción.....	134

<b>Figura 63</b> Red Sistémica para la carga por contacto.....	136
<b>Figura 64</b> Red Sistémica para la naturaleza de la interacción entre cargas .....	139
<b>Figura 65</b> Red Sistémica para las líneas de campo eléctrico .....	142
<b>Figura 66</b> Red Sistémica para la densidad de líneas de campo eléctrico.....	144
<b>Figura 67</b> Red Sistémica para el efecto de la jaula de Faraday.....	148
<b>Figura 68</b> Red Sistémica para el efecto punta.....	150
<b>Figura 69</b> Parte de la respuesta del estudiante 44 en la actividad 2 .....	159
<b>Figura 70</b> Gráfica que corresponde al número de respuestas clasificadas en cada nivel de adecuación para cada dimensión (frotación, polarización, inducción y contacto) y por cada actividad (1 al 27). La cantidad de respuestas es representada por el tamaño de los círculos.....	162
<b>Figura 71</b> Gráfica que corresponde al número de respuestas clasificadas en cada nivel de adecuación para cada dimensión (naturaleza de la interacción entre cargas, líneas de campo eléctrico y densidad de líneas de campo eléctrico) y por cada actividad (1 al 27). La cantidad de respuestas es representada por el tamaño de los círculos .....	167
<b>Figura 72</b> Gráfica que corresponde al número de respuestas clasificadas en cada nivel de adecuación para cada dimensión (jaula de Faraday y efecto punta) y por cada actividad (1 al 27). La cantidad de respuestas es representada por el tamaño de los círculos. ....	171
<b>Figura 73</b> dibujo que acompaña la respuesta escrita del estudiante 50 en la actividad 17 .....	179
<b>Figura 74</b> dibujo que acompaña la respuesta escrita del estudiante 50 en la actividad 18 .....	180
<b>Figura 75</b> dibujo que acompaña la respuesta escrita del estudiante 14 en la actividad 11 .....	181
<b>Figura 76</b> dibujo de una de las respuestas de la estudiante 59 en la actividad 23.....	187
<b>Figura 77</b> dibujo de la respuesta del estudiante 21 en la actividad 23 .....	188
<b>Figura 78</b> dibujo de la respuesta del estudiante 51 en la actividad 17.....	189
<b>Figura 79</b> Dibujo que acompaña la respuesta del estudiante 17 en la actividad 19 .....	198
<b>Figura 80</b> Dibujo que corresponde a la respuesta del estudiante 29 en la actividad 23.....	199
<b>Figura 81</b> Dibujo que corresponde a la respuesta del estudiante 30 en la actividad 6.....	201
<b>Figura 82</b> Dibujo que es parte de la respuesta del estudiante 62 en la actividad 17 .....	201
<b>Figura 83</b> Respuesta del estudiante 40 para las actividades 6 y 7.....	202
<b>Figura 84</b> Imagen de la actividad 26 del dossier de los estudiantes .....	204
<b>Figura 85</b> Respuesta del estudiante 34 en la actividad 3.....	206
<b>Figura 86</b> Ambas imágenes son representaciones de la intensidad del campo eléctrico. La imagen de la izquierda lo hace por color (Clarke et al., 2007) y la imagen de la derecha lo hace por el tamaño de los vectores. ....	229

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los antecedentes preliminares de esta investigación y la estructura del documento.

Estudiantes de educación media experimentando los efectos de la inducción electromagnética haciendo pasar un imán por un tubo de plástico con bobinas y con un tubo de cobre



El conocimiento desarrollado durante años de investigación científica nos permite afirmar que toda la materia es eléctrica, pues está conformada por electrones y protones. Por lo tanto, en nuestra vida cotidiana nos enfrentamos constantemente a diversos fenómenos electrostáticos, como, por ejemplo, la estática que podemos percibir al sacarnos un sweater, leves descargas eléctricas que recibimos al tocar una persona u objeto, ciertos fenómenos de la naturaleza, como los rayos, o el funcionamiento de cualquier aparato eléctrico que tengamos en el hogar, como una impresora.

Los fenómenos electrostáticos han sido estudiados desde el año 624 a.C. a la fecha, teniendo así una historia de más de 2.000 años de investigación. A lo largo de este tiempo, los científicos han transitado desde una el concepto de fluido eléctrico al concepto de carga eléctrica que manejamos hoy en día. Lo que actualmente sabemos es que los componentes de los átomos (protones, neutrones y electrones) son responsables de los fenómenos electrostáticos, que la carga es invariante y que se puede cuantificar a partir de la carga fundamental, que es la carga del electrón (o del protón en valor absoluto). También sabemos que los materiales pueden cargarse de distintas formas, y que su composición atómica impactará en su comportamiento. Por consiguiente, explicar los fenómenos electrostáticos a partir de lo que ocurre a nivel de cargas eléctricas implica contar con un buen desarrollo de pensamiento abstracto, ya que nuestros sentidos solo nos permiten percibir la consecuencia de estos fenómenos, pero no sus causas. Esta es una de las dificultades que enfrentan los docentes a la hora de enseñar los fenómenos electrostáticos a estudiantes que tienen distintos niveles de desarrollo de su pensamiento abstracto.

Esta investigación surge a partir de un piloto que se llevó a cabo el año 2015 con 16 estudiantes de la asignatura de electromagnetismo de la Pedagogía en Física y Matemática de la Universidad de Santiago de Chile (USACH). En esta asignatura, el objetivo era que estos futuros docentes aprendieran dos modelos clave para su futura actividad docente: el modelo de distribución e interacción de cargas eléctricas (que en la escuela chilena se enseña a estudiantes de 13 años), y el modelo de campo eléctrico (que en la escuela chilena está dirigido a estudiantes de 17 años). En esta instancia, se les pidió a los futuros docentes que explicaran la relación entre fuerza eléctrica e intensidad de campo eléctrico, líneas de campo eléctrico e intensidad de campo eléctrico, y potencial eléctrico y energía potencial eléctrica. El resultado fue poco favorable, ya que ninguno de los 16 participantes pudo

establecer unas relaciones satisfactorias entre estos diferentes conceptos, mostrando así importantes carencias en el dominio de estos modelos científico (modelo de cargas y modelo de campo). Esto respondía, muy probablemente, a que el programa de la asignatura hasta ese año no contemplaba instancias de desarrollo de explicaciones y razonamientos sobre los fenómenos electrostáticos, sino solamente el desarrollo de problemas matemáticos relacionados con dichos fenómenos. Es por este motivo que se decidió modificar dicho programa, con el objetivo de mejorar la comprensión conceptual de los futuros docentes de física y, por lo tanto, su competencia como docentes.

En la nueva orientación que se dio a la asignatura de electromagnetismo, se diseñó una secuencia de enseñanza aprendizaje (SEA) basada en investigaciones previas sobre la comprensión de los estudiantes de los conceptos electrostáticos, y con una orientación didáctica dirigida a la discusión y comprensión de fenómenos, más que a la reproducción de cálculos matemáticos. La estructura de la SEA incluía la manipulación de dispositivos electrostáticos como el electroscopio, el generador Van de Graaff o los electrodos, incluyendo la predicción de fenómenos, su observación y contraste, la formalización a través de representaciones visuales de las cargas y las líneas de campo, etc.

En el contexto de la implementación de esta nueva SEA orientada a la comprensión conceptual de la electrostática, quisimos centrarnos en analizar cómo eran y cómo evolucionaban las explicaciones de los estudiantes. El interés en dichas explicaciones radica en que son un componente diario y esencial del ejercicio docente, y que son una forma de conocer y comprender los modelos que construyen los estudiantes. Además, es conocido que los profesores principiantes tienen dificultades para construir explicaciones en el aula y obtener explicaciones de los estudiantes. Es por esto por lo que decidimos estudiar las explicaciones de los futuros profesores de Física y Matemática, para conocer como las construyen, orientado el estudio a evaluar el posible impacto del diseño didáctico de la SEA en la evolución de las explicaciones de los estudiantes.

El presente trabajo está estructurado en capítulos que se organizan de la siguiente manera:

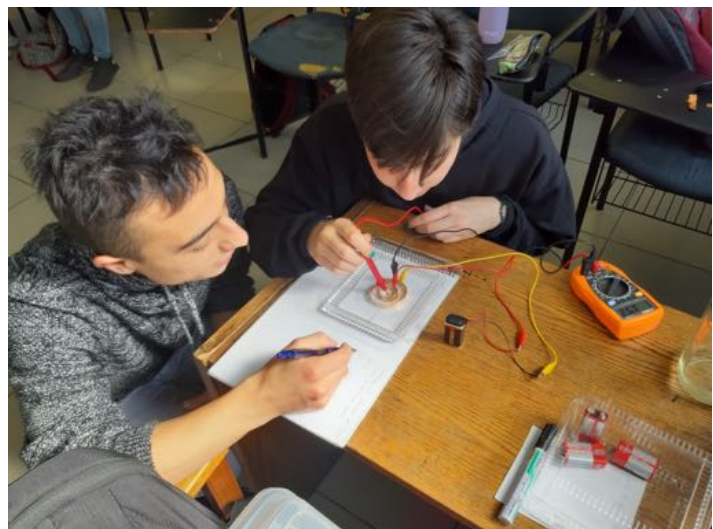
- En el capítulo 2, se presenta el planteamiento del problema que aborda esta investigación, su objetivo general y las preguntas que lo guían.



- Luego, en el capítulo 3 se presentan los constructos teóricos que lo sustentan: la evidencia que existe hoy en día en torno al aprendizaje de las ciencias, los conceptos de electrostática que los docentes deben manejar, y la evidencia que existe sobre su enseñanza y aprendizaje.
- El capítulo 4 contiene los detalles de la metodología de esta investigación, como el contexto en el que se desarrolla y sus participantes, la explicación detallada de la SEA, y los métodos de recolección y análisis de los datos.
- A continuación, en el capítulo 5 se pueden encontrar los resultados del estudio, incluyendo las categorías encontradas, la evolución de las explicaciones de los estudiantes a lo largo de la SEA, y el análisis del impacto de las características de la SEA en la progresión de las explicaciones.
- Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones emanadas de este trabajo, además de sus limitaciones e implicaciones didácticas.

## **CAPÍTULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

En este capítulo, se presentan los antecedentes que permiten comprender el problema a investigar y su relevancia para la didáctica de la ciencia. También se explica el enfoque que se le dará a la investigación en base al problema detectado. Finalmente, se presenta el objetivo general y las preguntas que pretende responder el estudio.



**Estudiantes trabajando en determinar las zonas equipotenciales e intensidades de campo eléctrico en una sistema de electrodos concéntricos**

## 2.1 Planteamiento del problema

El problema de investigación que guía este trabajo es el nivel insatisfactorio de comprensión conceptual orientada a elaborar explicaciones sobre electrostática de los estudiantes de la asignatura de electromagnetismo, ubicada en el tercer año de Pedagogía en Física y Matemática de la Universidad de Santiago (USACH). Previa a la aplicación de este estudio, esta comprensión conceptual no alcanzaba los estándares de formación (Mineduc, 2012) que la máxima autoridad nacional, el Ministerio de Educación de Chile, establece para el dominio de esta temática una vez finalizada la carrera, específicamente en el estándar 7 para la formación de profesores de física (Comprende relaciones entre campos eléctricos y magnéticos). Como se ha dicho en la introducción, este problema fue detectado al analizar las evaluaciones internas de síntesis que los docentes en formación rinden antes de titularse. En la figura 1, se presenta un ejemplo de un ejercicio planteado el piloto de esta investigación y un ejemplo de las respuestas de un estudiante.

**Escribe una frase o párrafo, donde involucres los conceptos que se detallan. Si te es necesario involucrar otros conceptos en tu descripción, lo puedes hacer sin ningún problema, pero es necesario que aparezcan los destacados.**

**a) Campo eléctrico, intensidad y líneas de campo eléctrico**

**b) Potencial eléctrico, energía potencial eléctrica y diferencia de potencial**

Respuesta estudiante 3:

*a) Se genera un campo eléctrico si en un espacio en particular se deja una carga  $Q$  que perturba el espacio a través de las distintas líneas de campo eléctrico. Este campo eléctrico, anteriormente descrito será más intenso si hay mayor cantidad de líneas de campo.*

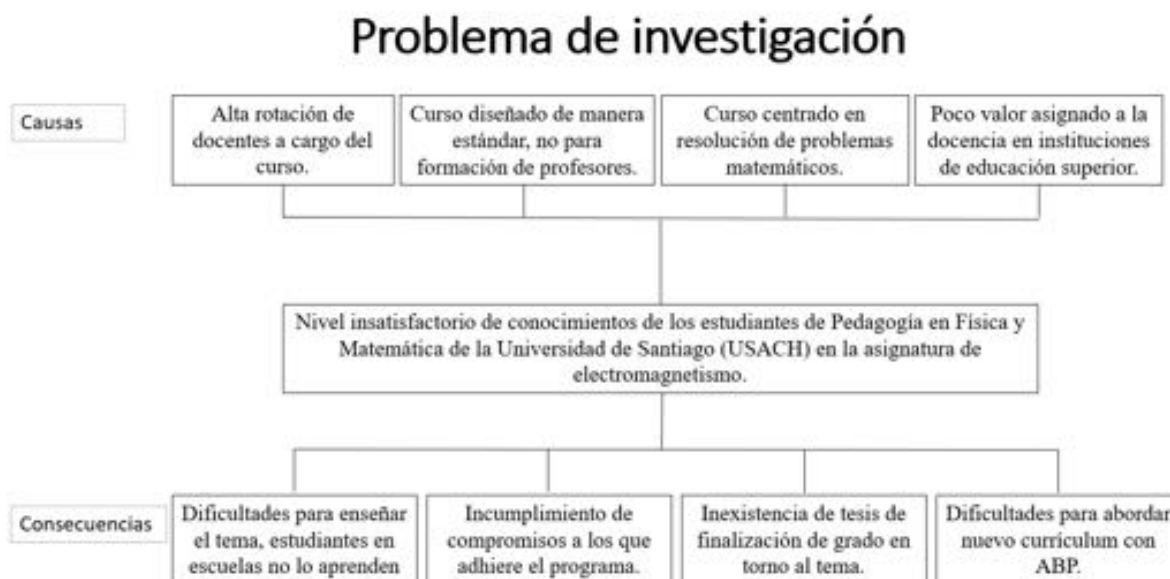
*b) El potencial eléctrico, la energía potencial eléctrica y la ddp, corresponden al mismo concepto el cual se comprende como la energía ( $j$ ) que recibe una carga  $Q(c)$  para recorrer todo un circuito. Se puede hacer la analogía como la energía potencial. Ya que para volver al punto de origen debe emplear toda esa energía.*

**Figura 1** Ejemplo de respuesta de estudiante en el piloto de la investigación

En la primera respuesta se presenta una idea de mecanismo o producto, de que las líneas son las que perturban el espacio. Por otro lado, se establece una relación poco clara entre la intensidad y las líneas de campo al momento de describir el flujo eléctrico. En la segunda respuesta, el estudiante no propone relaciones entre los conceptos solicitados e incluso señala que son sinónimos. Este ejemplo grafica el nivel de confusión que tenían los estudiantes de la carrera de Pedagogía en Física y Matemática antes de la implementación de esta investigación.

Esta situación no es un caso aislado. Según el Ministerio de Educación de Chile, el nivel de conocimientos de los docentes de física sobre el electromagnetismo también es insuficiente a nivel nacional. En el *Instrumento de evaluación de conocimientos específicos y pedagógicos* que se aplica a los profesores en ejercicio del sistema escolar como parte de su evaluación docente, el porcentaje de logro a nivel nacional fue de 47% en el área de electromagnetismo y óptica (Mineduc, 2020).

Esta carencia de comprensión conceptual de la electrostática responde a un conjunto de posibles causas y tiene múltiples consecuencias. A continuación, en la figura 2, presentamos algunas de las más relevantes.

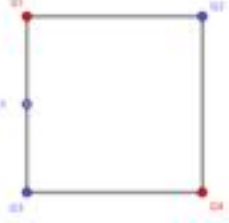


**Figura 2** Problema de investigación.

Como muestra el diagrama, la primera causa potencial es que, históricamente, hubo mucha rotación de docentes a cargo del curso, llegando a tener incluso uno diferente cada año. Esto podría haber impactado en las posibilidades de rediseñar el curso con una mirada a largo plazo. Además, existe evidencia que afirma que la rotación docente puede impactar en el aprendizaje de los estudiantes (Ronfeldt et al., 2013).

Una segunda causa tiene relación con el diseño del curso, que fue pensado para la formación de ciencias en general, no para la formación de profesores y, por lo tanto, no cumple la tarea de ser un modelo de la manera en que ellos deberían impartir ese curso frente a un grupo de estudiantes.

Además, a lo largo de las distintas generaciones, el curso se ha enseñado centrándose en la resolución de problemas tradicionales de tipo cuantitativo, sin dar espacio a la experimentación, discusión o comprensión más profunda de los constructos teóricos. Un ejemplo de esto es el problema ilustrado en la figura 3, donde se pide a los estudiantes que calculen la intensidad de campo eléctrico en un punto, dada una distribución de cargas puntuales. Para resolver este ejercicio, los estudiantes necesitan conocer la manera de representar la dirección y el sentido de las líneas de campo, y herramientas matemáticas, como el álgebra vectorial. El primer paso para responder el ejercicio es determinar el sentido de los vectores intensidad de campo eléctrico aportados por cada carga en el punto en que se solicita. Luego, deben calcular las distancias entre cada carga y el punto donde se solicita el vector intensidad de campo eléctrico, para ello los estudiantes deben utilizar herramientas de la geometría plana. Posteriormente, tienen que realizar la sumatoria de la intensidad de campo que aporta cada carga en ese punto, considerando la descomposición vectorial para una correcta aplicación del álgebra vectorial. El siguiente paso es trabajar las ecuaciones hasta determinar el resultado final, que es el que se presenta en la figura 3. En este ejemplo de ejercicio, los estudiantes no necesitan comprender qué es el campo eléctrico, ni sus propiedades, ni su impacto en la evolución de la ciencia. Por lo tanto, un estudiante que no comprende estos conceptos, pero sí maneja conocimientos de la mecánica y del álgebra vectorial podría resolver el problema correctamente, dando la señal errónea de que maneja estos conceptos de la electrostática.

Problema	Solución
<p>La figura que se muestra a continuación es un cuadrado. En cada vértice del cuadrado se colocan cargas de magnitud "q". Determinar el vector campo eléctrico resultante en el punto A que está en la mitad de uno de los lados del cuadrado. Q1 y Q4 son cargas positivas y Q2 y Q3 son cargas negativas.</p> 	<p><math>a</math>: medida del lado del cuadrado</p> $\sum E_x = E_2 \cos \alpha - E_4 \cos \alpha$ $\sum E_x = -\frac{kq}{\left(\frac{a\sqrt{5}}{2}\right)^2 \sqrt{5}} - \frac{kq}{\left(\frac{a\sqrt{5}}{2}\right)^2 \sqrt{5}} = 0$ $\sum E_y = -E_1 - E_3 + E_2 \sin \alpha + E_4 \sin \alpha$ $\sum E_y = -\frac{kq}{\left(\frac{a}{2}\right)^2} - \frac{kq}{\left(\frac{a}{2}\right)^2} + \frac{kq}{\left(\frac{a\sqrt{5}}{2}\right)^2 \sqrt{5}} + \frac{kq}{\left(\frac{a\sqrt{5}}{2}\right)^2 \sqrt{5}}$ $\sum E_y = \frac{8kq}{a^2} \left[ \frac{1}{5\sqrt{5}} - 1 \right]$ $\vec{E} = (0; \frac{8kq}{a^2} \left[ \frac{1}{5\sqrt{5}} - 1 \right])$

**Figura 3** Ejemplo de problema tradicional del cálculo de la intensidad del campo eléctrico en el contexto de cargas puntuales y su solución.

En general, muchas prácticas docentes caen en la necesidad de involucrar ecuaciones y fórmulas algebraicas para la comprensión de los conceptos claves de la electricidad, añadiendo otro grado de dificultad al proceso de enseñanza/aprendizaje. Las fórmulas algebraicas tienen sentido cuando deseamos cuantificar las relaciones entre variables, pero el paso previo es comprender con cierta profundidad el interés y significado de tales variables, por medio de análisis cualitativo (Cohen et al., 1983).

La última causa que podríamos considerar es el poco valor que los académicos le otorgan a la docencia, en comparación con la investigación en las instituciones de educación superior chilenas. Esto impacta en la formación profesional de los estudiantes ya que no permite que se le asigne tiempo al rediseño y mejoramiento continuo de los cursos que se imparten. Para Boyer (1990) esta lógica es fomentada por el sistema de asignación de plazas en las universidades, que se basa en los rankings de desarrollo profesional de los académicos, donde estos son evaluados principalmente por su capacidad investigativa, asignando poca importancia a su desempeño docente.

El bajo desempeño de los estudiantes en la asignatura de electromagnetismo puede ir también asociado a consecuencias de distinta relevancia. La primera y más importante de todas es que, al no haber aprendido bien la temática en su formación profesional, los

futuros docentes serán probablemente poco rigurosos al explicarlo a sus estudiantes en las escuelas, ya que nadie puede enseñar lo que no entiende. Esto se traduciría en que sus alumnos del sistema escolar tampoco aprenderán sobre el electromagnetismo. En esta causa radica la relevancia de esta investigación. La última prueba PISA del 2018 (Agencia de calidad de la educación, 2019) reportó que, en la evaluación de ciencias, Chile alcanzó un resultado menor al del promedio de países de la OCDE, al igual que en las mediciones de años anteriores. Si bien el resultado está considerablemente por encima de los demás países de Latinoamérica, es aún preocupante. Según el instrumento, alrededor de un tercio de los estudiantes no demuestra poseer competencias científicas mínimas. Considerando que esta evaluación fue aplicada a estudiantes de 15 años, a quienes solo les faltan dos o tres años de escolaridad para completar los doce años del sistema escolar que comprende Chile, no es aventurado señalar que no se están cumpliendo a cabalidad los objetivos educativos establecidos por los programas nacionales. Los resultados de los estudiantes, además, están determinados por sus condiciones socioeconómicas, existiendo una brecha de casi 100 puntos entre los clasificados como de nivel socioeconómico alto y los de nivel socioeconómico bajo. Esta evidencia responde a la segregación imperante en el sistema escolar chileno y se refleja también en otras asignaturas. Teniendo la educación de los jóvenes como norte, consideramos necesario estudiar los distintos problemas que se traducen en estos resultados.

Una segunda consecuencia es el incumplimiento de los compromisos a los que el programa de formación (Pedagogía en Física y Matemática) adhiere con la institucionalidad nacional. Uno de ellos es la evaluación inicial (Evaluación Nacional Diagnóstica de la Formación Inicial Docente) a la que deben someterse los estudiantes al terminar su formación universitaria. Que la mayoría de los estudiantes apruebe este examen es también esencial para la acreditación del programa académico a nivel nacional. En el sistema universitario chileno, las carreras e instituciones de educación superior deben acreditarse regularmente ante instituciones especializadas para poder optar a que sus estudiantes reciban apoyo económico desde el estado. Este proceso es aún más importante para las carreras de educación y salud, ya que si no reciben la acreditación deben dejar de funcionar. Por lo tanto, un mal desempeño sostenido podría traducirse en el cierre del programa de formación.

Una tercera consecuencia identificada es que como los estudiantes no comprenden los fenómenos electromagnéticos, prácticamente no proponen tesis de finalización de grado en torno al tema, impidiendo así su profundización. Como se puede ver en el sitio web de la carrera<sup>1</sup>, antes de la implementación de esta investigación solo se propuso 1 seminario de grado sobre el tema. En las conclusiones de este trabajo se presentan también los proyectos en la temática de electrostática que algunos participantes de este estudio desarrollaron, posterior a su paso por la asignatura de Electromagnetismo.

La última consecuencia sería la dificultad que nuestros egresados tendrán a la hora de abordar el nuevo currículum nacional, que contempla el Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) como estrategia metodológica. Para poder responder exitosamente a este desafío, el conocimiento del electromagnetismo no es suficiente. Es necesario también presentar estrategias didácticas a los futuros docentes que puedan utilizar en sus aulas. Domènech-Casal (2017) sugiere que para elaborar propuestas didácticas en el contexto del ABP los docentes deben ser capaces de “secuenciar etapas, productos parciales y dinámicas sociales de creación del conocimiento” e “identificar los modelos científicos y crear los andamios didácticos y apoyos para cada etapa”. En las condiciones actuales, nuestros estudiantes podrían no estar capacitados para llevar a cabo algunas de estas tareas en la temática del electromagnetismo. Por lo tanto, es necesario rediseñar la manera de enseñar este curso en nuestro programa de formación.

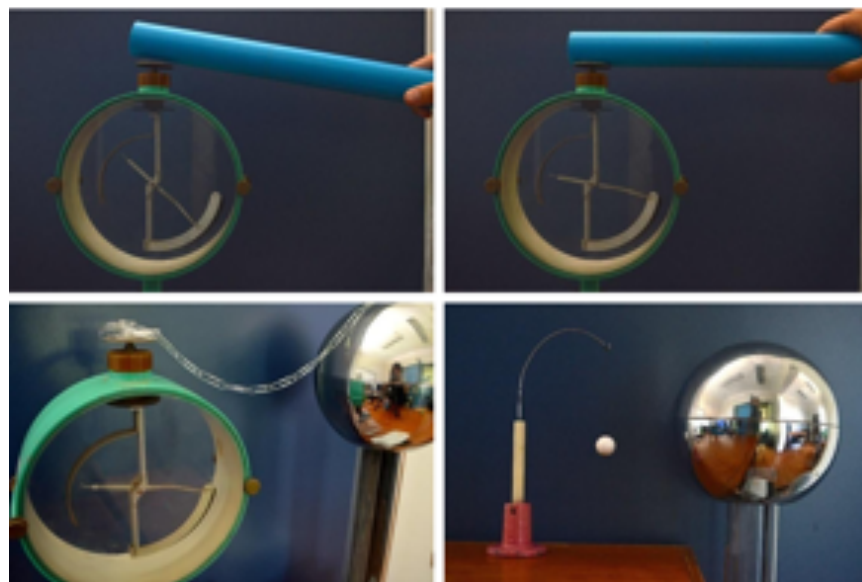
---

<sup>1</sup> [https://fisica.usach.cl/es/tesis-de-grado?field\\_a\\_o\\_de\\_publicacion\\_value=&field\\_carrera\\_tid=457](https://fisica.usach.cl/es/tesis-de-grado?field_a_o_de_publicacion_value=&field_carrera_tid=457)



## 2.2 Planteamiento de la investigación

A raíz del problema identificado, sus causas y consecuencias, nos propusimos desarrollar este trabajo en torno a la elaboración de una propuesta que pudiera ayudar a mejorar la comprensión de los estudiantes de la temática estudiada. De esta manera, en este trabajo proponemos una Secuencia de Enseñanza Aprendizaje (SEA) basada en investigaciones previas sobre la comprensión de los estudiantes de los conceptos electrostáticos (Furió y Guisasola, 1998a). Esta SEA encarna los principios con los que creemos debe ser diseñado el nuevo curso de electromagnetismo. Uno de ellos es que los docentes en formación puedan aprender los conceptos de una asignatura disciplinar en un contexto similar al que se espera que ellos repliquen una vez que ejerzan su profesión, incluyendo instancias de práctica de posibles estrategias de enseñanza del tema, lo que podría promover la transferencia de conocimientos, en específico de estrategias didácticas para enseñar otros contenidos. Por lo tanto, la SEA combina discusiones grupales en el aula (Mercer, 2010), transferencia de conocimiento de los estudiantes hacia un nuevo contexto (Billing, 2007), actividades de modelización (Schwarz, 2009) y demostración interactiva (Sokoloff y Thornton, 2004). En este curso, los estudiantes aprenden dos modelos clave para su futura actividad docente: el modelo de distribución e interacción de cargas eléctricas, y el modelo de campo eléctrico, que se detallarán en el capítulo 3. Por lo tanto, el curso incluye además la predicción, observación, contraste, formalización y aplicación, en la que los estudiantes tratan diferentes métodos de electrización en materiales dieléctricos (por ejemplo, atrayendo trozos de papel mediante un dieléctrico cargado), inducción en materiales conductivos (por ejemplo: inducción de un electroscope por un generador Van de Graaff), representación del campo eléctrico (por ejemplo, alineación de hilos en aceite mediante un electrodo circular) o flujo eléctrico y ley de Gauss (determinar distribución de cargas para el efecto punta).



**Figura 4** Montajes experimentales utilizados en la SEA.

Esta investigación se enfoca en analizar las explicaciones que provienen de los futuros docentes en torno al tema. Consideramos que las explicaciones son fundamentales ya que son una de las principales herramientas de los profesores para transmitir los conceptos, y por lo mismo, deben elaborarlas a diario (Geelan, 2012). Además, el ejercicio de elaborar explicaciones permite a los estudiantes participantes de esta investigación ejercitar esta habilidad. A su vez, al ejercitar esta habilidad de manera escrita, la retroalimentación se vuelve más eficiente porque permite identificar las dificultades conceptuales y deficiencias que presenta el estudiante sobre el tema que explica, y al contar con un registro escrito es posible seguir su evolución a lo largo de la SEA. Por otro lado, existe evidencia de que los profesores noveles tienen dificultades para elaborar explicaciones y para obtenerlas de parte de sus estudiantes (Zangori, y Forbes, 2013); y de que su elaboración de explicaciones se ve directamente influenciada por cómo estas les fueron presentadas en su formación inicial (Cabello y Topping, 2014). Por lo tanto, nos planteamos trabajar sobre las explicaciones de los futuros profesores de Física y Matemática, para intentar develar sus conocimientos a medida que las construyen.

## 2.3 Objetivos y preguntas de investigación

A partir del contexto recién presentado en las dos secciones anteriores, se planteó un objetivo general para esta investigación. Dicho objetivo es:

- *Analizar las explicaciones que elaboran los futuros profesores de física sobre fenómenos electrostáticos, así como su evolución a lo largo de la secuencia y la influencia de las componentes didácticas de esta secuencia.*

A partir de este objetivo general definimos tres preguntas de investigación, las cuales generan sub-preguntas que este proyecto intenta responder:

1. *¿Qué tipos de explicaciones sobre fenómenos electrostáticos elaboran los futuros profesores de física?*

Esta primera pregunta, a su vez, puede dividirse en tres preguntas más específicas:

- 1.1 *¿Qué tipos de explicaciones basadas en la distribución de cargas elaboran los futuros profesores de física?*
- 1.2 *¿Qué tipos de explicaciones basadas en el campo eléctrico elaboran los futuros profesores de física?*
- 1.3 *¿Qué tipos de explicaciones basadas en la combinación de la distribución de cargas y el campo eléctrico elaboran los futuros profesores de física?*

Además de caracterizar los tipos de explicaciones, también nos interesa conocer su evolución a lo largo de la SEA que hemos descrito en el planteamiento del problema. Por lo tanto, la segunda pregunta de investigación es la siguiente:

2. *¿Cómo evolucionan las explicaciones de los estudiantes a largo de una SEA diseñada para la comprensión conceptual de los modelos de distribución e interacción de cargas y el modelo de Campo Eléctrico?*

Finalmente, partiendo de la premisa de que esta evolución está relacionada con el propio desarrollo didáctica de la SEA, la tercera pregunta de investigación es:

3. *¿Cómo influyen las características didácticas de la SEA en la evolución de dichas explicaciones?*

## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presentan los antecedentes teóricos sobre los que se ha construido esta investigación. Este marco teórico se divide en dos grandes temáticas: los consensos existentes en torno a la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias en la escuela, y el tratamiento del contenido de electrostática y las dificultades que enfrentan los estudiantes al abordarlo.

Estudiante explicando el funcionamiento de un theremin en el contexto de una feria científica



## **3.1 La enseñanza y aprendizaje de las ciencias**

En este primer apartado del capítulo 3 se plantea un marco general sobre los procesos de enseñanza y aprendizaje de las ciencias en general y de la física en particular, reflejando los principales consensos que existen en el ámbito de la didáctica de las ciencias, y que tendrán implicaciones tanto en el diseño de la SEA como en la metodología de análisis de las explicaciones del alumnado. Más adelante, en el apartado 3.2 nos centraremos en la enseñanza y aprendizaje de la electrostática.

### **3.1.1 Una aproximación al aprendizaje de las ciencias**

A lo largo de la historia de la educación, los procesos de enseñanza y aprendizaje han transitado por diversos modelos educativos. Actualmente existe un importante consenso dentro del área sobre el qué, el cómo y el para qué enseñar ciencias durante la escolaridad, que se desarrolla a continuación.

#### **3.1.1.1. Breve historia de la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias**

Previo a los años 60 del s. XX, el modelo predominante era el conductista, basado en las ideas de Skinner, Watson y Pavlov, que concibe el aprendizaje como el cambio en los comportamientos observables. Para el conductismo, los estudiantes son como una tabla rasa sobre la que el enseñante trabajará, esto significa que se asume que no tienen aprendizajes previos relevantes y que se les considera seres pasivos, que solo reaccionan a los estímulos entregados. Por lo tanto, enseñar implica explicar bien con los contenidos, utilizando recursos apropiados (Sanmartí, 2002). En este contexto, la didáctica de las ciencias surge como una necesidad ante las demandas tecnológicas de la sociedad. Uno de los hechos más icónicos es el lanzamiento del Sputnik en 1957, que en los Estados Unidos impulsa la creación de un nuevo currículo orientado a fortalecer las matemáticas, las ciencias y la tecnología (Pacheco, 2003). Durante los siguientes años surgen programas como *Biological Sciences Curriculum Study* (BSCS), *Chemical Education Material Study* (CHEMS), *Physical Science Study Committee* (PSCC), *Intermediate Science Curriculum Study* (ISCS), *Introductory Physical Science* (IPS), *Harvard Project Physics*, *Earth Science Curriculum Project* (ESCP), *New Math*, Nuffield en Reino Unido, entre otros. En este período, el aprendizaje se concibe como el resultado de un proceso de redescubrimiento de la ciencia

basado fuertemente en las ideas Piagetianas. Esta visión de enseñanza le asigna mucha importancia a la aplicación del método científico, el que debe ser adaptado a los niveles de abstracción conceptual de los estudiantes.

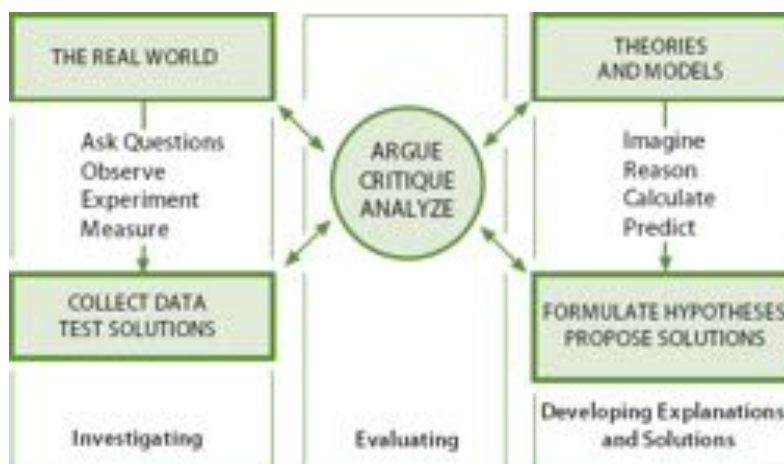
En la década de los 80 comienzan a emerger las ideas constructivistas, que valoran las ideas que los estudiantes tienen sobre los fenómenos científicos, antes de la instrucción. Por lo tanto, enseñar implica ayudarlos a modificar estas ideas por medio de actividades donde las contrastan con las ideas científicas. En este período se observan grandes esfuerzos de parte de la didáctica de las ciencias – disciplina emergente a la época – por impulsar proyectos para identificar y comprender las ideas previas de los estudiantes (Jiménez, 2012).

Más adelante, con la llegada de los años 90, comienzan a adquirir importancia las teorías que le otorgan valor a la interacción social en el proceso de aprendizaje. Según Vigotsky, el precursor de la aproximación sociocultural al aprendizaje, el lenguaje es una herramienta esencial para el desarrollo cognoscitivo ya que, en conjunto con el pensamiento, permiten crear una herramienta cognitiva mediante la cual podrán ejecutar diversas tareas. Por lo tanto, ya no se concibe el aprendizaje como el resultado de la interacción entre el estudiante y el medio físico, sino que entre el estudiante y su medio sociocultural (Edwards y Mercer, 1987). Entonces, el aprendizaje depende de la calidad de esta interacción y de la zona de desarrollo en que se encuentra el aprendiz. En este contexto, la enseñanza debe orientar al alumnado hacia la autorregulación de su forma de pensar, hacer, hablar, sentir y actuar (Perales y Cañal, 2000). La importancia asignada al lenguaje en el proceso de aprendizaje es tal que incluso se habla de que los estudiantes deben aprender a “hablar ciencia” (Lemke, 1997). En este paradigma, identificar la zona de desarrollo próximo del estudiante es clave para diseñar los andamiajes que le permitan avanzar en su proceso de aprendizaje.

Bajo este marco, se hace imposible continuar refiriéndose a contenidos y habilidades como conceptos independientes. Como consecuencia, a partir de los 2000 se comienza a hablar de una educación que desarrolle competencias para la vida. Una competencia se define entonces como “la capacidad de actuar eficazmente en situaciones diversas, complejas e imprevisibles; se apoya en conocimientos, pero también en valores, habilidades, experiencia...” (EURYDICE, 2002). Este marco competencial es el que inspira la evaluación PISA, instrumento con que se mide el desempeño de los sistemas escolares de

los distintos países pertenecientes a la OCDE. Actualmente, esta evaluación mide competencias consideradas necesarias para el siglo XXI (como el pensamiento crítico, la comunicación, la creatividad, la competencia ciudadana y digital, etc.).

En el año 2012, *National Research Council* propone un marco curricular con finalidades de aprendizaje que integren la selección de ideas clave con la participación en prácticas científicas. Esta propuesta, que realza el valor de las 8 prácticas científicas (Duschl et al, 2007) en el aula – no solamente de la indagación, que era la más popular en ese entonces (Couso, 2014) – se traduce en que “las actividades de clase se vuelven la base para aprender sobre experimentos, datos y evidencia, discurso social, modelos y herramientas, y matemáticas para desarrollar la habilidad de evaluar enunciados de conocimiento, conducir investigaciones empíricas y desarrollar explicaciones” (Bybee, 2011).



**Figura 5** Las tres esferas de actividad para científicos e ingenieros (NRC, 2012).

En la figura 5, las actividades de la izquierda se relacionan con la investigación empírica, es decir con la práctica de indagación. Entre ellas se encuentra observar fenómenos, planear experimentos, construir instrumentos y recolectar datos, entre otras. Por otra parte, las actividades de la derecha se relacionan con el desarrollo de explicaciones y soluciones, es decir, con la modelización. Esto implica trabajar en base a teorías ya desarrolladas, expandirlas, o crear nuevos modelos. Al medio de estos dos tipos de actividades, se encuentra la evaluación, es decir, la práctica de argumentación. Las flechas bidireccionales indican que este paso se repite durante todo el proceso de trabajo. En esta etapa es necesario el análisis y la crítica. Por lo tanto, la argumentación permite transitar entre el mundo real y el mundo de las ideas científicas.

En la redefinición de las competencias científicas, recientemente se ha propuesto agregar nuevos elementos a la evaluación (Osborne y Archer, 2020) que permitirán abarcar competencias del ámbito STEM (como la alfabetización matemática y computacional, científica, de la ingeniería y tecnológica). Por un lado, se agregan nuevos conocimientos, tales como los sistemas socio ambientales y la sustentabilidad, el desarrollo del conocimiento científico y su potencial mal uso, y la informática, computación, alfabetización en datos y pensamiento computacional (Big Data, IA, etc.). Por otro lado, se agregan nuevas competencias, como el uso del conocimiento científico para tomar decisiones y actuar, y el uso del pensamiento probabilístico para entender y convivir con el riesgo. Además, se expandieron algunas de las competencias ya existentes, obteniendo así dos nuevas competencias como lo son el buscar información y diseñar sistemas complejos de investigación a la hora de evaluar y diseñar una indagación científica y el interrogar grandes bases de datos a la hora de interpretarlas para tomar decisiones basadas en el juicio científico. Finalmente, se agregó una nueva dimensión: la identidad, mediante la cual se espera que los estudiantes desarrollen capital científico, ética y valores, la capacidad de usar la ciencia y otras herramientas para obtener beneficios personales y sociales, y la habilidad de llevar a cabo experimentos y prácticas científicas inclusivas.

Como se puede ver en esta breve línea de tiempo, la enseñanza ha transitado por diversos paradigmas, cada uno con sus distintas concepciones del aprendizaje y la enseñanza. De igual modo, la didáctica ha evolucionado de manera acorde para alinearse con el marco educativo de cada época. Así, la didáctica ha transitado desde una etapa precientífica (antes de los años 70), a una proto científica (en los años 80), luego a una de desarrollo científico (en los años 90) para finalmente llegar a la etapa de normalidad investigadora en que se encuentra actualmente (Jiménez 2012). Esta evolución de los paradigmas de enseñanza y de la didáctica se deben a que, a medida que han pasado los años, se ha admitido la complejidad del proceso educativo, lo que ha llevado a buscar nuevas formas de abordarla. En el caso de la enseñanza de las ciencias, además es necesario transmitir la cultura propia de la disciplina, que incluye un lenguaje específico, maneras de hacer, de pensar y diferentes tipos de representaciones.



### 3.1.1.2. Algunos consensos en didáctica de las ciencias

Si bien existen muchas ramas y tendencias dentro de la didáctica de las ciencias, que han ido evolucionando con el avance de las investigaciones y los programas marco a lo largo de los años, podríamos decir que existen algunos consensos en torno a la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias que podrían resultar esenciales para el trabajo en aula. Estos elementos son:

1. Aprender revisando las ideas alternativas y los razonamientos espontáneos: para ello, es necesario generar oportunidades para que los estudiantes expresen sus explicaciones previas en el aula. Estos elementos corresponden al punto de partida de los estudiantes y pueden reflejar su tendencia de razonamiento frente a un problema dado (Driver, 1985) desde lo conceptual, y sobre el quehacer de la ciencia (Viennot, 2001).
2. Aprender construyendo ideas: Harlen (2010) propone una estructura de organización para las grandes ideas de la ciencia y sobre la ciencia, que sirve de base para la construcción, por ejemplo, del currículum nacional chileno. Estas grandes ideas de ciencia también pueden entenderse como modelos, es decir, sistemas que entrelazan conceptos y permiten predecir fenómenos. Por esto, es necesario elaborar Modelos Científicos Escolares (MCE) con los estudiantes, mediante los cuales podrán describir, predecir e interpretar diversos fenómenos (Couso, 2014).
3. Aprender una ciencia construida socialmente: La percepción que las personas tienen sobre la ciencia proviene de su interacción con el entorno social. Lederman (2006) propone una taxonomía sobre lo que significa una visión informada de la naturaleza de las ciencias. Señala, por ejemplo, que la ciencia es provisional, es decir, que puede cambiar ya que no es un dogma.
4. Aprender participando en actividades científicas: Esto implica planificar secuencias de actividades estructuradas en base a las prácticas científicas (Osborne, 2014), que se agrupan en indagación (Windschitl et al., 2008; Minner et al., 2010), modelización (Justi, 2006; Gutiérrez, 2004) y argumentación (Jiménez-Aleixandre y

Erduran, 2007), considerando siempre el rol docente como fundamental para guiar al alumnado.

5. Aprender utilizando recursos multimodales: La comunicación verbal no es la única forma de interactuar con los demás. En este sentido, el aula de clases no es la excepción, ya que es otra actividad social. Existen diferentes formas de representación, de producción y de reproducción del conocimiento que permiten no solo transmitir información sino también pensar sobre la ciencia (Klein y Kirkpatrick, 2010). Estos recursos multimodales se incorporan en la narrativa científica con el fin de ayudar a los estudiantes a aprender el lenguaje de la ciencia escolar (Lemke, 1997).
6. Aprender siendo conscientes del propio aprendizaje: Esto implica implementar modelos de evaluación que consideren la metacognición y el auto monitoreo de los procesos de construcción del propio aprendizaje de los estudiantes (Sanmartí, 2010).
7. Aprender tomando en cuenta las emociones: Para esto es necesario reconocer las emociones de los estudiantes en el aula e implicarlos emocionalmente en su propio aprendizaje. De esta manera se puede construir un clima de aula apto para el aprendizaje (Couso et al., 2020).
8. Aprender construyendo identidad individual en la sociedad: Es necesario romper los estigmas asociados a las tareas de la ciencia y a quienes la ejercen. Algunos de estos estigmas tienen que ver con el género (Grimalt-Álvaro y Couso, 2019), la raza, las condiciones socioeconómicas y las características personales. De esta manera, los estudiantes pueden explorar todo su potencial para construir su identidad presente y futura (Archer et al., 2020).
9. Aprender no es solo saber: No basta con tener la mente llena de información si no se es capaz de utilizarla para la resolución de problemas nuevos de la vida real. Esta lógica inspiró el cambio de marco conceptual que derivó en la educación basada en competencias (Couso, 2014).
10. Aprender para actuar en el mundo: En el contexto social actual, caracterizado por la globalidad, la inmediatez de la información y una serie de complejos desafíos para el mundo, es muy relevante trabajar la responsabilidad ciudadana de los estudiantes

en la clase de ciencias, para que no solo comprendan, sino que también sean capaces de decidir y actuar (Domènech-Casal, 2018a). Por ejemplo, se puede hacer participar a los estudiantes en debates en torno a temas de controversia científica como la basura espacial, las vacunas, la manipulación de genes y la contaminación lumínica.

### **3.1.1.3. La educación en ciencias en Chile**

Actualmente, en Chile se trabaja con un currículum competencial, que requiere trabajar contenidos y desarrollar habilidades. La base de este currículum son las grandes ideas de la ciencia (Harlen, 2010), sobre las que se construyeron los objetivos de aprendizaje para todo el programa escolar nacional de ciencia.

Para lograrlo, se necesita enseñar a pensar, a elaborar modelos, a intervenir la realidad y a comunicar, entre otras actividades. Por lo tanto, es necesario considerar lo teórico, lo experimental y lo lingüístico para poder desarrollar competencias en el alumnado. El currículum competencial también reconoce la importancia de las emociones para el aprendizaje de las ciencias (Ritchie y Newlands, 2017), declarando que el desarrollo integral del ser humano no puede dejar de lado ninguno de sus ámbitos: afectivo, espiritual, ético, moral, intelectual, artístico y físico (Mineduc, 2019, p. 19). De esta manera, se contribuye a la formación de la identidad individual y ciudadana de los estudiantes. Esta mirada implica asumir que el estudiante no es un actor pasivo en el aula, por lo que hay que trabajar con la información que ya posee, y exponerlo a la interacción social para conseguir los aprendizajes esperados.

Por otro lado, el currículum nacional promueve el trabajo escolar en base a la metodología de Aprendizaje Basado en Proyectos, con especial énfasis en la perspectiva STEM. Una competencia STEM se define como “la capacidad de identificar y aplicar tanto los conocimientos clave como las formas de hacer, pensar, hablar y sentir de la ciencia, la ingeniería y la matemática, de forma más o menos integrada, con el fin de comprender, decidir y/o actuar delante de problemas complejos y para construir soluciones creativas e innovadoras, aprovechando las sinergias personales y las tecnologías disponibles, y de forma crítica, reflexiva y con valores” (Couso, 2017, p. 24). Para desarrollar este tipo de competencias es necesario resguardar las particularidades de cada disciplina al momento de

trabajarlas de forma integrada (Couso y Simarro, 2020) y centrar la atención en el proceso de trabajo y las prácticas que conlleva, por sobre el producto final (Domènech-Casal, 2018b).

### **3.1.2 Ideas del alumnado en ciencias y su progresión**

En la breve revisión histórica de la didáctica presentada en la sección anterior, hemos podido ver que las ideas del alumnado juegan un papel central para el proceso de enseñanza y aprendizaje. Como hemos dicho, la concepción socio-constructivista del aprendizaje plantea que la mente del alumnado está llena de ideas y que los estudiantes aprenden si son capaces de relacionarlas con las nuevas informaciones que la/el profesor intenciona oportunamente, es decir, aprender significa reordenar y/o transformar sus ideas.

En este contexto es relevante preguntarse, ¿cómo conviven las ideas de los estudiantes con la simplificación racional, la abstracción y la coherencia de la Física escolar?

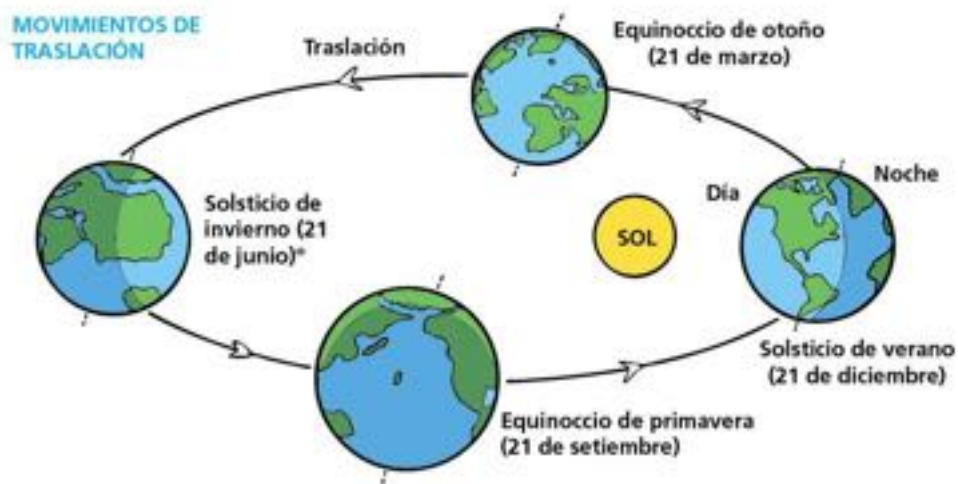
#### **3.1.2.1. Las ideas alternativas: origen y tipologías**

Como se menciona en el apartado anterior, desde la década de los 80 la investigación en didáctica ha obtenido resultados relevantes en la búsqueda por describir algunas tendencias de razonamiento, es decir, modos de pensamiento que pueden surgir en relación con un problema dado (Viennot, 2001). Esta evidencia permite adelantar (algunas veces) o reconocer con propiedad el punto de partida de nuestros estudiantes, tanto en lo conceptual como en sus ideas sobre el quehacer de la ciencia, lo que contribuye a nuestro rol como docentes a la hora de diseñar o secuenciar actividades que pongan a prueba sus razonamientos y les permitan elaborar modelos coherentes con el conocimiento científico.

En la literatura, estos razonamientos se pueden encontrar con diferentes nombres, tales como: esquemas conceptuales, razonamientos de los estudiantes, modelos conceptuales (Driver, 1986; Driver, 1989), ideas de los estudiantes (Guesne, 1984; Di Sessa, 1988; Erickson, 1979; Driver, 1989), razonamientos espontáneos (Viennot, 1979), ideas previas a la instrucción (Duit y Treagust, 2003), estructuras conceptuales y ciencia de los niños (Gilbert et al., 1982), pre conceptos (Novak, 1977), concepciones alternativas (Driver y Easley, 1978) y errores conceptuales, errores, malos entendidos, o concepciones erradas (Helm, 1978), dependiendo del autor de la investigación. En este trabajo, usaremos “ideas alternativas” para referirnos en general a las ideas que no coinciden con el conocimiento científico vigente, y que resultan como sistemas explicativos con que las personas dan sentido al mundo que los rodea y comprenden ciertos fenómenos. La idea de modelo mental, aunque está estrechamente ligada, la reservaremos para el apartado 3.1.3.

Un buen análisis sobre las ideas alternativas nos ayuda a comprender de donde provienen y cómo se construyen. Por ejemplo, fuentes importantes son los libros de texto, los medios de comunicación, la experiencia, la instrucción escolar y la cultura circundante. Pozo (1996) agrupa estas fuentes de ideas alternativas en tres términos: de origen sensorial, cultural y escolar.

Las ideas de origen sensorial provienen de las actividades cotidianas mediante las cuales interactuamos con el mundo natural. Se basan en la recolección de datos sensoriales y perceptivos que son sometidos a una lógica causal con el objetivo de controlar y predecir los fenómenos que se presentan en nuestra vida. Por ejemplo, sentir calor o frío, encender la luz para ver, cerrar un circuito para que funcione, la caída de un objeto, es decir, evidencias de la vida cotidiana que permiten la elaboración de un conocimiento. Un ejemplo de idea alternativa sustentada por la experiencia de sentir calor al estar cerca de una fuente de energía es cuando los estudiantes responden sobre el origen de las estaciones del año. Un razonamiento plausible, dada la experiencia cotidiana, es que cuando estamos en verano la Tierra debería estar más cerca del Sol que cuando estamos en invierno.



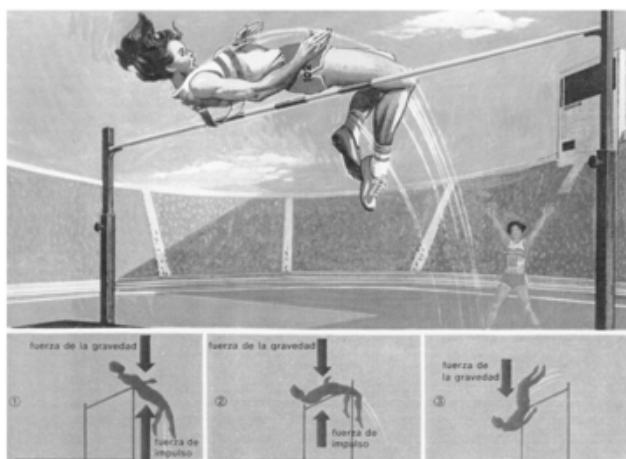
**Figura 6** Dibujo de Sistema Sol-Tierra<sup>2</sup> para explicar la forma de la órbita y el cambio de estaciones del año

Las ilustraciones en páginas web o de libros textos a veces no ayudan a acercar las explicaciones al modelo (Pozo, 1996). En internet abundan imágenes que tratan de describir este fenómeno. Por ejemplo, en la figura 6, vemos que no se hace referencia a lo importante

<sup>2</sup> <https://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/escolar/movimientos-de-la-tierra-1251529.html>

sobre el cambio de las estaciones del año, que es la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de la órbita y, además, se cometen errores como exagerar la órbita elíptica de la Tierra en torno al Sol, y no explicitar que los tamaños no están a escala.

En la figura 7, se muestra un diagrama de cuerpo libre sobre la atleta en cada fase de su salto. Esta forma de describir las fuerzas demuestra un desconocimiento del modelo mecánico de Newton. En estos esquemas se podría interpretar que la fuerza inicial se fue “agotando” a medida que la atleta ascendía. Esto no es posible en el marco de la física, pues las fuerzas aparecen cuando se ejercen y desaparecen cuando no se ejercen.



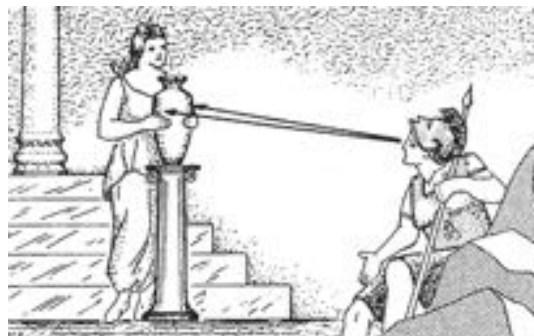
**Figura 7** Imagen que muestra una descripción de las fuerzas sobre una atleta (Carrascosa, 2005, p 198) que no coincide con el conocimiento científico vigente

Esta misma idea se ha trabajado en el proyecto REVIR<sup>3</sup> del CRECIM<sup>4</sup> en la Universidad Autónoma de Barcelona, en la práctica que tiene por nombre “¿De qué depende la distancia mínima de seguridad entre dos vehículos?”. Esta práctica consiste en analizar un movimiento de aceleración y frenado de dos masas ligadas por una cuerda que pasa a través de una polea, desde el punto de vista dinámico y cinemático. En base a los resultados de aprendizaje Sáez et al. (2005) nos indican que “*resulta raro encontrar la utilización simultánea y de forma coherente conceptos correspondientes a distintos dominios o paradigmas*” (Sáez et al., 2005). Este tipo de prácticas y posterior análisis de resultados de aprendizaje, develan una forma de trabajar para el mejoramiento de las prácticas de aula y de los aprendizajes en base a la evidencia.

<sup>3</sup> <https://revir.crecim.cat>

<sup>4</sup> <https://crecim.cat>

Otro ejemplo interesante es el que se muestra en la figura 8, del área de la óptica, que corresponde a la idea de “rayos visuales” que al ser interrumpidos por algún objeto permiten la visión. Idea que se contrapone a la del conocimiento científico vigente, que señala que los rayos reflejados en los objetos que nos rodean y que llegan a nuestros ojos, son la razón para la visión, es decir, los rayos no son emitidos por nuestros ojos. Nuestros ojos capturan los rayos reflejados que fueron emitidos de alguna fuente luminosa.



**Figura 8** Imagen que describe la visión por medio de rayos visuales<sup>5</sup>

En el caso de la electrostática también se han reportado dificultades de aprendizaje mediante diversas investigaciones, que desarrollaremos con mayor detalle en el apartado 3.2.3. En algunas de ellas se hace referencia a dificultades ancladas desde la mecánica (Galili, 1995) o desde razonamientos históricos (Furió et al., 2016), y por otro lado, en fijaciones funcionales (Pintó et al., 1996; Furió y Guisasola, 1998b; Furió y Guisasola, 2001) y reducciones tipo “receta” como único razonamiento (Viennot y Raison, 1992).

El estudio de las representaciones mentales (Gentner y Stevens, 1983), que las personas construimos para entender el funcionamiento de un sistema físico (Giannetto et al., 1992; Pintó et al., 1996; Moreira, 1996; Reiner, 1997), ha demostrado que además impactan las características de la situación contextual de la persona y del área de la disciplina que se esté trabajando (Linder, 1993). El reconocimiento de la cultura, del contexto y de la disciplina abre un nuevo abanico de posibilidades para convocar a los estudiantes y mejorar nuestras prácticas (del Valle et al., 2021).

Por otro lado, las ideas de origen cultural provienen del conocimiento que se nos entrega en la interacción social por transmisión oral o por los medios de comunicación. Debido a que este conocimiento se traspasa utilizando el lenguaje cotidiano, no es inusual descubrir que

---

<sup>5</sup> [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/107/htm/sec\\_5.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/107/htm/sec_5.htm)



algunos conceptos que en la física tienen significados muy diferentes, son usados como sinónimos en el discurso cotidiano. Ejemplos de esto son los conceptos de:

- calor y temperatura,
- voltaje y corriente eléctrica,
- electricidad y corriente eléctrica,
- masa y peso,
- presión y fuerza,

Además, los medios de comunicación y la publicidad pueden ser utilizados para influir en la opinión de los ciudadanos y crear hábitos de comportamiento. La publicidad ayuda a configurar modelos, estereotipos e incluso objetivos y planteamientos vitales. La forma más común de hacerlo es situando a la ciencia como una fuente de autoridad que garantiza la calidad de los productos anunciados. En este contexto, la ciencia se utiliza como garantía de certeza, mostrando una imagen errada del trabajo científico y, por supuesto, de su naturaleza provisional (Lederman, 2006). Actualmente, en el contexto de la actual pandemia (Sars cov 2 – COVID-19), ha quedado en evidencia para quienes no trabajan en ciencia que no siempre se tienen las respuestas para todo, lo que ha generado incertidumbre en la población ante los cambios constantes que hay con respecto a la evidencia disponible sobre el virus. Esto ha demostrado que la idea sobre la ciencia como verdad absoluta estaba arraigada en nuestra sociedad.

Finalmente, las ideas de origen escolar provienen, como su nombre lo sugiere, de la instrucción en la escuela. Las explicaciones que emergen de la instrucción idealmente serán apegadas al modelo científico, ya que este es el objetivo del trabajo en el aula. Sin embargo, en ocasiones, se pueden presentar ideas alternativas producto de errores didácticos, como simplificaciones de ciertos conceptos o el uso de malas analogías, entre otros. Por ejemplo, a menudo los libros de texto que usamos para la formación en electrostática no hacen referencia a qué modelo atómico se debe tener en mente para desarrollar las explicaciones sobre reordenamiento y transferencia de cargas eléctricas. Tampoco se explicita cómo los métodos de electrización se desarrollan en materiales dieléctricos y conductores y, además, los dibujos (en su mayoría) no evidencian la carga

neutra, es decir, solo ilustran las cargas en exceso (positivas o negativas). Por lo tanto, todo queda en manos de las interpretaciones personales o de la guía del docente, produciendo nociones como la idea de la creación de cargas al momento de frotar dos cuerpos, o de la “activación” de las propiedades eléctricas.

Otro ejemplo, quizás más cotidiano, se relaciona con el concepto de ebullición y evaporación del agua. En tablas de libros o en páginas web normalmente se encuentran diferentes sustancias con la indicación de la temperatura para el punto de ebullición, sin indicar a que presión se obtienen dichos datos. En un seminario de grado de la carrera de Pedagogía en Física y Matemática de la Universidad de Santiago de Chile, se les preguntó a 469 estudiantes de educación media pertenecientes a 5 escuelas de la región metropolitana (pertenecientes a distintos estratos socioeconómicos) sobre ¿a qué temperatura se evapora el agua en estado líquido? y ¿a qué temperatura ebulle el agua? (entre otras preguntas relacionadas con el tema). Para la primera pregunta un 80% respondió que, a una temperatura de 100°C o mayor de 100°C, mientras que en la segunda pregunta un 65% señaló que a los 100°C y un 24% optó por la opción “Depende de la presión a la que se encuentra”. Dichos conceptos tienen relación, pero no significan lo mismo. La evaporación ocurre a cualquier temperatura en cambio la ebullición depende de la presión a la que esté afecta la sustancia. El uso cotidiano del lenguaje, las indicaciones no claras o ambiguas de los libros y la instrucción, pueden ser obstaculizadores para relacionar y diferenciar estos conceptos por parte del alumnado. En el área de la dinámica se encuentra diversos trabajos (Viennot, 1979; Driver, 1986; Viennot, 2001) que ayudan a la elaboración de unidades didácticas.

### **3.1.2.2. Relevancia de conocer y estudiar las ideas previas**

Estas tres fuentes de conocimiento no siempre obstaculizan el trabajo científico escolar, a veces ayudan también para elaborar bases sólidas para la construcción de conocimiento o gatillan ideas preliminares que se pueden debatir y pulir en clases.

Como docentes, también vamos recolectando información sobre razonamientos y errores comunes que comenten nuestros estudiantes al enfrentar diversas situaciones de aula. Este conocimiento generalmente se transmite a otras generaciones de profesores. Sin embargo, conocer un listado de errores no es suficiente por sí solo, debe ser complementado con el

estudio de las ideas alternativas y sus orígenes. De esta manera, los errores funcionan como una guía para enfrentar el camino del aprendizaje, ya que en múltiples ocasiones responden a razonamientos que son coherentes con la experiencia del alumnado, con los conocimientos adquiridos o con instrucciones anteriores, que se explicitan al momento de enfrentar un nuevo fenómeno.

En este contexto, los resultados de las investigaciones en didáctica, la interacción permanente con el alumnado y el reconocimiento de las fuentes de información a las que están expuestos nuestros estudiantes, nos ayudan a complementar el conocimiento sobre el punto de partida y el posible camino a recorrer. Tal como plantea Viennot (2001), reflexionar sobre las ideas alternativas de los estudiantes nos permite proponer estrategias diferentes a las que tradicionalmente han prevalecido para el cumplimiento de los objetivos de aprendizaje.

Para incorporar el estudio de las ideas previas al diseño de las clases, Kolb (1984) propone tomar como punto de partida para el aprendizaje una experiencia concreta, que implique el contacto directo y el uso de todos los sentidos, para generar un nuevo conocimiento, o en nuestro caso, una reestructuración del que estaba presente. Esta propuesta se sustenta en el concepto de abducción acuñado por Peirce (1978, cit. en Psillos, 2011), que consiste en el proceso mediante el cual un sujeto observa un hecho sorprendente, intenta elaborar una hipótesis para explicarlo, y finalmente experimenta para corroborar sus ideas iniciales o formular una nueva hipótesis que llevaría a una experimentación. La abducción permite hacer ciencia y generar nuevos paradigmas con los que podremos explicar los fenómenos que nos rodean. Este proceso de trabajo, en base a situaciones hipotéticas y reales, es útil para identificar las ideas alternativas de los estudiantes y para buscar las metodologías y estrategias que faciliten su uso para el anclaje del nuevo conocimiento.

Ante las complejidades de trabajar con estudiantes llenos de ideas previas diversas, surge un nuevo desafío: ¿qué estrategias debemos utilizar para presentar nuevas ideas a los estudiantes, de modo que se apropien de los nuevos significados presentados?

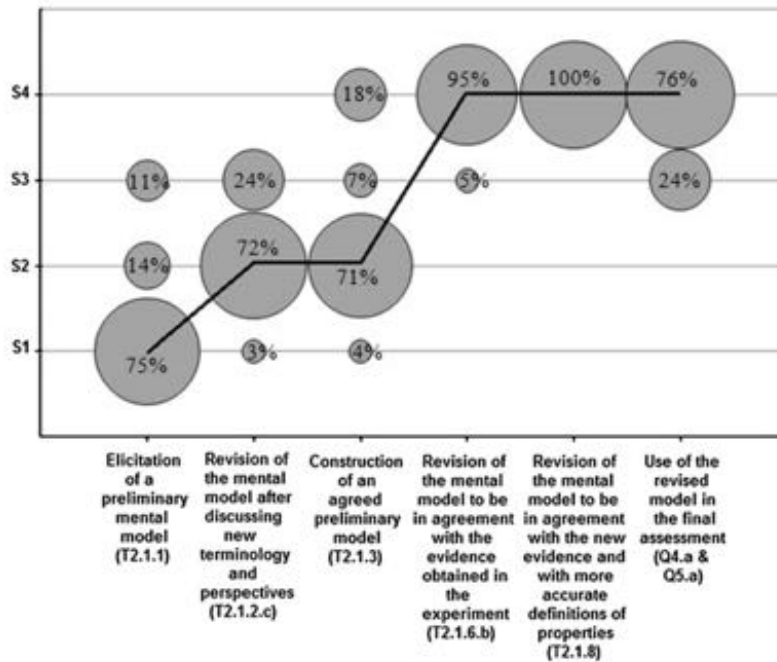
Para que se produzca el cambio conceptual (es decir, la evolución de las ideas previas de los estudiantes hacia aquellas más apegadas al modelo científico) es necesario que tanto el currículum como el ambiente de aprendizaje respeten las creencias con que los estudiantes

inician el proceso, mientras que trabajan para desarrollar la teoría científica. En este contexto, la evaluación juega un rol fundamental, al permitir que los estudiantes confronten ambas versiones. Mediante las acciones apropiadas, guiadas por el profesor, se espera que los estudiantes puedan reestructurar las ideas en su cabeza de manera progresiva (Duschl y Gitomer, 1991). Este cambio progresivo de esquemas mentales les permite además desarrollar habilidades cognitivas (Carey, 1986). Gilbert et al. (1982) reportan que, tras el proceso de enseñanza, pueden presentarse distintos resultados en los conceptos previos de los estudiantes, que van desde mantenerse idénticos hasta fusionarse con las nuevas ideas o transformarse en las nociones que el profesor espera. Sin embargo, es importante tener en cuenta que es difícil que dichas ideas previas se extingan totalmente, ya que es muy posible que en contextos particulares vuelvan a la superficie (Duit y Treagust, 2003).

### **3.1.2.3. De las ideas alternativas a las progresiones de aprendizaje**

Para seguir el proceso de cambio de las ideas de los estudiantes, desde la didáctica de las ciencias se han propuesto diferentes métodos. Uno de ellos son las progresiones de aprendizaje. Se trata de ofrecer un itinerario (sea teórico o empírico) por el que las ideas del alumnado pueden transitar, desde versiones más simples, intuitivas y muchas veces alternativas, hasta versiones cada vez más sofisticadas y robustas (Duschl et al., 2011). Una progresión de aprendizaje comienza a partir de versiones iniciales de una idea científica que están cerca de las ideas de los estudiantes y traza un camino construido a partir de versiones más sofisticadas de esta idea de una manera adecuada para cada grupo de edad o nivel educativo de estudiantes en particular. Existen diferentes ejemplos de progresiones de aprendizaje en física, como el propuesto por Neumann et al. (2013) sobre el concepto de energía, el propuesto por Hernández et al. (2015) sobre acústica, o el propuesto por Vergara et al. (2020) sobre regulación térmica de los animales.

Una forma de representar estas progresiones de aprendizaje es usar una representación bidimensional o tridimensional, donde uno de los ejes representa lo cronológico (la secuencia de actividades o procesos de enseñanza) y otro representa lo conceptual, en forma de orden (de ideas más simples a más sofisticadas), tal como se ejemplifica en la siguiente figura.



**Figura 9** Gráfico que representa la progresión de aprendizaje de estudiantes sobre acústica (Hernández et al, 2015).

Así pues, la principal aportación de las progresiones de aprendizaje es que no se limitan a identificar y representar no solo el conocimiento intuitivo de los estudiantes, sino la evolución de sus ideas hacia otras más refinadas, así como los factores que influyen en dicha evolución, y las “fronteras” conceptuales que se deben cruzar para lograr un progreso de estas ideas.

### **3.1.3 La modelización como práctica científica clave**

Si bien en el apartado 3.1.2 nos hemos centrado en las ideas del alumnado, la construcción, expresión y revisión de estas ideas puede interpretarse desde otra perspectiva de los modelos y de la modelización. Y es que como se mencionó al inicio de este capítulo, uno de los consensos en torno a la educación en ciencias es que los estudiantes deben vivenciar la ciencia mediante su participación en prácticas científicas que permitan hacer evolucionar las ideas de los estudiantes desde su estado inicial a la forma más apegada a las ideas científicas.

Actualmente, los constantes cambios que afectan a la sociedad y al mundo en el que vivimos exigen una educación que sea flexible y que se adapte a las necesidades particulares de cada generación. Ante este escenario de incertidumbre, las ciencias – al igual que otras disciplinas impartidas en la escuela – han debido abocarse a la tarea de encontrar formas de preparar a los estudiantes para cualquier contexto en el que podrían necesitar dicho conocimiento. Este cambio en el paradigma epistemológico se ha traducido en cuatro dimensiones de la ciencia que los estudiantes deben manejar: (1) aprender ciencia y tecnología, (2) aprender sobre ciencia y tecnología, (3) hacer ciencia y tecnología, e (4) implicarse en acciones sociopolíticas (Justi, 2006).

Para que los estudiantes comprendan a mayor cabalidad la naturaleza de la ciencia, como ya hemos dicho en el apartado 3.1.1., se ha extendido una propuesta de taxonomía de 8 prácticas que definen el quehacer de todo científico durante el transcurso de una investigación. Estas 8 prácticas científicas, resumidas en Bybee (2011) son:

- (1) Plantearse preguntas,
- (2) desarrollar y utilizar modelos,
- (3) planificar y llevar a cabo investigaciones,
- (4) analizar e interpretar datos,
- (5) usar pensamiento matemático y computacional,
- (6) construir explicaciones y diseñar soluciones,
- (7) argumentar científicamente en base a evidencia,

(8) obtener, evaluar y comunicar información.

Además de conocer estas prácticas científicas, los estudiantes deben vivenciarlas en la clase de ciencias. La investigación en didáctica de las ciencias ha dirigido su atención durante los últimos años a buscar metodologías mediante las cuales la interacción de los estudiantes con la ciencia pueda ser lo más natural y parecida al mundo real posible. Actualmente existe una amplia variedad de enfoques y aproximaciones que permiten la participación del alumnado en las prácticas científicas (Muñoz-Campos et al, 2020). Algunas de ellas, pueden agruparse en lo que se denomina modelización o enseñanza basada en modelos (Windschilt et al., 2008; Cardoso y Justi, 2013; Martínez et al., 2014; Adúriz-Bravo y Izquierdo-Aymerich, 2009; Schwarz et al., 2009), que se desarrolla en los siguientes subapartados.

### **3.1.3.1. Los modelos científicos**

La palabra “modelo”, en el uso cotidiano de la lengua tiende a asociarse a la representación o simplificación de una cosa. Sin embargo, es necesario desarrollar la profundidad que adquiere este concepto en la didáctica de las ciencias naturales. En esta disciplina, un modelo abarca no solo los aspectos físicos y visibles de un fenómeno sino también las abstracciones que forman parte del fenómeno representado. En este sentido, actúan como facilitadores al hacer más accesible la comprensión de los fenómenos del mundo real (Adúriz-Bravo y Izquierdo-Aymerich, 2009). Surgen a partir del pensamiento humano ante situaciones que requieren una explicación e interpretación, y comprenden una serie de principios e ideas clave interrelacionados, que permiten explicar un fenómeno (Windschilt et al., 2008). Los modelos son generativos, ya que pueden dar pie a nuevas predicciones para otros fenómenos. Ejemplos de modelos científicos son el modelo de energía y el de cambio químico.

El proceso de describir las relaciones que se establecen entre la realidad y lo que se elige extraer y representar, es decir, la modelización (Gilbert y Boutler, 1998) conlleva una “simplificación” de la realidad. Por ejemplo, ante un fenómeno complejo como un rayo que cae desde las nubes en medio de una tormenta eléctrica, podríamos estudiar múltiples dimensiones: la interacción entre las cargas eléctricas y las nubes, la cantidad de carga transferida por medio del rayo, la diferencia entre rapidez de la luz y del sonido, la

formación de las nubes para que se desencadene una tormenta eléctrica, etc. Por lo tanto, al modelar fenómenos, lo que se hace es seccionarlos, para comprender los distintos procesos que los conforman y explican en mayor o menor grado. En este sentido, la enseñanza de las ciencias utiliza modelos para preparar el progreso científico de los estudiantes para que puedan dar cuenta de la complejidad de los fenómenos físicos, utilizando el menor número posible de cantidades y relaciones.

En esta tarea, es muy importante ser claros y precisos a la hora de elaborar explicaciones, pues las leyes físicas no pueden aplicarse de manera errática. Por lo tanto, es necesario hacer un esfuerzo por lograr el mayor grado de generalidad – es decir que, a la hora de enseñar una teoría o ley mediante una sección de un fenómeno específico, esta sea coherente con el marco general de la física – y por establecer en qué medida son válidas las relaciones utilizadas en la explicación.

### **3.1.3.2. De los modelos mentales a los modelos científicos escolares**

Una vez en el aula, se hace necesario que los docentes lleven a cabo la transposición didáctica correspondiente que permita traspasar el conocimiento de dichos modelos a los estudiantes. Al resultado de este proceso se le llama Modelo Científico Escolar. Por lo tanto, estos modelos son coherentes con el modelo científico, pero no exactamente iguales a ellos (Garrido y Couso, 2017).

Pero lograr que los estudiantes se apropien de las ideas de los modelos científicos escolares no es simple, ya que requiere lidiar con los modelos mentales que traen previamente consigo, como resultado de otras interacciones con la ciencia, es decir, las ideas que los individuos elaboran a medida que interactúan con fenómenos reales o simulados, y de las que ya hemos hablado en el apartado 3.1.2. Y como ya hemos señalado anteriormente, estos modelos mentales no siempre estarán alineados con las ideas del modelo científico, lo que implica una mayor dificultad para el diseño de clases (DiSessa, 1988; Norman, 1983, cit. en Garrido y Couso, 2017).

En la mayoría de las ocasiones, solo podemos acceder a los Modelos Mentales mediante los Modelos Expresados, que son las representaciones mediante las cuales se comunican esas ideas (dibujos, oralidad y escritura, entre otras). (Justi, 2006). Existen cinco modos de



representación para cualquier tipo de modelo, que se pueden usar de manera combinada o aislada (Gilbert, 2004):

- concreto o material (construido mediante materiales en tres dimensiones),
- verbal (mediante palabras),
- simbólico (mediante ecuaciones o fórmulas),
- visual (mediante gráficas o imágenes),
- gestual (mediante el cuerpo humano).

Otra complejidad que es necesario tener en mente a la hora de adaptar el conocimiento científico para ser llevado al aula es el uso del lenguaje científico para explicar fenómenos cotidianos. En este sentido, los libros de texto comúnmente usados no ayudan a matizar el lenguaje para facilitar la comprensión de los fenómenos estudiados, utilizando frecuentemente tecnicismos que se definen a partir de otros tecnicismos. Los docentes deben traspasar a sus estudiantes la noción de que el lenguaje científico hace referencia a relaciones – generalmente cuantitativas – entre fenómenos. Es importante dar a conocer el lenguaje científico de manera que no sea una barrera para la comprensión de los procesos que se pretende enseñar. De este modo, los estudiantes podrán utilizar ese mismo lenguaje para comunicar su comprensión de los fenómenos (Izquierdo-Aymerich, 2017).

### **3.1.3.3. La modelización y el ciclo de modelización**

La modelización implica incorporar a las clases de ciencias la construcción, uso, evaluación y revisión de modelos para interpretar, predecir y explicar fenómenos (Schwarz et al., 2009). Esta metodología es inherentemente argumentativa, pues implica tomar decisiones y justificarlas, consensuar opiniones y comunicarse con otros (Cardoso y Justi, 2013). Para Schwarz et al. (2009) la modelización es beneficiosa ya que permite a los estudiantes revisar sus modelos mentales y utilizarlos a la hora de reflexionar sobre algún fenómeno. La modelización permite no sólo aprender de un fenómeno particular, sino también de la naturaleza de las ciencias. Para ello, es necesario que los estudiantes comprendan cómo y por qué se usan los modelos.

Para que los estudiantes se apropien de la metodología de modelización es necesario darles oportunidades de desarrollar las habilidades que esta implica. Gilbert (2004) propone cuatro pasos para alcanzar este propósito:

- El primero es aprender a usar los modelos, aplicándolos en contextos donde el resultado será positivo y el modelo servirá para predecir o explicar el fenómeno observado.
- El segundo paso corresponde a aprender a revisar los modelos, donde los estudiantes deben modificar los modelos para que apliquen a contextos distintos a aquel en que lo aprendieron.
- El tercer paso es aprender a reconstruir modelos, que implica crear un modelo que los estudiantes saben que existe, pero del que no tienen mayores detalles.
- Finalmente, deben aprender a construir modelos *de novo*, que significa elaborarlo completamente, desde la recolección de datos hasta la presentación del modelo final.

Trabajar con esta serie de etapas se asocia a una mejora en la secuencia de explicación – predicción – evaluación de los estudiantes (Gilbert, 2004). En esta misma línea, otra de las etapas propuestas para organizar las actividades de modelización es el Ciclo de Modelización (Garrido, 2016), quien, tras analizar diversas propuestas, define 6 etapas:

- Reconocer la necesidad de un modelo
- Expresar / usar el modelo inicial
- Evaluar el modelo
- Revisar modelo
- Consensuar un modelo final
- Aplicar el modelo final



Figura 10 Fases de un ciclo de modelización en Couso et al (2020), p.68.

Como se presentará en el apartado 4.2, algunas de estas etapas inspiraron la construcción de la SEA aplicada en este trabajo, por ejemplo, las etapas 2, 3 y 5.

Lamentablemente, a pesar de los beneficios reportados de la modelización, su presencia en muchas escuelas aún es insuficiente. Según Schwarz et al. (2009), en las aulas tradicionales, los modelos tienden a utilizarse principalmente para mostrar cómo se presentan determinados fenómenos, entregándole a los estudiantes un modelo ya construido, sin darles la posibilidad de que experimenten por sí mismos los distintos procesos de la modelización. Esto responde a diversos factores, como la falta de materiales apropiados para trabajarlos o la falta de conocimiento y preparación en el tema de los docentes; además de una mirada educativa enfocada en los resultados por sobre los procesos de la ciencia (Duschl y Grandy, 2008, cit. en Garrido y Couso, 2017). Por lo tanto, es necesario trabajar la modelización con los docentes en formación para que ellos utilicen esta metodología en sus clases.

### 3.1.3.4. La modelización en la formación inicial del profesorado

Como se ha mencionado en el planteamiento del problema, en el capítulo 2, se espera que los estudiantes de pedagogía adquieran 4 tipos de conocimiento: conocimiento conceptual, procedimental, epistemológico y conocimiento pedagógico del contenido.

- El conocimiento conceptual hace referencia a los conceptos teóricos y el lenguaje que los futuros docentes deben manejar para hablar de ciencia.
- El conocimiento procedimental corresponde a la comprensión de los procesos científicos y las estrategias necesarias para abordar un fenómeno.
- El conocimiento epistemológico responde a la pregunta ¿por qué es necesario conocer los fenómenos de la ciencia? y,
- finalmente, el conocimiento pedagógico del contenido incluye toda aquella evidencia que permite enseñar de manera óptima un conocimiento específico, por ejemplo, el potencial de tareas específicas para el aprendizaje y sus objetivos, errores comunes de los estudiantes y un repertorio de explicaciones para los temas más importantes de su disciplina.

Estos 4 tipos de conocimiento deben estar distribuidos a lo largo de los programas de formación inicial docente, y deben ser retomados en la formación continua de docentes ya titulados, entendiendo que la tarea de la formación inicial docente es crear las bases sobre las cuáles los profesionales podrán seguir construyendo a lo largo de su vida profesional. Los estudiantes deben participar en prácticas científicas no solo para aprender sobre los fenómenos de la ciencia sino también para desarrollar su conocimiento procedimental y epistemológico (Osborne, 2014).

Para que los docentes puedan implementar la modelización en sus aulas, es necesario que la vivan desde el rol del alumno, para que conozcan sus dinámicas de funcionamiento (David, 2003, cit. en Garrido y Couso, 2017). Comúnmente, los docentes en formación traen consigo un pensamiento docente espontáneo, que corresponde a las ideas preconcebidas que tienen de la ciencia y de cómo enseñarla. Estas ideas provienen principalmente de su experiencia como estudiantes en el sistema escolar, donde, como se mencionó anteriormente, la modelización no es habitualmente utilizada. Una de las tareas más importantes de la formación inicial docente es modificar estas ideas para que dejen de ser alumnos y se conviertan en los docentes (Martínez et al., 2014). Por lo tanto, es necesario no solo enseñar a los futuros docentes sobre la modelización, sino también incorporarla como metodología de aula a los cursos de áreas disciplinares, de manera que tengan

ejemplos concretos de como implementarla para la enseñanza de fenómenos físicos en los que, además, participaron como estudiantes.

A pesar de la baja presencia de la modelización en las aulas tradicionales, existe evidencia respecto a su impacto en la formación docente. Garrido y Couso (2017) analizaron las prácticas de modelización llevadas a cabo en un curso de estudiantes de pedagogía en ciencias para la educación básica y encontraron que el trabajo de laboratorio y en grupos pequeños fue enriquecedor para el desarrollo de las actividades de modelización y para la evolución de los modelos de los futuros docentes. También reportan que el rol del profesor al guiar las discusiones de los estudiantes fue fundamental para la evolución de los modelos, e invitan a ampliar la investigación en torno a las características de la clase que podrían fomentar la modelización con resultados favorables para el cumplimiento de los objetivos de la clase. Otro hallazgo relevante de esta investigación es que el aprendizaje de las ideas que componen los modelos no es lineal, pero existe una tendencia positiva hacia el logro de la comprensión conceptual de los modelos a lo largo de la secuencia a la que fueron expuestos los estudiantes (Garrido, 2016).

Sin embargo, señalan que el solo hecho de haber sido parte de la experiencia no es suficiente para que puedan implementarla en el futuro, se necesitan instancias de instrucción y reflexión explícita sobre la metodología. A un resultado similar llegan Marzabal y Delgado (2018), quienes tras implementar prácticas de modelización en un programa de formación inicial docente chileno concluyen que la presencia de esta metodología es condición necesaria pero no suficiente para garantizar que los futuros profesionales la implementarán en su ejercicio profesional.

En el caso del currículum nacional de Chile, si bien no se plantea explícitamente que la metodología a implementar en las escuelas deba ser la modelización, las ideas que describen lo que se espera de la educación en ciencias son muy similares a ella. En las Bases Curriculares nacionales – documento que describe los objetivos, fundamentos, contenidos y progresión de los aprendizajes esperados para los distintos niveles educativos del país – se plantea como fundamento de la educación científica que *“los y las estudiantes conozcan, desde su propia experiencia, lo que implica la actividad científica; es decir, que adquieran habilidades de investigación científica que son transversales al ejercicio de*

*todas las ciencias y se obtienen mediante la práctica. De este modo comprenderán también cómo se genera el conocimiento científico actual”* (Mineduc, 2016, p.130). El documento señala también que, para aprender aquellas prácticas científicas, deben realizar investigaciones del modo en que lo hacen los científicos, lo que además les permitirá aprender sobre la naturaleza de las ciencias.

### **3.1.3.5. Las explicaciones basadas en modelos**

Como hemos mencionado anteriormente, el nivel de comprensión conceptual de los estudiantes, también conocidos como modelos mentales, son entes abstractos a los que solo ellos tienen acceso total. Una forma de acceder parcialmente a ellos es mediante los modelos expresados, que representan la concreción de estas ideas abstractas. Así pues, una forma práctica de obtener modelos expresados es solicitar a los estudiantes que verbalicen sus ideas mediante la elaboración de sus propias explicaciones (Gilbert y Boulter, 1995, cit. en Justi, 2006).

Las explicaciones son un elemento recurrente en las clases de ciencias, ya que históricamente se ha centrado la atención en cómo los docentes solicitan a sus estudiantes señalar por qué, o cómo ocurren algunos fenómenos naturales (Achinstein, 1983). A pesar de ser una práctica relevante en la ciencia (Osborne, 2014), la elaboración de explicaciones basadas en teorías y modelos científicos no se enseña explícitamente en la mayoría de los establecimientos educacionales (Braaten y Windschitl, 2011). A pesar de ello, es una de las habilidades que el currículum nacional chileno (Mineduc, 2016) exige desarrollar en los estudiantes. En el caso de los participantes de este estudio, la elaboración de explicaciones es aún más importante, ya que al ser futuros docentes deben practicar esta habilidad como parte de su formación profesional. Por esto, consideramos importante conocer qué tipos de explicaciones se pueden esperar de parte de los estudiantes.

Las explicaciones deben ir un paso más allá que las descripciones. Las descripciones se enfocan principalmente en lo observable de un fenómeno natural, mientras que las explicaciones abordan las ideas científicas y teóricas, que no es posible observar directamente, pero que dan cuenta de lo observado (Braaten y Windschitl, 2011). Por ejemplo, en un experimento de electrostática donde se frota un cuerpo y se acerca a un montón de pequeños papeles, una descripción correspondería a señalar que los papeles se

atraen al cuerpo frotado. En cambio, una explicación se referiría a la carga en exceso o defecto provocada por la frotación, y su impacto en el reordenamiento de las cargas de los papeles.

Braaten y Windschitl (2011) proponen cinco modelos de explicaciones científicas que son relevantes para los educadores. En la siguiente tabla se resumen las principales características de cada una.

<b>Tipos de explicación</b>	<b>Atributos de la explicación</b>	<b>Relevancia para la educación en ciencias</b>
Cobertura legal	Argumentos deductivos que explican los eventos como resultados naturales y lógicos de regularidades expresadas por leyes.	Los primeros intentos de explicaciones de los estudiantes a menudo siguen esta forma de explicar un evento específico citando una ley o usando una declaración similar a la ley. Fomenta el razonamiento algorítmico, pero puede no desarrollar el razonamiento conceptual de los estudiantes o las habilidades de construcción de teorías.
Estadístico-probabilístico	La inducción a partir de una tendencia o patrón en los datos puede o puede buscar causas subyacentes para los eventos.	Involucra a los estudiantes en prácticas importantes de análisis de datos, especialmente en campos que dependen de grandes conjuntos de datos como la biología de la población y las ciencias de la tierra. Se centra en los datos y las representaciones de datos, pero puede desviar la atención de los fenómenos y enmascarar las causas de los eventos.
Causal	Inducción a partir de patrones en los datos, pero buscar explícitamente las causas subyacentes de los eventos.	Capitaliza la curiosidad de los estudiantes e involucra a los estudiantes en la teorización sobre causas no observables para fenómenos observables. Implica un desafío inherente de establecer la causalidad. Tendencia a desarrollar solo relaciones causa-efecto simples y lineales en lugar de redes y modelos causales.
Pragmático	Se basa en un acuerdo compartido sobre la "clase de contraste" inherente a la pregunta del por qué: ¿Por qué es este (y no aquello) el caso? Atributos negociados y considerados aceptables por los participantes en la conversación.	Fomenta la comunicación explícita entre maestros y estudiantes sobre las normas y significados construidos localmente para las explicaciones que brindan oportunidades para crear sentido. No es un modelo independiente de explicación, pero ofrece una herramienta analítica importante para los profesores que escuchan a los estudiantes.
Unificador	Las explicaciones de eventos singulares se unifican en generalizaciones mediante el uso de las principales teorías de la ciencia (es decir, la teoría molecular cinética).	Alienta a los estudiantes a enfocarse en las "grandes ideas" en la ciencia al enfatizar las principales teorías y explicaciones científicas. Sin embargo, no es útil para crear explicaciones de eventos individuales, más útil en concierto con otros modelos.

**Tabla 1** Cinco modelos filosóficos de explicación científica relevantes para la educación científica (Braaten y Windschitl, 2011, p 643-644).

Para el presente estudio y contexto, como se mostrará en el apartado 4.2, nos centraremos en explicaciones de tipo cobertura legal, causal y unificador como los más pertinentes. Esto debido a que el objetivo de las actividades desarrolladas en las sesiones impartidas es que los estudiantes construyan ideas científicas en base a un modelo establecido y no explicaciones con fundamentos probabilísticos.

- Así, según Braaten y Windschitl (2011), el modelo de cobertura legal, también conocido como nomológico-deductivo (N-D), consiste en explicar fenómenos mediante leyes naturales ya conocidas, que responden a los patrones de comportamiento observados. A menudo, las primeras explicaciones de los estudiantes ante un fenómeno corresponden a este modelo. Algunas de sus debilidades son que no permite explicar eventos improbables o que no responden a leyes naturales, por lo tanto, en ocasiones este tipo de explicaciones no son suficientes sí solas.
- Por su parte, en las explicaciones del modelo causal, se enfatiza explícitamente la causa que provoca un fenómeno. Es de lógica inductiva ya que se busca una posible causa a partir de los datos obtenidos del fenómeno. Este modelo estimula la curiosidad de los estudiantes, quienes deben explorar diferentes hipótesis para dar con la correcta, y permite elaborar teorías y posibles modelos que den cuenta de lo observado. Elaborar este tipo de explicaciones es desafiante, ya que los alumnos deben conectar las experiencias vividas con representaciones abstractas y simbólicas y, por lo tanto, podría resultar más complejo para los estudiantes que los otros tipos de respuesta (Braaten y Windschitl, 2011).
- El tercer modelo, denominado unificador, la premisa es que el poder explicativo es mayor cuando se establecen relaciones entre distintos fenómenos, que aparentemente no estaban relacionados. De esta manera, se alcanza una explicación global, que permite desarrollar un mayor grado de conocimiento de un fenómeno más amplio. Para poder elaborar explicaciones de este tipo se necesitan conocimientos previos sobre los cuáles se puedan relacionar de manera coherente los fenómenos. Este modelo permite que los estudiantes se enfoquen en tratar de



dilucidar las grandes ideas de la ciencia. Una de sus debilidades es que no permite explicar eventos que solo ocurren una vez (Braaten y Windschitl, 2011).

En paralelo, Custodio et al. (2015) plantean que una explicación debe contener teorías científicas escolares y datos del fenómeno observado, entre otras fuentes de información. Por otra parte, Jorba et al. (1998) consideran que en una explicación se debe incluir razones y relaciones entre ellas. También proponen que deben comenzar con una tesis y que pueden alcanzar distintos niveles de profundidad, de acuerdo con el conocimiento del estudiante que la produce. Tiberghien (2008) añade que, en una explicación apropiada, la relación entre los conceptos y teorías empleados es aplicada a un contexto específico. Según estos autores, sólo cumpliendo estos requisitos se puede aseverar que se ha comprendido el fenómeno.

A pesar de su importancia, existen pocas investigaciones sobre la construcción de explicaciones de los estudiantes. Tang (2016) reporta que algunos hallazgos de investigaciones sobre la argumentación de los estudiantes podrían ser de utilidad para este tema. Propone que para mejorar las explicaciones del alumnado es útil enmarcar la actividad mediante un sistema de andamiaje escrito que utilicen a medida que adquieren más práctica, para luego escribir libremente. También sugiere que es necesario enseñarles explícitamente una estructura retórica que los introduzca al género de las explicaciones y a las categorías de palabras que requieren utilizar en ellas (verbos, conjunciones, etc.). Braaten y Windschitl (2011), en cambio, señalan que para lograr que los estudiantes elaboren explicaciones, y no solo descripciones de los fenómenos, no basta solamente con trabajar el aspecto lingüístico, es necesario también guiarlos en torno a la naturaleza de las explicaciones científicas, y para eso, las prácticas científicas auténticas, pero con andamiaje, son esenciales en la sala de clases. Generar instancias en que los estudiantes puedan practicar elaborando sus propias explicaciones, utilizando sus conocimientos científicos y habilidades lingüísticas, es fundamental para su comprensión de los fenómenos (Zangori y Forbes, 2013).

Para poder elaborar explicaciones coherentes y científicamente correctas, es necesario tener un alto nivel de comprensión conceptual (Hennessy et al., 2007), lo que se alcanza mediante la discusión en el aula, que permite explorar, negociar y compartir ideas, entre

otras acciones relevantes para el desarrollo de la ciencia (Mercer et al., 2004; Millar y Osborne, 1998; Schwarz et al., 2003). Sin embargo, existen dificultades para aprender el lenguaje de las ciencias, que permite su discusión en clases. Lemke (1997) afirma que es como aprender un nuevo idioma, ya que además de tener que aprender el patrón temático (es decir, el contenido de teorías y conceptos científicos), es necesario aprender los nuevos significados que adquieren ciertas palabras de uso cotidiano, en el contexto científico. Sugiere entonces que se deberían emplear estrategias de tipo comunicativo-interactivo, para desarrollar estos nuevos conocimientos.

### **3.1.4 El diseño didáctico en la enseñanza de las Ciencias.**

En Chile, la labor de los docentes debe seguir las directrices que plantea el Marco para la buena Enseñanza, documento emanado del Ministerio de educación que propone cuatro dominios que los profesores deben abordar a diario en su práctica profesional. Estos dominios son:

- a) Preparación de la enseñanza,
- b) Creación de un ambiente propicio para el aprendizaje,
- c) Enseñanza para el aprendizaje de todos los estudiantes,
- d) Responsabilidades profesionales.

Cada cuatro años, el desempeño profesional de los docentes es evaluado en base a estos mismos dominios. Entre las características que el Marco para la buena enseñanza señala que debe tener un docente están: un manejo sólido de la disciplina que enseña, un conocimiento acabado del currículum de su asignatura y la planificación de clases para la diversidad de estudiantes del aula.

#### **3.1.4.1. Las secuencias de enseñanza y aprendizaje (SEA)**

Planificar una clase contempla una serie de subtarear necesarias, como elegir un objetivo del currículum nacional, adaptarlo al contexto escolar, proponer objetivos para la clase que sean coherentes con el seleccionado del currículum, elaborar actividades pertinentes con sus instrumentos y los indicadores de evaluación asociados, de modo que se obtengan resultados tangibles que se puedan medir. Estas subtarear corresponden al conocimiento

pedagógico que debe tener el docente a la hora de planificar una clase, sin embargo, esta es solo la mitad del proceso.

La otra mitad, corresponde al conocimiento disciplinario, que permite considerar en la planificación las ideas alternativas de los estudiantes, tema ya comentado en el capítulo anterior. El conocimiento de estas ideas alternativas sirve como punto de apoyo para el diseño de clases, pues, al crear actividades basadas en los conocimientos previos de los estudiantes, se propician “formas cognitivas más productivas para pensar sobre un concepto determinado” (Merino et al., 2015, p.95) En concreto, esto es lo que denominamos una Secuencia de Enseñanza Aprendizaje: “el conjunto de actividades organizadas y sistematizadas con el fin de abordar y resolver un problema científico a nivel curricular” (Izquierdo- Aymerich y Aduriz-Bravo, 2003).

Una Secuencia de Enseñanza aprendizaje es un producto que además de facilitar la intervención en el aula, permite hacer investigación educativa. Incluye actividades que han sido estudiadas y adaptadas para la comprensión de los estudiantes (Méheut y Psillos, 2004). Guisasola et al. (2021) identifican algunos elementos que las investigaciones sobre diseños de SEA, en distintos momentos de la historia, tienen en común. Según los autores, dichas investigaciones consideran los resultados de las investigaciones sobre las ideas alternativas de los estudiantes, respaldan los objetivos de la SEA en un análisis epistemológico del contenido curricular seleccionado, se enmarcan en una perspectiva social constructivista del aprendizaje, construyen las actividades de enseñanza-aprendizaje de acuerdo con los resultados de la investigación y demuestran que los estudiantes han aprendido mediante evidencia.

#### **3.1.4.2. El diseño de SEAs**

Guisasola et al. (2021) plantean que el proceso de diseño de una SEA está conformado por cuatro etapas:

1. Análisis del contexto educativo y de los aspectos epistemológicos del tema: En esta etapa se elaboran los objetivos de aprendizaje de acuerdo con la realidad de los estudiantes. También es necesario llevar a cabo un análisis epistemológico del contenido seleccionado para conocer su estructura interna.

2. Análisis de las ideas previas de los alumnos y dificultades conceptuales y de razonamiento: En esta etapa es fundamental la investigación en torno a la didáctica del contenido a enseñar, para conocer sus dificultades y demandas de aprendizaje, es decir, las ideas preconcebidas que podrían manifestar los estudiantes y cómo abordarlas. En caso de que dicha información no exista, es necesario hacer una aproximación inicial empírica al campo para recolectarla.
3. Necesidad de entornos interactivos que reflejen las habilidades y actitudes de la investigación científica: En esta etapa se definen las estrategias de enseñanza que, de acuerdo con la investigación en didáctica de la ciencia puede ser más efectiva para el aprendizaje del contenido elegido.
4. Construyendo tareas específicas que conducen a una propuesta de trayectoria de aprendizaje: Finalmente, se diseñan las actividades que los estudiantes llevarán a cabo en la clase basándose en la información recolectada y las decisiones tomadas en los tres pasos anteriores. Las actividades son estructuradas y construidas en base a hipótesis sobre los procesos de aprendizaje potenciales de los estudiantes.

Una vez que una SEA es implementada, es posible modificar algunos de sus elementos si el creador lo considera necesario, como ejemplos, instrucciones o imágenes entre otros. El objetivo de una SEA es que los estudiantes mejoren su comprensión del contenido abordado y desarrollen las habilidades esperadas, lo que se puede medir con evaluaciones aplicadas a los estudiantes al inicio y el final de la secuencia. Estos resultados luego pueden ser analizados, lo que permite determinar la validez de la SEA y la teoría sobre la que se sustenta (Hernández, 2015). Podemos decir entonces que una SEA funciona como una representación mediadora entre las teorías y los fenómenos del mundo, los cuales son articuladas para el desarrollo de los modelos científicos escolares.

## **3.2 La enseñanza y aprendizaje de la electrostática**

Una vez situados en un marco general de la enseñanza de las ciencias en general y de la física en particular, en este segundo apartado del capítulo 3 se plantea un marco para la enseñanza y el aprendizaje de la electrostática, incluyendo el conocimiento del contenido y el conocimiento didáctico del contenido.

### **3.2.1 Una aproximación a la electrostática**

#### **3.2.1.1. ¿Qué es la electrostática?**

La electrostática es la rama de la Física que estudia las interacciones entre cargas eléctricas en reposo. Por interacción, nos referimos a la fuerza eléctrica, que permite que dos cargas se atraigan o se repelan; o a la energía potencial, que se le puede asociar a una carga posicionada en un campo eléctrico. Cuando hablamos de “carga eléctrica” nos referimos a una propiedad de la materia. La materia está formada por cargas positivas (protones) y de cargas negativas (electrones), por tanto, podemos decir que toda la materia es eléctrica.

Existen dos tipos de carga eléctrica: una positiva y otra negativa. Cuando un cuerpo o átomo pierde algún(os) electrón(es) nos referimos a que se encuentra con carga positiva, y si el cuerpo o átomo adquiere electrones, decimos que está cargado de forma negativa. Si el cuerpo o átomo tiene la misma cantidad de cargas positivas y negativas decimos que está neutro. Esto se debe a que, el electrón, de carga eléctrica negativa, tiene la capacidad de moverse entre cuerpos o átomos y posee la misma carga eléctrica (pero con signo distinto) que el protón (Jonassen, 2013).

Existen muchos fenómenos cotidianos que pueden ser explicados por la electrostática, como por ejemplo los destellos luminosos tras sacarse un chaleco, la atracción de las hojas por el rodillo de una impresora, el funcionamiento de un ionizador de aire, y el uso del acondicionador de cabello, entre otros. Para poder explicarlos, es necesario conocer los métodos que permiten reordenar y transferir la carga eléctrica. Estos métodos serán explicados en detalle en el punto 3.2.2 del presente trabajo.

### **3.2.1.1. Breve historia de la electrostática y el electromagnetismo.**

El estudio de la electrostática comienza hace más de 2000 años con Tales de Mileto, quien descubrió que, al frotar un trozo de resina de árbol petrificada con un paño, la resina atraía objetos de masa pequeña que se encontraban cerca. Este momento es reconocido como el primero en la historia de esta disciplina (Jonassen, 2013).

Muchos años más tarde, recién en el siglo XVII, diversos científicos realizaron notables descubrimientos en torno a lo que, en ese entonces se conocía como la “ciencia de la electricidad”. Alrededor del 1600, el filósofo y médico inglés, William Gilbert describió los fenómenos de carga y fuerza eléctrica, acuñando así el concepto de electricidad. Aproximadamente 60 años más tarde, el físico alemán Otto Von Guericke construyó la primera máquina para producir electricidad estática, aparato que siglos más tarde inspiraría la creación del generador Van de Graaf (VDG) en 1973. Solo algunos años después, específicamente en 1675, Robert Boyle, científico irlandés, descubrió que las fuerzas de atracción y repulsión eléctricas eran mutuas y se transmitían en el vacío. Durante este período, el estudio de la electricidad se enfocó principalmente en dos tipos de fenómenos: las atracciones y repulsiones entre cuerpos electrificados; y las descargas eléctricas y sus efectos. Se pensaba que las propiedades eléctricas respondían a la existencia de un fluido eléctrico que existía en los cuerpos electrificados (Furió et al., 2016).

A partir del siglo XVIII hubo una serie de importantes descubrimientos que pavimentaron el camino de lo que hoy en día sabemos de la electrostática. Un elemento a destacar de este período es la contraposición de ideas de Charles Francois de Cisternay Du Fay, quien en 1733 postuló que existían dos tipos de carga que se atraían mutuamente: una que podía “ponerse” en vidrio (electricidad vítrea) y otra que podía “ponerse” en ámbar (electricidad resinosa); y las de Benjamín Franklin, quien planteó en 1740 que existía solo un tipo de carga, y denominó la carga del vidrio positiva (por tener más carga que la habitual) y la del ámbar negativa (por tener menos carga). Otra contribución de este período es la de Stephen Gray, quien identificó la capacidad conductora de los cuerpos y luego clasificó los materiales en conductores y aislantes, junto con G. Wheler y J. Godfrey. El neerlandés Pieter van Musschenbroek también pasó a la historia de la electrostática al crear el vaso de Leyden, utilizado para almacenar grandes cantidades de carga electroestática y descargarlas

completamente de una vez, sentando las bases para la creación de los condensadores o capacitores actuales. Solo dos años después de su creación, el científico William Watson descubrió cómo descargar un vaso de Leyden mediante un circuito, hito que dio paso al estudio de los circuitos eléctricos.

Durante la segunda mitad del siglo XVIII nacieron nuevas leyes e ideas sobre cómo funcionaba el mundo de la electrostática, además de expresiones matemáticas para describirlas. Entre ellas, se destaca el trabajo del inglés Henry Cavendish, quien logró medir la conductividad eléctrica de los materiales y planteó la ley de atracción entre cargas. Muy relevante fue también la labor del físico francés Charles Augustin de Coulomb, quien estableció en 1785 el principio que rige la interacción entre las cargas eléctricas, actualmente conocido como ley de Coulomb, permitiendo así expresar matemáticamente los fenómenos electrostáticos. Además, estudió la electrización por frotamiento y la polarización, e introdujo el concepto de momento magnético.

Durante el siglo XIX, destacados científicos profundizaron y expandieron el trabajo realizado por sus antecesores. En el año 1800, el científico italiano Alessandro Volta creó la primera pila conectando discos de zinc y cobre, separados por paños empapados en vinagre, generando así una corriente eléctrica continua. Este invento, inspirado en sus discusiones con Luigi Galvani sobre los efectos de la electricidad en el cuerpo de las ranas, fue la base para la construcción de las baterías que conocemos actualmente. Los científicos Georg Simon Ohm y Gustav Robert Kirchhoff también se destacaron enormemente en este período al plantear las leyes que permiten conocer las relaciones entre los conceptos de resistencia eléctrica, diferencia de potencial y corriente eléctrica. Estos postulados resultaron ser fundamentales para la elaboración de circuitos eléctricos. Años más tarde, el científico francés André Marie Ampère, actualmente conocido como el padre de la electrodinámica, postuló la Ley de Ampère, que expresa matemáticamente la relación existente entre el campo magnético estático y la corriente eléctrica. Además, creó el amperímetro, instrumento para medir la corriente eléctrica, y su unidad de medida, el amperio.

Durante el siglo XIX, también se descubrió que existe un vínculo entre la electricidad y el magnetismo. Si bien científicos habían propuesto esta hipótesis anteriormente, fue Hans

Christian Oesterd quién lo comprobó, desviando una brújula magnética al acercarle un cable que conducía corriente eléctrica. Gracias a este experimento, conocemos hoy el principio electromagnético que señala que cuando pasa corriente eléctrica por un conductor, este se transforma en un imán. Luego, en 1831, el inglés Michael Faraday descubrió que un campo eléctrico cambiante puede producir una corriente eléctrica, y a la vez, una corriente eléctrica produce un campo magnético a su alrededor. Este fenómeno se denomina hoy en día inducción electromagnética. Otros nombres destacados de este período son: Heinrich Friederich Lenz, quien propuso la ley de oposición de las corrientes inducidas en 1833; James Clerk Maxwell, científico que modeló matemáticamente los fenómenos electromagnéticos y descubrió, gracias a sus ecuaciones, la existencia de ondas electromagnéticas en la teoría; y Heinrich Rudolf Hertz, quien produjo y detectó en la realidad las ondas electromagnéticas descubiertas por Maxwell.

El trabajo de los científicos a lo largo de estos 2000 años ha permitido los avances que conocemos desde el siglo XX en adelante en múltiples áreas como el transporte, la industria, la salud y el entretenimiento, entre otras. Nuevos científicos y científicas han continuado desarrollando los descubrimientos de sus predecesores hasta llegar a manejar la tecnología en profundidad y desarrollarla para que esté al servicio de la calidad de vida del ser humano, como la conocemos hoy en día.

### **3.2.2 Los modelos clave en la electrostática**

Como se ha discutido en el apartado 3.1.3, un modelo es un conjunto de ideas clave que permiten explicar y predecir fenómenos naturales. Actualmente, podemos hablar de dos modelos que permiten dar explicación y comprender los fenómenos electrostáticos que van desde la frotación entre dos cuerpos y la atracción mutua que se produce posteriormente, hasta el funcionamiento de un pararrayos. Estos dos modelos se denominan: Modelo de distribución e interacción de cargas, y Modelo de campo eléctrico.

- El modelo de distribución e interacción de cargas hace referencia a una interacción a distancia entre las cargas eléctricas. Explica fenómenos cuyo comportamiento depende del tipo de material de los cuerpos que interactúan. Este modelo permite interpretar todos los fenómenos electrostáticos simples, tales como la atracción de papelitos o la descarga de estática entre dos personas.



- El modelo de campo eléctrico hace referencia a una perturbación en el espacio, debido a la presencia de una o de muchas cargas, que cambia las propiedades del medio y permite pronosticar el comportamiento de las cargas que puedan estar dentro de esta región en términos dinámicos (fuerza y energía). A continuación, desarrollamos los aspectos más importantes de cada uno.

### **3.2.2.1 El Modelo de Distribución e Interacción de Cargas (M-DIC)**

La primera idea que compone este modelo señala que la materia es eléctrica pues tiene cargas positivas y negativas. Esta idea plantea que como la materia está constituida por átomos y estos átomos por partículas como los protones y electrones, los cuales poseen carga eléctrica, podemos decir que toda la materia es eléctrica.

Fue John Dalton (basándose en ideas de Leucipo y Demócrito) quien, a principios del siglo XIX contradijo la idea imperante de Aristóteles sobre la naturaleza de la materia. Este último pensaba que la materia era una combinación de los cuatro elementos: agua, fuego, aire y tierra, y así lo pensó la sociedad por más de 2000 años. La teoría de Dalton (1808) afirmaba que los átomos eran como esferas indivisibles. Fue recién en el siglo XX cuando Thomson (1904) planteó que los átomos eran esferas con cargas positivas y negativas uniformes.

La teoría atómica de Dalton permitió representar de manera microscópica las distintas sustancias que habían sido descubiertas hasta la fecha, en diferentes estados e incluso los cambios sustanciales en las reacciones químicas (Furió y Domínguez, 2007). Se estableció que los átomos eran partículas esféricas, indivisibles e inmutables que componen la materia. También se determinó que en cada elemento químico los átomos son idénticos entre sí, lo que se tradujo en una mayor comprensión sobre este concepto, fundamental para la química (Furió y Domínguez, 2007). Estos descubrimientos permitieron luego explicar leyes como la de las proporciones constantes de combinación de Proust, y la de conservación de la masa de Lavoisier.

Así pues, podemos definir el Modelo de Distribución e Interacción de cargas eléctricas (DIC) a partir del siguiente conjunto de enunciados:

1. La materia es eléctrica pues tiene cargas positivas y negativas.

2. Cuando un objeto, cuerpo o sistema tiene la misma cantidad de cargas positivas y negativas es eléctricamente neutro.
3. La carga neta dentro de un sistema aislado es siempre constante.
4. Un cuerpo con mayor número de cargas positivas que negativas, está cargado positivamente, debido a que cedió una cantidad de electrones. Caso contrario es cuando obtiene electrones quedando cargado negativamente (carga en exceso)
5. A partir de la frotación (fricción) entre dos cuerpos, se produce una transferencia de cargas eléctricas de un cuerpo a otro.
6. Las cargas del mismo signo se repelen y las de contrario se atraen, tanto como el material se los permita.
7. Si el material es un vidrio, madera, papel, etc., se le llama dieléctrico, esto quiere decir que el movimiento de carga (electrones) es poco viable, su carga puede ser parcial y se descarga (volver a ser neutro) muy lentamente si no está aislado.
8. Si el material es un metal, se le llama conductor, esto quiere decir que es factible el movimiento de cargas por toda su superficie y, por tanto, se descarga inmediatamente si no está aislado.
9. La magnitud de la repulsión o atracción depende tanto de la cantidad de cargas como de la distancia de separación entre ellas: a mayor cantidad de cargas mayor es la interacción, y cuanto más próximos estén también mayor es la interacción.

En los siguientes apartados comunicaremos como es la enseñanza tradicional de la electrostática basándonos además en los dos libros más usados en nuestro contexto:

- Tipler y Mosca (2010). Física para la ciencia y la tecnología. Volumen 2.
- Serway et al. (2010). Fundamentos de Física. Volumen 2.

En ambos libros se muestran como métodos de electrización la frotación o fricción, la inducción y el contacto. En primer lugar, se presenta la frotación de un pedazo de caucho y vidrio con un paño de seda. Tras la frotación, se revisan tres montajes donde se sitúan en cercanía caucho-caucho, caucho-vidrio y vidrio-vidrio, sostenidos en el aire ambos elementos con hilos. Con este montaje se demuestra que existe dos tipos de carga, la

positiva y negativa, y dos tipos de efectos, la atracción y repulsión. Concluyendo que si se frotan dos cuerpos del mismo material con el mismo paño quedarán cargados con el mismo signo, produciéndose una repulsión. En el caso que se frotan con el mismo paño dos elementos distintos, quedarán con carga de signo opuesta, produciéndose una atracción. Se cierra este apartado con la serie triboeléctrica, que muestra la afinidad de ciertos materiales en captar o ceder electrones tras una frotación (en griego “tribos” significa rozamiento).

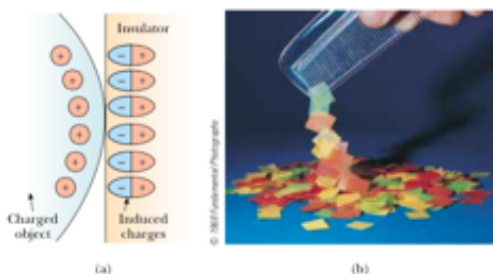


**Figura 11** Imágenes para mostrar la atracción y repulsión (Serway et al., 2010, p 501) (Tipler y Mosca, 2010, p 694)

En estos casos, se usa la atracción y repulsión, pero no cuentan con una explicación un poco más a fondo del fenómeno, como por ejemplo para responder:

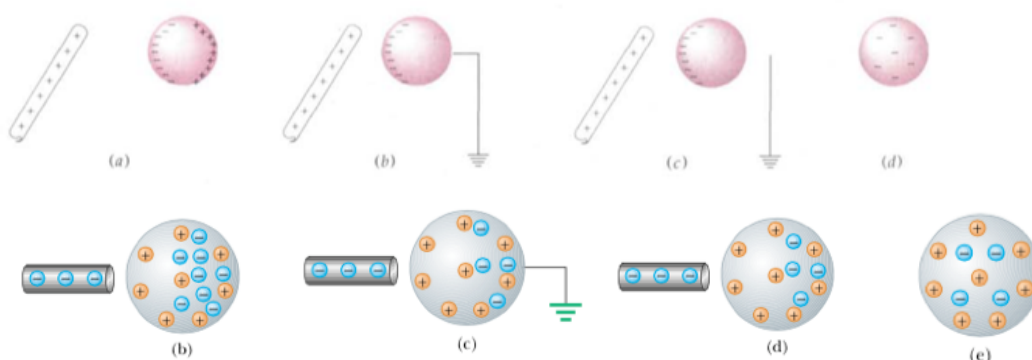
- ¿por qué fue posible la atracción, si ambos cuerpos aun poseen cargas de igual signo?
- ¿todo el cuerpo que se frota queda cargado con el signo que señala la serie triboeléctrica?
- ¿cuándo la atracción y repulsión son más intensas?
- ¿por qué siempre un cuerpo cargado puede atraer un cuerpo neutro?

En el texto Fundamentos de Física (Serway et al, 2010), existe una representación más amable para este tipo de fenómeno electrostático. Se muestra cómo se reordena la carga eléctrica de un dieléctrico neutro, evidenciando las variables de carga y distancia para la magnitud de fuerza de atracción o repulsión.



**Figura 12** el objeto cargado a la izquierda induce cargas en la superficie del aislante. En la imagen de la derecha un peine cargado atrae trozos de papel porque las cargas se desplazan en el papel (Serway et al., 2010, p 501)

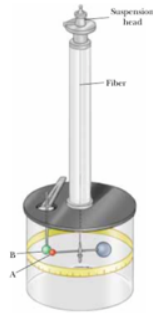
Para la carga por inducción y contacto, en los dos textos, se ilustran con el ejemplo de que una varilla cargada previamente, se acerca a dos esferas metálicas aisladas (por un hilo o por un pie aislante) en contacto entre ellas. Las ilustraciones evidencian un movimiento de cargas negativas a una de las esferas. Al separarlas, en presencia de la varilla cargada, una esfera queda con mayor cantidad de electrones y la otra con su defecto de electrones, quedando ambas esferas con carga neta igual, pero con signo contrario. Finalmente, se muestra la carga por contacto por medio de un cable a tierra con dos ejemplos, uno para neutralizar las esferas cargadas del ejemplo anterior y el otro para cargar una nueva esfera en presencia de un cuerpo cargado, combinando la inducción y la carga por contacto.



**Figura 13** imágenes que muestra la carga por inducción y la descarga por contacto (Serway et al., 2010, p 500) (Tipler y Mosca, 2010, p 697)

Continúa la lección con la ley de Coulomb, que nos proporciona la facultad de cuantificar la fuerza eléctrica. Con esta ley podemos ver que los fenómenos atracción y repulsión son en realidad consecuencias de fuerzas que actúan entre cargas eléctricas. La ley de Coulomb señala que la magnitud de la fuerza eléctrica es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa a dichas cargas. La relación se construye a partir de los resultados del experimento de la “balanza de torsión” alrededor del 1777.

La “balanza de torsión” es un instrumento que posee una fibra elástica que puede ser sometida a torsiones. La fibra sostiene una barra, que en sus extremos puede retener una cierta cantidad de carga eléctrica en unas pequeñas esferas. Cuando se cargan las esferas la fuerza de repulsión o atracción hace que la barra se mueva, haciendo que la fibra se tuerza, la cual es posible cuantificarla por medio del conocimiento de la elasticidad de los materiales. Por tanto, la “balanza de torsión” se vuelve un instrumento para medir pequeñas fuerzas.



**Figura 14** Balanza de Torsión de Coulomb (Serway et al., 2010)

Además de la relación, Coulomb determina la constante de proporcionalidad “k” la cual adquiere diferentes valores dependiendo del medio donde las cargas interactúan, permitiendo establecer la igualdad en la ecuación de Coulomb.

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{R^2}.$$

**Figura 15** Magnitud de la fuerza eléctrica Ley de Coulomb.

Generalmente la instrucción en esta etapa conlleva a resolver problemas mediante la expresión de la ley de Coulomb en diferentes situaciones. Pero no se responden preguntas tipo:

- ¿Qué relación hay entre los valores de k y los materiales conductores y dieléctricos, y ¿cuál es su consecuencia en el valor de la fuerza eléctrica?
- ¿Cómo se explica la polarización y la atracción de pequeños papeles (dieléctrico) por medio de esta ley?
- Cuando un cuerpo cargado está muy próximo a un electroscopio ¿por qué la aguja del electroscopio se desplaza con mayor ángulo de su posición original?
- ¿Cómo es posible que la fuerza sea de acción a distancia?

### 3.2.2.2 El Modelo de Campo Eléctrico para una carga Puntual (M-CE)

Tras optimizar la técnica de resolución de problemas algebraicos usando la Ley de Coulomb, la instrucción nos lleva a darnos cuenta de que existe un factor que se nos repite en cada situación:

$$\frac{F}{Q_2} = k \frac{Q_1}{R^2} \rightarrow \frac{F}{Q_2} = E \rightarrow E = k \frac{Q_1}{R^2}$$

Figura 16 Relación entre intensidad de campo eléctrico y fuerza coulombiana.

A este cociente se le llama intensidad de campo eléctrico, simbolizándolo con la letra E. Para ello, se define que el campo eléctrico es una perturbación del medio, material o no, debido a la presencia de carga eléctrica. Por tanto, se señala que en realidad la fuerza eléctrica la ejerce el campo y no es una acción a distancia entre cargas, a diferencia de los planteamientos de la mecánica newtoniana.

En estos momentos podríamos preguntar ¿Cuál es la necesidad de involucrar este nuevo concepto? ¿Sólo para ahorrarse álgebra en resolución de problemas? ¿existe sólo cuando ubicamos una carga de prueba? ¿Cuál es la rapidez con que se propaga el campo eléctrico?

El campo eléctrico se define como un campo vectorial, por lo que cada punto del campo se le asocia un vector llamado E. La representación que se usa para este vector se le llama líneas de campo eléctrico. Para el trazado de las líneas se establece una convención. Se indica que para una carga positiva las líneas de campo eléctrico son radiales hacia afuera mientras que las líneas de campo eléctrico para la carga negativa son radiales hacia dentro.

En Tipler y Mosca (2010) nos muestra unas instrucciones para reconocer a las líneas de campo eléctrico. No obstante, en este contexto podríamos preguntarnos si las líneas de campo ¿son en realidad el campo eléctrico? ¿Existen? ¿Qué relación tienen las líneas de campo con la fuerza sobre una carga de prueba? O ¿sobre pequeños hilos en aceite?

El concepto de campo eléctrico es un pilar fundamental para la enseñanza de la electricidad, debido a que brinda la oportunidad de evitar ciertos errores conceptuales. Por ejemplo, los asociados a la transmisión de la señal eléctrica. No obstante, este concepto resulta ser abstracto para profesores no especialistas y para estudiantes tanto de la

educación media (14-18 años) como universitarios, por lo que se recomienda diferenciar dos ideas que suelen mezclarse:

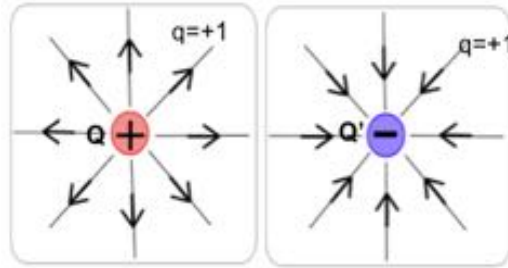
- La idea del **campo eléctrico** como una región del espacio en el que un objeto cargado recibe una fuerza de atracción o repulsión.
- La magnitud denominada **intensidad del campo eléctrico** en un punto, que hace referencia a la fuerza que recibe la unidad de carga colocada en aquel punto.

Es muy frecuente que los estudiantes se refieran al campo eléctrico como **E**, esto es sólo la magnitud que da cuenta de la intensidad en un punto del campo. Cabe destacar que un campo eléctrico en un punto del espacio puede caracterizarse por dos magnitudes: la magnitud vectorial llamada intensidad del campo en aquel punto **E** y la magnitud escalar denominada potencial eléctrico en aquel punto **V**.

El valor de la magnitud intensidad del campo **E** en un punto dado se define como la fuerza que se ejerce sobre una carga positiva de prueba de 1 culombio colocado en ese punto; la dirección del campo está dada por la dirección de esa fuerza. Las líneas de fuerza expresan la dirección del campo en cada punto, es decir, la dirección en la que se desplazaría la unidad de carga positiva.

Para plantear el campo eléctrico, suele usarse la idea que una carga **Q** colocada en algún punto del espacio crea un campo, es decir, cualquier otra carga que se coloque en él recibirá una atracción o una repulsión. Se puede expresar este hecho de dos modos: mediante la fuerza **F** que recibe **Q** cuando está colocada en un punto o también mediante la energía potencial **E<sub>p</sub>** que tiene **Q** por el hecho de estar colocada en aquel punto.

Las líneas que se destacan en la imagen corresponden a la presencia de un campo eléctrico. El sentido de las líneas de campo eléctrico lo da la carga que lo genera. Si es positiva será radial hacia fuera y si es negativa en dirección contraria.



**Figura 17** Representa las líneas de campo para dos cargas puntuales de signo contrario

Basándonos en este conjunto de relaciones, podemos expresar el Modelo de Campo Eléctrico y su representación a través de un conjunto de enunciados:

1. El campo eléctrico es la región alterada por la presencia de una carga\*
  - \*más adelante hablaremos de una distribución de cargas dentro de un cuerpo/sistema cargado.
2. En cada punto de esta región podemos asociar una magnitud de carácter vectorial llamado intensidad de campo (función vectorial) que representa la fuerza por unidad de carga en ese punto.  $E=F/q$
3. Cuanto más distante elijamos un punto de la carga que genera el campo, la intensidad será menor, existiendo una proporcionalidad de  $1/r^2$ .
4. A la vez existe una proporcionalidad directa con la carga generadora de campo.
5. Siempre que un conductor este en presencia de un campo eléctrico externo, desplazara sus cargas libres hasta contrarrestar el campo exterior, de manera que en su interior el campo eléctrico sea nulo. A esto se le llama equilibrio electrostático.
6. Dado el carácter vectorial de la intensidad de campo, las líneas de campo son una representación adecuada para la región del espacio que experimenta el campo eléctrico.
7. Cada punto sobre la línea de campo nos indica la dirección y sentido de la fuerza sobre la carga  $q=+1$  debida a la carga generadora del campo.
8. La dirección del campo para una carga generadora positiva aislada es radial hacia afuera, caso contrario si es negativa.



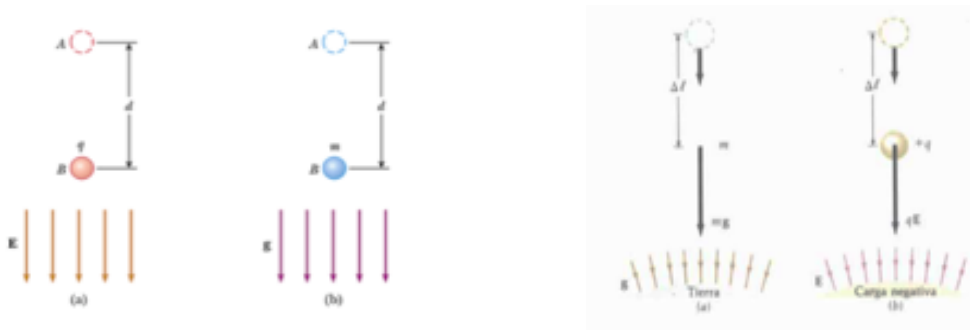
### 3.2.2.3 Un Modelo Híbrido: el campo eléctrico en una distribución de cargas

Como se puede observar, el Modelo de Campo Eléctrico para una carga Puntual (M-CE) puede extenderse a la situación donde haya una distribución de cargas. Por ejemplo, para situaciones donde haya dos cuerpos cargados opuestos las líneas salen de la carga positiva y entran en la carga negativa, representando la interacción de dos campos. Por este motivo, proponemos usar la idea de modelo híbrido (Justi y Gilbert, 1999) que incluya tanto M-DIC como M-CE, que discutimos a continuación.

Con la ayuda de la representación de las líneas de campo eléctrico podemos saber en qué zonas el campo eléctrico es más y menos intenso por medio de la idea de densidad de líneas de campo eléctrico. Este concepto ayuda para la definición de flujo eléctrico. Con el flujo eléctrico, una superficie imaginaria que lleva por nombre “superficie gaussiana” y conocimiento para operar una integral de superficie, se obtiene una relación entre la carga encerrada en esta superficie y la cantidad de líneas que la cruzan, llamada ley de Gauss. La ley de Gauss sirve para calcular la magnitud de  $E$  para campos generados por distribuciones de carga simétricos, es decir, donde en todos los puntos de la superficie gaussiana  $E$  sea constante y que el flujo sea máximo o cero.

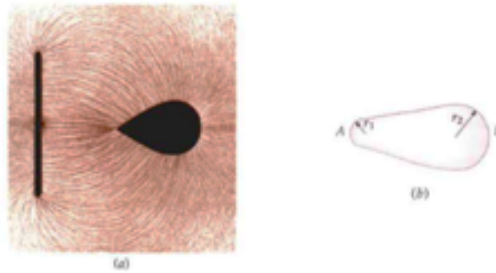
En este último tópico nos podríamos preguntar ¿la ley de Gauss sólo sirve para hacer sencillo el cálculo de  $E$ ? ¿Si el flujo es cero el  $E$  también lo es? ¿si no hay carga encerrada por tanto no hay campo eléctrico? En realidad, para efectos de la vida cotidiana ¿deberíamos aprender la ley de Gauss para interpretar fenómenos eléctricos?

Si volvemos al contenido de los dos libros de referencia (Tipler y Mosca, 2010; Serway et al 2010) podremos ver que para la idea de potencial eléctrico ambos libros usan la analogía con el potencial gravitacional, mediante la expresión del trabajo mecánico. Ambos libros, se extiende al trabajo algebraico para la resolución de problemas, sin hacer relaciones explícitas de este nuevo concepto a la distribución de cargas eléctricas.



**Figura 18** Imagen de ambos textos para realizar una analogía entre el campo gravitacional y el campo eléctrico (Serway, 2010) (Tipler y Mosca, 2010, p765)

Sin embargo, en el libro de los autores Tipler y Mosca, podemos ver una aplicación de la idea de potencial a la distribución de cargas sobre un conductor no simétrico, que será de gran interés más adelante en el diseño de la SEA y en el análisis de las explicaciones del alumnado.



**Figura 19** donde muestra que el potencial sobre un conductor debe permanecer constante (Tipler y Mosca, 2010, p787)

Así, a nuestro entender, para analizar situaciones más complejas que incluyan tanto una distribución de cargas como un campo eléctrico, podemos definir este modelo híbrido a través de otro conjunto de enunciados:

1. El potencial eléctrico es un valor escalar que señala la energía por unidad de carga en un punto del campo eléctrico.
2. En la superficie de un conductor el potencial es constante.
3. La intensidad de campo eléctrico en las cercanías a su superficie es proporcional a la densidad de cargas.
4. La intensidad del campo eléctrico en un punto se puede determinar por medio de la densidad de líneas de campo, es decir cuánto mayor es la concentración de líneas de campo mayor es la intensidad de campo (caso contrario menor será la Intensidad).

5. En toda superficie se puede contar la cantidad de líneas de campo eléctrico que atraviesan una determinada área, a esto se le llama Flujo.
6. La cantidad de líneas que atraviesan una superficie cerrada es proporcional a la magnitud de la carga neta que genera el campo eléctrico.
7. El flujo neto que atraviesa una superficie cerrada, sobre distribuciones de carga simétricas, es igual a  $4\pi k$  veces la carga encerrada. Esto se conoce como la ley de Gauss.

### 3.2.3. La didáctica de la electrostática

En las últimas décadas, y especialmente durante los años 90 de siglo pasado, hubo diferentes investigaciones que evidenciaron las dificultades que los estudiantes presentan a la hora de aprender sobre la electrostática. Una de las más complejas de sobrellevar es la densidad de conceptos necesarios para comprender los fenómenos eléctricos y, especialmente, la dificultad que tienen para diferenciar conceptos relacionados, pero distintos, y a la vez su uso simultáneo (Viennot, 2001). En los siguientes apartados se presentan algunos de los principales hallazgos existentes sobre el aprendizaje de la carga y la interacción entre cargas, el aprendizaje del concepto de campo eléctrico y sobre la representación del campo eléctrico.

#### 3.2.3.1 Sobre el aprendizaje de la carga y la interacción entre cargas

Para conocer las dificultades y las confusiones sobre el concepto de carga eléctrica, durante la última década del s. XX se llevaron a cabo diferentes investigaciones, enfrentando al alumnado de diferentes cursos a diferentes fenómenos electrostáticos, como la interacción entre un cuerpo cargado y una varilla de cobre o de madera (Park, 2001), la frotación de una barra metálica (Furió y Guisasola, 1993), o la aplicación de la tercera ley de Newton con carga en péndulo (Galili, 1995). Con estos y otros experimentos, según Furió y Guisasola (1998a) algunas de las confusiones más relevantes eran la concepción creacionista (la idea de creación de cargas en los fenómenos de fricción triboeléctrica), así como diferentes dificultades al considerar el medio, el problema de la fijación funcional, el casualismo simple o la común inversión de la implicación causa-efecto. No obstante, estos autores también señalan que estas ideas podían verse mejoradas o superadas gracias a la instrucción con estudiantes de Bachillerato y primeros cursos universitarios.

De hecho, poco antes, en su tesis doctoral, Guisasola (1996) ya había recogido un abanico de casos que podían darse según una instrucción, resumidos en la siguiente tabla.

<b>Objetivos de enseñanza</b>	<b>Dificultades de aprendizaje asociadas</b>
1. Reconocer que toda la materia es de naturaleza eléctrica.	Confundir la propiedad de los materiales para conducir o no la electricidad con la naturaleza eléctrica de dichos materiales
2. Entender que la propiedad eléctrica de la materia se explica al aceptar la existencia de cargas	Concepción alternativa que puede aparecer: pensar que la carga eléctrica no está en los cuerpos neutros

eléctricas en su seno, que se presenta en dos formas, tal que cargas de signos contrarios se atraen y del mismo signo se repelen.	
3. Explicar de acuerdo con el modelo establecido fenómenos ordinarios: a) Electrización por frotamiento b) Los cuerpos se encuentran normalmente en estado neutro. c) Electrización por contacto y la conducción eléctrica. d) Inducción eléctrica	a) Puede aparecer una concepción “creacionista” de la carga según la cual ésta no existía antes en la materia y se crea al frotar. b) No hay cargas en los cuerpos no electrizados c) Comportamiento de aislantes y conductores frente a los fenómenos eléctricos. d) Identificar la propiedad eléctrica como un “fluido” compuesto de cargas. Es que explica la inducción mediante un efecto “halo” en contra de una interpretación como “acción a distancia”
4. Expresar de forma cuantitativa la fuerza entre cargas en reposo	Excesivo operativismo sin relación con el modelo de carga como “acción a distancia” que se ha construido, así como dificultades en el manejo de control de variables.

**Tabla 2** Relación de objetivos y dificultades de aprendizaje en la interpretación coulombiana de la naturaleza eléctrica de la materia (Guisasola. J, 1996, p. 270)

Si volvemos al ejemplo del peine y los trozos de papel mostrado en la figura 12 representa un buen contexto donde identificar algunas de estas dificultades y confusiones. Como hemos dicho en la sección anterior, cuando un cuerpo dieléctrico cargado previamente por frotación se acerca a otro neutro, éste último reordena sus dipolos en función de la fuerza eléctrica. La fuerza eléctrica es a la vez atractiva con las cargas contrarias y repulsiva con las cargas del mismo signo. El material no permite que los electrones se muevan por la superficie del material, pero ligeros desplazamientos logran que la fuerza sobre las cargas opuestas, es decir, la fuerza de atracción sea mayor en magnitud que la fuerza de repulsión, permitiendo en algunos casos, si esta fuerza es comparable al peso del cuerpo neutro, producirse un movimiento. A la hora de explicar lo que sucede en este fenómeno, diferentes autores afirman que los estudiantes no usan el concepto de carga, diferencia de potencial y capacidad eléctrica para interpretar los procesos elementales de carga de un cuerpo (Mulhall et al., 2001; Guisasola et al., 2008b),

Otro elemento reportado por distintos autores (Guruswamy et al., 1997; Furió y Guisasola, 1999; Park et al., 2001; Furió et al., 2004) es la dificultad que presentan los estudiantes para analizar el comportamiento de la materia ante la interacción eléctrica. Esto se debería a que los estudiantes no comprenden a cabalidad la naturaleza eléctrica de los cuerpos. Por lo tanto, no logran interpretar fenómenos de polarización eléctrica de manera consistente con el modelo (Viennot y Rainson, 1992; Galili, 1995; Guisasola et al., 2004).

También se ha identificado como una dificultad frecuente entre estudiantes de distintos niveles educativos el no poder predecir la transferencia de carga entre conductores puestos en contacto juntos (Guruswamy et al., 1997). Aparentemente, el problema radica en que no logran identificar las fuerzas que entran en juego en este montaje, por lo tanto, no pueden determinar el proceso de transferencia con exactitud.

Finalmente, aunque nos centremos en el dominio de la electrostática, a todas estas cuestiones hay que añadir la confusión asociada a la carga eléctrica al comparar contextos dinámicos y estáticos (Benseghir y Closset, 1996).

### **3.2.3.2 Sobre el aprendizaje del concepto de Campo Eléctrico**

Como se ha expuesto anteriormente, el campo eléctrico es un concepto esencial para la comprensión de los fenómenos eléctricos. Sin un apropiado conocimiento de este, nociones como la diferencia de potencial para el movimiento de cargas, base para la construcción de explicaciones más complejas, son poco probables de alcanzar (Eylon y Ganiel, 1990; Viennot y Rainson, 1992). Así, Viennot y Raison (1992) identifican tres dificultades importantes en el aprendizaje de este constructo:

- La primera es la tendencia de los estudiantes a pensar que solo hay campo eléctrico donde hay movimiento de cargas. Como evidencia, se reporta que los estudiantes usualmente niegan que dos campos, donde hay material de distinta conductividad, puedan tener igual valor.
- La segunda es la mala interpretación de la fórmula que describe al campo eléctrico, donde los estudiantes tienden a asumir que las cantidades ubicadas al lado derecho de esta son la causa de las cantidades de la izquierda.

- La tercera es que los estudiantes tienen problemas para identificar el rol del campo eléctrico en un circuito eléctrico, demostrando así que no tienen una comprensión integral del concepto.

Igual como sucede con la idea de carga, Guisasola (1996) investiga también esta área y propone nuevas dificultades en torno al aprendizaje del campo eléctrico. La siguiente tabla ilustra las dificultades esperadas para cada objetivo de enseñanza según el autor.

Objetivos de enseñanza	Dificultades de aprendizaje
1. Comprender las limitaciones del modelo de Coulomb para interpretar las interacciones eléctricas.	Ontológica: Comprensión cualitativa del campo eléctrico. Pensar que la perturbación en un punto del espacio solo existe cuando esta “visible” allí la carga testigo.
2. Comprender el papel que juega el campo eléctrico como nueva interpretación de la interacción eléctrica.	
3. Entender que la magnitud intensidad de campo solo depende de la distancia y de la carga creadora del campo.	Conceptual: Confuso entre la intensidad de campo y la fuerza eléctrica.
4. Aplicar el modelo al cálculo de la intensidad de campo para una carga puntual y distribuciones de carga puntuales.	Procedimental: Caer en un puro operativismo. No tener en cuenta el carácter vectorial E.
5. Comprender la representación gráfica del campo eléctrico a través de las líneas de campo y aplicarlo al estudio cuantitativo del campo eléctrico, definiendo el concepto de flujo eléctrico.	Procedimental: Caer en un operativismo del concepto de flujo.
6. Explicar con el nuevo modelo: a) la propagación de la interacción eléctrica b) el fenómeno de la “Jaula de Faraday”.	Fijación funcional del modelo de “acción a distancia”.
7. Comprender y argumentar el interés de introducir una nueva magnitud llamada potencial eléctrico para explicar el movimiento de las cargas.	No entender la necesidad de introducir el potencial eléctrico debido a la utilización de un modelo “hidrostático” para el movimiento de cargas. Comprensión del concepto de potencial eléctrico

**Tabla 3** Relación de objetivos y dificultades de aprendizaje en la interpretación de las interacciones eléctricas de acuerdo con la teoría de campo eléctrico (Guisasola. J, 1996, p. 272)

Dos años más tarde, Furió y Guisasola (1998b) ponen a prueba sus hipótesis y encuentran cuatro principales dificultades de aprendizaje relacionadas con el campo eléctrico:

- La primera, es que los estudiantes no logran diferenciar los conceptos de fuerza e intensidad de campo eléctrico. La explicación para esto es que a pesar de que se define que  $F = Eq$ , E no tiene suficiente nivel epistemológico, por lo tanto, los estudiantes reducen funcionalmente E a F, concibiéndolos como el mismo concepto. Idea similar ya reportaba Viennot y Raison (1992), señalando que no puede existir campo eléctrico si no hay la acción de una fuerza sobre una carga. Las autoras interpretan que podría ser una distorsión en el significado de la fórmula  $F = Eq$ , por la necesidad de tener un efecto real para aceptar la existencia de un abstracto como es la idea de campo eléctrico.
- La segunda dificultad es que los estudiantes consideran las interacciones electrostáticas como interacciones inmediatas a distancia entre cargas eléctricas, es decir, la fuerza que se ejerce entre cargas no contempla el medio por el que se transmite esa interacción.
- La tercera dificultad es que, los estudiantes tienden a utilizar una visión Coulombiana en casos complejos, como el de la “Jaula de Faraday”, donde se enfocan en la distancia mientras que ignoran el medio y la geometría de la jaula.
- La última dificultad es que, en este mismo tipo de situaciones complejas, los estudiantes no consideran la distribución de cargas para dar una explicación a los fenómenos, cayendo en una reducción funcional.

De hecho, el efecto de jaula de Faraday se resuelve de forma más sencilla si se piensa que un campo eléctrico externo ejerce fuerza sobre las cargas de la jaula, la cual por ser de material conductor permite el desplazamiento de cargas por su superficie. Las cargas de la jaula llegan a distribuirse de manera homogénea por el material, produciendo una superposición de campo eléctrico con el campo eléctrico externo. Por la disposición de las cargas, se da un campo eléctrico resultante nulo en el interior de la jaula, por lo que los objetos que puedan estar dentro de la jaula no presentarán reordenamiento de sus cargas. A este fenómeno se le llama “equilibrio electrostático” o “blindaje electrostático” el cual tiene múltiples aplicaciones como por ejemplo para proteger diferentes aparatos electrónicos, para la seguridad de las personas dentro de edificios, aviones y automóviles debido a descargas eléctricas externas, etc. En el caso que se resuelva por la ley de Coulomb, debe



considerarse cada elemento de carga dispuesto en la jaula y realizar la suma vectorial por todo el volumen del interior de ésta para demostrar la misma idea. Además, se ha visto que, al usar este último razonamiento, los estudiantes suelen asumir que las caras de la jaula funcionan como si fuera una sola carga eléctrica y no una distribución homogénea de cargas eléctricas, llevando a los estudiantes señalar que “sólo en el centro de la jaula la fuerza es nula sobre las cargas de un objeto en el interior de ésta” una interpretación errada del fenómeno (Furió y Guisasola, 1998b).

Posteriormente, Bar y Zinn (1998) descubrieron otras dificultades que los estudiantes presentan al aprender el fenómeno de campo eléctrico. En su investigación, concluyeron que un porcentaje alto de alumnos creía que para que hubiera procesos electrostáticos, se requería siempre la presencia de un medio, en este caso el aire. Los estudiantes consideraban que este medio era necesario también para operar a distancia, para las atracciones gravitacionales, magnéticas y para la transferencia de calor. Otro hallazgo singular fue que los alumnos pensaban que no podía haber electrostática si no había gravedad.

Otros autores apuntan a problemas en la instrucción como los responsables de las dificultades de aprendizaje del campo eléctrico. Por ejemplo, Galili (1995) señala que los malentendidos del concepto de campo derivan de la falta de coincidencia de la metodología aplicada en mecánica y en Electromagnetismo. La enseñanza de la mecánica, cuerpo de conocimiento previo al electromagnetismo en diversos currículos a nivel global, no contempla el desarrollo del concepto de campo, en cambio en electromagnetismo tiene un uso extensivo y además, como pilar fundamental en este dominio.

Por otro lado, la evidencia señala que los estudiantes generalmente se quedan con una única forma de razonar “tipo receta” (Rainson et al., 1994). En esta misma línea, McMillan III y Swadener (1991) ya habían señalado, en un estudio con estudiantes universitarios de física de primer año, que los estudiantes pueden resolver problemas cuantitativos, pero no tienen conocimiento de la naturaleza del problema, es decir, sólo operan, demostrando baja comprensión cualitativa de la naturaleza de las interacciones entre los campos eléctricos

### 3.2.3.2 Sobre la representación del campo eléctrico

Como se ha señalado anteriormente, el campo eléctrico es un concepto abstracto y por tanto lejano a la experiencia diaria de los estudiantes. Este concepto se usa en las clases de física, para explicar un amplio rango de fenómenos incluyendo la comprensión de los circuitos eléctricos y la física moderna, pero para ello es necesaria su representación, que normalmente se hace a través de las líneas de campo.

El análisis de las dificultades en la representación del campo eléctrico fue objeto de estudio en los trabajos de Viennot y Rainson (1992), así como de Raison et al. (1994). En sus resultados, identifican algunas de las confusiones comunes entre velocidad y fuerza, así como confusiones entre campo y fuerza. Algunos estudiantes señalan que la causa del campo es la corriente eléctrica, y muestran dificultades para representar la superposición de campos.

La representación vectorial de un campo eléctrico emana de una mezcla conceptual compleja entre herramientas matemáticas y herramientas de la electrostática (Gire y Price, 2014). Autores como Suciarmoko et al. (2018) y Velazco y Salinas (2001) reportan dificultades en torno a la representación del campo eléctrico. Además, se ha encontrado que los estudiantes conciben las líneas de campo como una entidad física, es decir, que por medio de ella interactúa el campo con el medio o con las cargas eléctricas (Törnkvist et al., 1993; Velazco y Salinas 2001). Bollen et al. (2017) señalan que además presentan dificultades para graficar el campo eléctrico (por medio de vectores y líneas). Estos autores proponen algunas directrices para elaborar representaciones adecuadas para la enseñanza del campo eléctrico, sin embargo, señalan que estas representaciones requieren una dedicación especial y un sustento matemático sólido que vaya de la mano con la interpretación física del fenómeno (Karam, 2014)

Para Guth (1995), las dificultades que se pueden encontrar en la representación del campo eléctrico a través de líneas son:

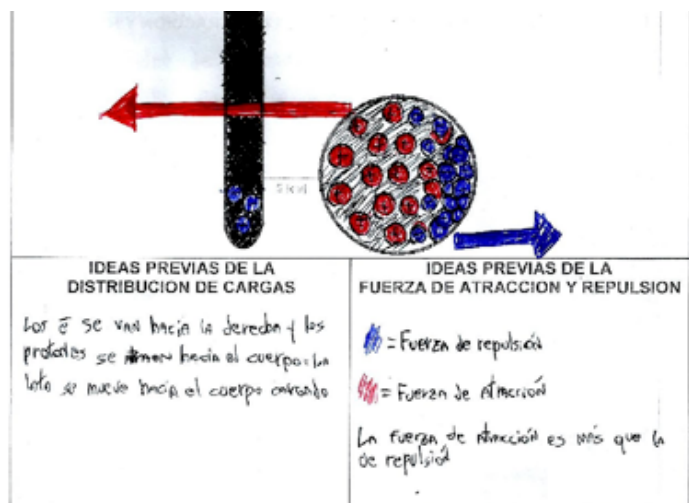
- La falta de relación entre intensidad de campo eléctrico y las líneas de campo, tanto respecto a la intensidad como al sentido del campo.

- La idea errónea que las líneas de campo son líneas de trayectoria de cargas, y que por lo tanto, al dejar una carga sobre una línea de campo, esta seguirá en todo momento la dirección establecida por la línea.

A estas dificultades, cabe destacar dos aspectos más. Por un lado, las confusiones entre las representaciones del campo eléctrico y magnético. Maloney (1985) relató cómo sus estudiantes universitarios de física esperaban que el efecto de los campos magnéticos en las partículas cargadas fuera idéntico al de los campos eléctricos, cosa que Herrmam (1991) atribuye al uso de analogías en el momento de su enseñanza. Y por el otro lado, las propias dificultades en el manejo de las representaciones vectoriales en general (Törnkvist et al., 1993).

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

En los siguientes apartados se presentan las características metodológicas de esta investigación. En primer lugar, se explica el contexto y los participantes del estudio. Luego, se presenta una descripción de la SEA con su enfoque de enseñanza, contenidos, estructura y objetivos. A continuación, se explican los fundamentos teóricos que sustentan la metodología de esta investigación y las técnicas de recolección y análisis de los datos. Finalmente, se explicita el proceso de obtención de categorías que luego serán profundizados en el capítulo de resultados.



Respuesta de un estudiante de 13 años cuyo profesor participó durante su formación de la SEA de esta tesis

## **4.1 Contexto y participantes**

En este primer apartado de la metodología se entregarán detalles del contexto en que se llevó a cabo este estudio y los sujetos que participaron en él.

### **4.1.1 Contexto**

Esta investigación se lleva a cabo en la carrera de Pedagogía en Física y Matemática de la Universidad de Santiago de Chile (USACH) entre los años 2016 y 2018. La USACH es una universidad estatal, ubicada en la ciudad de Santiago, capital de Chile, específicamente en la comuna de Estación Central. La universidad cuenta con un campus único de 32 hectáreas y se ubica en el top 13 del Ranking QS Latin America. Posee alrededor de 21.838 estudiantes de pregrado, distribuidos en 72 programas de estudio (carreras) distintos, los que a su vez se organizan en 9 facultades y un programa de bachillerato.

El programa de estudios en que se implementó esta investigación pertenece a la Facultad de Ciencia. Esta facultad posee dos departamentos: Matemáticas y Ciencia de la Computación, y Física. En el departamento de Física se imparten dos carreras de pregrado: Ingeniería Física y Pedagogía en Física y Matemática (PLEFM); y dos programas de postgrado: un Magíster y un Doctorado en ciencia, mención Física.

Los estudiantes de la PLEFM egresan del programa luego de 9 semestres de estudio, obteniendo el grado de licenciado en educación de física y matemática. Luego, tras terminar la última práctica profesional y el seminario de grado, se obtiene el título profesional de profesor de estado en física y matemática. Este título permite al profesional trabajar en escuelas, colegios o liceos, con estudiantes entre 11 y 18 años, es decir, en el nivel medio del sistema educacional chileno, desempeñándose como docente de física, matemática y además como profesor/a jefe (tutor/a de curso).

El plan de estudios de la PLEFM se divide en cinco líneas de formación: Matemática, Física, Formación Profesional, Tecnología y Comunicación en Educación (TICE) e Inglés. Cada línea de formación se construye en base a las siguientes concepciones, que deben predominar en el docente una vez titulado:

1. Reconoce la naturaleza social, distribuida, situada y construida de la cognición (Putnam y Borko, 2000).
2. Adscribe a la pedagogía crítica (Giroux, 2002), y a la perspectiva sociocultural y constructivista de Vygotsky.
3. Incorpora el enfoque Ciencia Tecnología y Sociedad y medio ambiente de la Organización de Estados Iberoamericanos para la educación y la cultura.
4. Respeta cinco principios pedagógicos:

*Principio I:* La educación durante toda la vida orientada al desarrollo de la persona en sociedad.

*Principio II:* La educación científica y tecnológica, como parte esencial de su desarrollo profesional y personal.

*Principio III:* El conocimiento pedagógico y la integración crítica de la teoría práctica como parte esencial de su desarrollo profesional y personal.

*Principio IV:* El trabajo colaborativo a través de la Comunidad de Práctica de Aprendizaje (CPA) como parte esencial de su desarrollo profesional y personal.

*Principio V:* Acceso a las TICE y el idioma inglés, como parte esencial de su desarrollo profesional, comunicacional y relacional (Vaillant, 2018).

Con respecto al sistema de educación superior chileno, es importante explicar que, en este país, las instituciones y carreras se someten a una acreditación externa visada por la Comisión Nacional de Acreditación (CNA). El proceso de acreditación es voluntario, excepto para las carreras que otorgan los títulos de Médico Cirujano, Profesor de Educación Básica, Profesor de Educación Media, Profesor de Educación Diferencial y Educador de Párvulos. Sin no cuentan con dicha acreditación, las carreras mencionadas no pueden recibir nuevos estudiantes y sus estudiantes actuales no pueden acceder a becas del estado.

El año 2015 la PLEFM obtiene la acreditación máxima (siete años), siendo este un logro inédito en la USACH y en el país en el área de la formación de profesores. La próxima acreditación, en el 2022, deberá revisar el progreso del funcionamiento de la gestión y la actualización de los programas de estudio según las necesidades educativas del país.

Además, para el nuevo ciclo, la CNA exige que las propuestas de mejoramiento se basen en evidencias emergentes de un proceso de investigación educativa.

Para esto, el comité de la PLEFM, señaló que cada docente de la carrera debe aportar al plan de mejoramiento desde sus respectivas asignaturas. Es en este contexto donde surge la idea de esta investigación. El año 2015 asumo como profesor de la asignatura de “Electromagnetismo”, ubicada en el sexto semestre de la línea de formación en Física. Un semestre antes de comenzar las clases, descubro que el programa de la asignatura contempla una estructura tradicional, de cátedra y laboratorio, donde se enseñaban conceptos aislados y acumulativos, hechos, ecuaciones y contenidos sólo en términos cuantitativos, tal como se hace en cualquier programa de licenciatura en física. Además, al indagar me encuentro con que los estudiantes que aprobaron el curso tienen bajos niveles de comprensión de los contenidos de este, evidencia que además respaldan mis predecesores, y el hecho de que hasta esa fecha no existían seminarios de grado (etapa final para titularse de profesores) que involucraran la electricidad y el magnetismo. En este escenario, el comité de carrera me solicita involucrar la asignatura en el plan de mejoramiento.

**CAMPO OCUPACIONAL**

El/la Profesor(a) en Física y Matemática de la Universidad de Santiago de Chile estará capacitado para desempeñarse en el ámbito educacional formal en el nivel de enseñanza media.

Resolución N° 198 año 2015

PLAN DE ESTUDIOS

	Estorno Cercano		La Tierra y el Universo		El mundo Microscópico		El Desarrollo de la Humanidad		5° Año
	Semestre 1	Semestre 2	Semestre 3	Semestre 4	Semestre 5	Semestre 6	Semestre 7	Semestre 8	Semestre 9
Matemática	Matemática de lo Cotidiano I	Matemática de lo Cotidiano II Geometría Euclidiana	Cálculo Superior y Vectorial Álgebra Lineal	Ecuaciones Diferenciales	Estadística y Probabilidades en Educación	Métodos Matemáticos de la Física	Álgebra Moderna	Matemática de Frontera	
Física	Física de lo Cotidiano I Química de lo Cotidiano Biología de lo Cotidiano	Física de lo Cotidiano II ¿Cómo funcionan las cosas? I	Ciencias de la Tierra	Física del Universo ¿Cómo funcionan los seres vivos y su medio ambiente?	Termodinámica Mecánica Clásica	<b>Electromagnetismo</b> ¿Cómo funcionan las cosas? II Electrónica Analógica	Física Moderna y Mecánica Cuántica	Física de Frontera	Práctica Profesional VI
Formación Profesional	Formación Profesional I: Naturaleza Fenómeno Educativo	Taller Integrado: Diálogo, Alteridad y Didáctica Taller de Práctica Profesional I	Formación Profesional II: Cultura Escolar y Gestión de Conflictos	Formación Profesional III: Enfoque CTSA Taller Integrado: Seminario, Interpretación y Didáctica Taller de Práctica Profesional II: Escuela, Familia y Comunidad	Formación Profesional IV: Micro-sociología y Gestión del aula Taller Integrado: Didáctica de la Matemática Taller de Práctica Profesional III: Matemática	Formación Profesional V: Investigación y Didáctica Taller Integrado: Investigación y Didáctica de la Física Práctica Profesional IV: Física	Formación Profesional VI: Metodología de Investigación Taller Integrado: Evaluación, Diversidad y Didáctica Práctica Profesional V: Orientación y Profesor Jefe	Formación Profesional VII: Currículo, Aprendizaje y D. Integral Seminario de Grado	Asignaturas Complementarias (espacio de auto formación)
TICÉ*	TICÉ I		TICÉ II	TICÉ III			TICÉ IV		
Inglés		Inglés I	Inglés II	Inglés III	Inglés IV				

Nota: El plan de estudio podrá ser modificado en función del mejoramiento continuo de la carrera.  
\*Tecnologías de Información y Comunicación en Educación

WWW.ADMISION.USACH.CL

PEDAGOGÍA EN FÍSICA Y MATEMÁTICA

Figura 20. Plan de estudios de la carrera de Pedagogía en Física y Matemática (PLEFM) de la USACH, se destaca la asignatura “Electromagnetismo” en el sexto semestre

Como resultado, en el plan de mejoramiento de la carrera nos propusimos aplicar una enseñanza basada en modelos (Schwarz et al., 2009) en este curso, con el objetivo de que

los futuros profesores puedan construir explicaciones sobre fenómenos (Zangori y Forbes, 2013). Estas explicaciones deben estar basadas en teorías e ideas aceptadas por la comunidad científica, permitiéndoles así interpretar fenómenos conocidos. En este sentido, la investigación nace por la necesidad de una comunidad de aprendizaje que pretende aportar a la construcción de conocimiento pertinente a su contexto.

#### 4.1.2 Participantes del estudio

Los participantes del estudio corresponden a n=67 estudiantes, de la asignatura de “Electromagnetismo”, impartida una vez al año. En la tabla 4 se presenta la distribución de los participantes por año y género.

<b>Género/Año</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>Total</b>
Mujeres	18	2	8	28
Hombres	15	15	9	39
Total	33	17	17	67

**Tabla 4** Participantes del estudio por año y género

Los estudiantes provienen de un segmento socioeconómico medio-bajo, la mayoría viven en comunas de la capital. Además, en este grupo, se encuentran cuatro estudiantes de regiones y un extranjero de habla hispana. Las edades de los participantes fluctúan entre los 20 y 27, a excepción de un estudiante de 40 años.



## **4.2 Secuencia de Enseñanza y Aprendizaje (SEA)**

Como parte del programa de mejoramiento de la asignatura de electromagnetismo, el docente a cargo creó una serie de Secuencias de Enseñanza y Aprendizaje (SEA) para mejorar la comprensión de los estudiantes. Para esta investigación, se seleccionó la primera de ellas, que corresponde a la enseñanza de la electrostática. A continuación, se describe en detalle la fundamentación de la secuencia implementada y el entorno de aprendizaje en que fueron recolectados los datos.

### **4.2.1 Enfoque de enseñanza de la SEA**

La SEA utilizada en esta investigación está compuesta por una serie de actividades orientadas a la enseñanza de la electrostática. Además de permitir la recolección de los datos, fue un insumo para la carrera de PLEFM ya que permitió dar cuenta de cómo mejorar y transformar la práctica educativa, aportar una mejor comprensión de dicha práctica y proponer de manera permanente una articulación entre la investigación y la acción (Latorre, 2007). La SEA fue diseñada el año 2015 en base a investigaciones previas sobre el aprendizaje de conceptos de electrostática, que se detallan en el apartado 3.2.3. (Guisasola, 2014; Guisasola et al., 2008a; Guisasola et al., 2008b; Furio y Guisasola, 1998a; Furio y Guisasola, 1998b; Guruswamy et al., 1997) y luego implementada en el curso de Electromagnetismo entre los años 2016-2018.

Además, se incluyó en esta secuencia una comunicación multimodal (Kress et al., 1998; Tang et al., 2011; Jaipal, 2010), debido a los buenos resultados que muestran los trabajos de Petridou et al. (2009) y Taramopoulo y Psillos (2017) en esta temática. En las diferentes representaciones consideramos distintos niveles de análisis: microscópico (Petridou et al., 2009), macroscópico (Chabay y Sherwood, 2006; Eylon y Ganiel, 1990) y combinaciones entre representaciones abstractas y del fenómeno real (Taramopoulos y Psillos, 2017).

La metodología empleada en la SEA es de tipo interactiva demostrativa (Sokoloff y Thornton, 2004) y contiene actividades relativas a la indagación basada en la modelización (Schwarz et al., 2009). La estructura de la secuencia estuvo inspirada en Garrido (2016) y siguió los pasos de: Predicción – Observación – Contraste – Formalización – Aplicación. Esta metodología ayuda a los estudiantes a razonar sobre múltiples fenómenos

electrostáticos basados en modelos (Duschl et al., 2011), promoviendo el desarrollo del lenguaje de los estudiantes y brindándoles apoyo cognitivo en el proceso de razonamiento (Hernández et al., 2015). Para esto se emplearon estrategias que combinan discusión entre pares, discusión mediada por el profesor (Mercer, 2010) y explicaciones del profesor.

#### 4.2.2 Contenidos de aprendizaje de la SEA

En términos de contenidos, la SEA comienza trabajando los métodos de electrización en contextos cotidianos, y otros que resultan cercanos para los estudiantes de pedagogía en física. En estas situaciones se involucra el tipo de material, dieléctrico y conductor, por lo que los estudiantes deben relacionar la transferencia de cargas o reordenamiento de cargas con el medio donde está ocurriendo. En este sentido, las actividades combinan los métodos de electrización en función de los tipos de materiales. Por ejemplo, para el caso de una transferencia de cargas podemos obtener dos resultados dependiendo del tipo de material:

1. Los dieléctricos son materiales que no permiten el libre movimiento de electrones a través de ellos, es decir, si una cantidad de carga entra en un extremo de un dieléctrico, esta carga queda confinada en el lugar donde llegó.
2. Los conductores por su parte son materiales que permiten el movimiento de electrones en su superficie. En estos materiales, si una cantidad de carga entra en un extremo, la carga será distribuida de manera homogénea por toda la superficie.

En la siguiente tabla se muestran los métodos de electrización en función del material que se utilice:

<b>Método / Material</b>	<b>Dieléctrico</b>	<b>Conductor</b>
Transferencia	Frotación	Contacto
Reordenamiento	Polarización	Inducción

**Tabla 5** Métodos de electrización en función del tipo de material

Con esta clasificación, buscamos caracterizar los procesos de electrización (frotación, contacto, polarización e inducción) para poder retroalimentar de manera más efectiva a los estudiantes en torno a su aprendizaje de los conceptos claves del modelo de distribución de cargas (M-DIC; que se han definido en el apartado 3.2.2.1) y así facilitar su comprensión.

Luego de trabajar con el modelo de distribución de cargas, la SEA propone nuevas situaciones para involucrar el modelo de Campo Eléctrico (M-CE). Se espera que los estudiantes usen las ideas del modelo DIC y que, de forma progresiva, pasen a usar el modelo CE. Para este modelo se elabora un conjunto de actividades inspiradas en el razonamiento científico histórico (la idea de región perturbada) para luego pasar a situaciones más complejas donde sea necesario reconocer su representación y su relación con la intensidad de campo eléctrico en un punto y fuerza eléctrica resultante. (ver apartado 3.2.2.3).

Por último, se problematiza con diferentes distribuciones de cargas y superficies equipotenciales para aplicar los modelos anteriores. Se busca que las respuestas sean el resultado de la articulación de las ideas de los modelos, para la obtención de explicaciones eficientes y simples a efectos complejos, como por ejemplo la jaula de Faraday.

A continuación, se presenta un resumen de la distribución de contenidos de la SEA, definidos a raíz de los modelos mencionados en el marco teórico y su intención didáctica para ayudar a la construcción del conocimiento de los estudiantes.

<b>Modelo</b>	<b>Explicaciones que involucran ideas de cada Modelo</b>	<b>En qué consiste la explicación</b>
Modelo de distribución e interacción entre cargas eléctricas (M-DIC)	Explicación de la carga por Frotación (Frot)	Se produce por la transferencia de electrones entre dos dieléctricos
	Explicación de la carga por Polarización (Pola)	Se produce por el reordenamiento del dipolo de un dieléctrico en función de una carga externa
	Explicación de la carga por Inducción (Ind)	Se produce un reordenamiento por todo el material conductor en función de una carga externa
	Explicación de la carga por Contacto (Contac)	Se produce por la transferencia de electrones de un cuerpo cargado a un conductor aislado
Modelo de Campo Eléctrico (M-CE)	Explicación sobre la naturaleza de la interacción entre cargas eléctricas (eCE)	El campo eléctrico es una perturbación del medio alrededor de una carga eléctrica o de una distribución de cargas.
	Explicación del significado de las Líneas	Las líneas representan la dirección de la fuerza sobre una carga de prueba en un punto del campo

	de Campo eléctrico (LCE)	eléctrico. Esta dirección es tangente a la línea.
	Explicación del significado de densidad de Líneas de campo eléctrico (DLCE)	La densidad de líneas tiene relación directa con la intensidad del campo eléctrico en un lugar de este.
Modelo híbrido de distribución de carga y campo eléctrico (DIC+CE)	Explicación del efecto de la Jaula de Faraday (Jaula)	Se produce por el reordenamiento de cargas de una jaula de metal debido a un campo eléctrico externo, hasta obtener en su interior un campo eléctrico igual de intenso, pero de sentido contrario al externo.
	Explicación del efecto punta (Punta)	Se produce por la concentración de cargas en una parte del conductor (puntas o radios pequeños), lo que conlleva a un cambio en la intensidad de campo eléctrico en su periferia.

**Tabla 6** Definición de los componentes de cada modelo usados en el estudio

### 4.2.3 Estructura y objetivos de la secuencia

La secuencia contempla cuatro sesiones de tres horas cada una. Las sesiones han sido pensadas para que los estudiantes puedan construir en conjunto y con la participación del profesor las ideas de cada modelo, tal como se ha definido en los apartados anteriores. Los objetivos de cada sesión son los siguientes:

Sesión	Objetivos
1 Frotación, Polarización y Contacto	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Explicar los métodos de electrización de objetos por frotación, polarización y por contacto, considerando el tipo y cantidad de carga eléctrica que adquieren.</li> <li>b. Diferenciar entre objetos dieléctricos y conductores, basándose en el movimiento de cargas y la distribución de éstas en cada material.</li> <li>c. Aplicar la expresión de la Ley de Coulomb para resolver situaciones de forma cualitativa.</li> </ul>
2 Electroscopio	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Explicar los métodos de electrización por inducción y contacto de objetos, considerando las características que deben poseer y el tipo y cantidad de carga que adquieren.</li> <li>b. Aplicar sus conocimientos sobre la carga por inducción y contacto sobre materiales conductores en diferentes situaciones.</li> </ul>
3 Campo Eléctrico y su	<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Reconocer la relevancia del concepto de campo eléctrico en el conocimiento científico.</li> <li>b. Explicar el comportamiento de las cargas de objetos dieléctricos por la influencia de</li> </ul>

representación	<p>un campo eléctrico externo.</p> <p>c. Explicar el comportamiento de las cargas de objetos conductores por la influencia de un campo eléctrico externo, como por ejemplo el efecto de la jaula de Faraday.</p> <p>d. Identificar que las líneas de campo eléctrico son una manera de representar un campo eléctrico y que cumplen con las características de una función vectorial.</p> <p>e. Aplicar el conocimiento de las líneas de campo eléctrico para resolver situaciones cualitativas.</p>
4 Distribución uniforme de cargas sobre un conductor	<p>a. Reconocer que, sobre la superficie de un objeto conductor cargado en exceso, se manifiesta un potencial eléctrico constante.</p> <p>b. Relacionar la densidad de líneas de campo eléctrico con la intensidad de campo eléctrico en un punto de la región perturbada.</p> <p>c. Explicar la variación de la intensidad de campo eléctrico en un punto debido a la densidad superficial de cargas</p>

**Tabla 7** Objetivos de aprendizaje para cada sesión de la secuencia

#### **4.2.3.1 Sesión N° 1 “Frotación, Polarización y Contacto”**

El docente inicia la clase activando los conocimientos previos de los estudiantes en torno al tema a tratar. Para ello les pide ejemplos de situaciones donde la electrostática sea protagonista. Luego pregunta, ¿cómo es posible que al frotar un peine se pueda atraer pequeños papeles? (actividad 1). Asigna unos 10 minutos para que los estudiantes puedan dibujar la distribución de cargas y redactar una explicación coherente con el modelo científico. Se les informa a los estudiantes que al final de la sesión podremos conocer cuál es la respuesta más adecuada.

Se proyectan imágenes de una atracción y una repulsión entre diferentes objetos. En esta etapa se discute sobre la regla triboeléctrica, definición de carga neta, cuerpo cargado positivo y negativo y cuerpo neutro.



**Figura 21** Imagen de la actividad 1

A continuación, el docente propone una nueva actividad (actividad 2). Invita a los estudiantes a que realicen una predicción sobre la distribución de cargas de un sistema compuesto por una esfera en contacto en un extremo con una barra metálica aislada, cuando un objeto cargado toca el otro extremo de la barra. Posteriormente, se pregunta por el mismo montaje, pero en vez de una barra metálica se deja una barra de plástico. Tras unos minutos, los estudiantes exponen sus predicciones al resto del curso y las ideas en las que estas se basan. Luego, el profesor realiza el experimento y proyecta imágenes que ayudan a visualizar la experiencia paso a paso. En este contexto el profesor discute con la clase para dar explicación al fenómeno, por medio de la distinción entre material conductor y dieléctrico. Posteriormente, asigna unos minutos para que los estudiantes puedan dibujar y redactar una explicación mejorada (actividad 3).



**Figura 22** Imagen de la actividad 2-3



**Figura 23** Imagen del montaje de la actividad 2-3 reproducida por un estudiante

El profesor en esta etapa formaliza los conceptos de carga por frotación y carga por contacto, además de diferenciar qué pasa en estos mecanismos de carga en los dos tipos de materiales: conductores y dieléctricos.

La siguiente actividad (actividad 4) que propone el profesor consiste en explicar cómo un globo puede adherirse a una pared tras ser frotado. Tras la primera explicación de los estudiantes, el profesor realiza una puesta en común y explica el fenómeno, por medio de la reorientación de los dipolos en un material dieléctrico y su efecto sobre la fuerza eléctrica resultante.



**Figura 24** Imagen de globos adheridos a una pared luego de ser frotados



Figura 25 Imagen del dossier de los estudiantes en la actividad 4

Finalmente, el profesor formaliza la carga por polarización y define la Ley de Coulomb. Para dar cierre a la sesión les propone a los estudiantes que expliquen cómo es la distribución de cargas para que un peine de plástico cargado por frotación pueda atraer pequeños papeles (actividad 5).

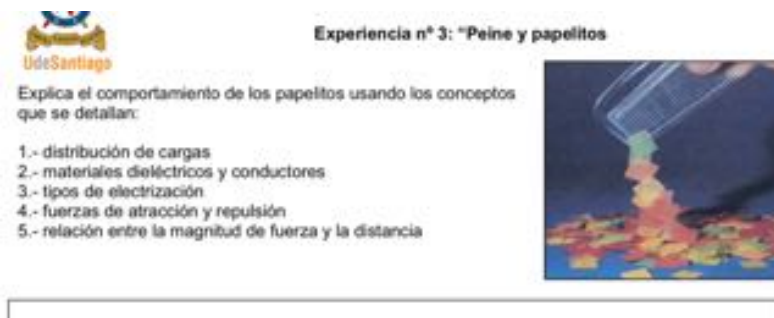


Figura 26 Imagen del dossier de los estudiantes en la actividad 5

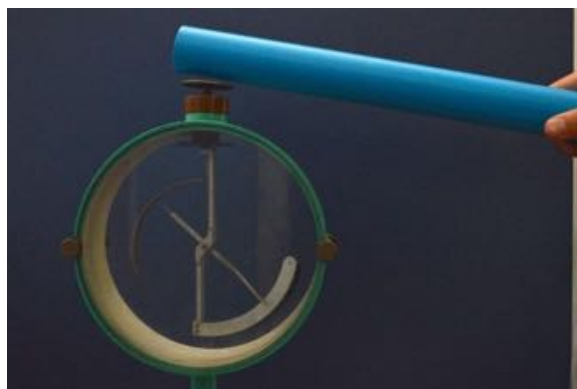
#### 4.2.3.2 Sesión N° 2 “Electroscopio”

El profesor inicia la clase recordando lo trabajado en la clase anterior y pregunta a los estudiantes si es posible cargar un material conductor sostenido con la mano al frotarlo contra el cabello. Tras esta pregunta sintetizan los conceptos trabajados, dando el pie para el desarrollo de la nueva sesión.

El docente propone a los estudiantes que dibujen la distribución de cargas sobre un electroscopio cuando se le acerca un cuerpo cargado. Además, se les pide explicar paso a paso, es decir, cuando el objeto cargado está lejos, cerca y muy cerca (actividad 6). Tras unos minutos el profesor guía la discusión entre pares y realiza la experiencia. Los



estudiantes tienen un lapsus de tiempo para mejorar sus respuestas (actividad 7). Luego, el profesor explica el fenómeno apoyado con imágenes que ilustran la distribución de cargas sobre un conductor inducido. Nuevamente se les pide a los estudiantes que mejoren sus explicaciones (actividad 8).



**Figura 27** Imágenes de las actividades 6-7-8



**Figura 28** Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 6-7

A continuación, el profesor formaliza la carga por inducción sobre un conductor neutro aislado.

De la misma manera, el profesor solicita a los estudiantes que dibujen y expliquen la carga por contacto sobre un electroscopio (actividad 9). Tras unos minutos, el profesor lidera la discusión sobre las ideas expuestas, realiza la experiencia y les da un tiempo para mejorar sus respuestas (actividad 10). Luego, el profesor proyecta imágenes donde se muestra la distribución de cargas adecuada para un conductor cargado y explica la situación. El docente les propone complementar o mejorar por última vez sus respuestas, en base a la discusión y experimentación anterior (actividad 11).



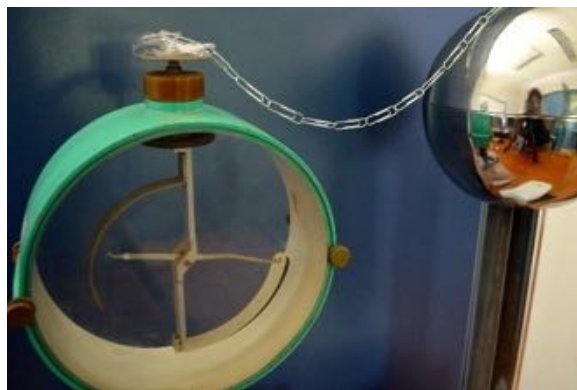
**Figura 29** Imágenes de las actividades 9-10-11



**Figura 30** Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 9-10

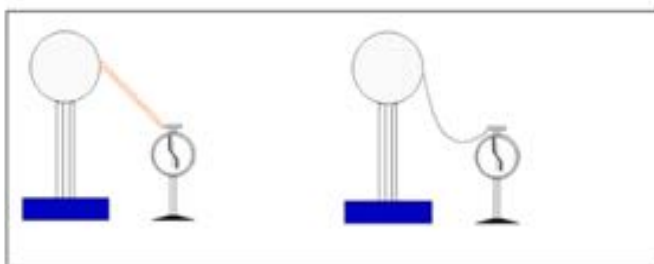
En esta etapa, el profesor realiza un resumen de las ideas trabajadas y expone ejemplos de cómo cargar el electroscopio usando inducción y contacto, haciendo énfasis en sus diferencias en base a los procesos de reordenamiento y de transferencia de cargas.

La actividad final que propone el profesor contempla que los estudiantes expliquen cómo es la distribución de cargas en dos sistemas. El primer sistema es un generador Van de Graaff unido con una cadena metálica a un electroscopio y el segundo difiere con el primero, en que cambia la cadena metálica por un hilo (actividad 12). Tras las primeras explicaciones el profesor guía la discusión y realiza la experiencia. Finalmente, el profesor propone a los estudiantes que mejoren sus explicaciones en función de la discusión realizada (actividad 13).



**Figura 31** Imágenes de las actividades 12-13

Experiencia n° 5: "Generador Van de Graaff conectado a un electroscopio"



Un generador VDG se conecta con una cadena a un electroscopio y luego a se conecta con un hilo. ¿Qué esperas que suceda al momento de encender el generador en cada caso?

**Figura 32** Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 12-13

#### 4.2.3.3 Sesión N° 3 “Campo Eléctrico y su representación”

El profesor inicia la sesión haciendo una síntesis del modelo de distribución e interacción de cargas. Se aprovecha el momento para responder dudas de los estudiantes sobre las clases pasadas.

El docente dispone de un generador Van de Graaff y un péndulo con una pelota de plumavit (poliestireno). Con este montaje, el profesor solicita a los estudiantes que expliquen el movimiento de la pelota cuando se acerca al generador y que apoyen sus justificaciones en el cambio de propiedades del medio debido a la presencia del Van der Graff (actividad 14).



**Figura 33** Imágenes de las actividades 14-15


 Universidad de Chile  
 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
 Departamento de Física

**Electrodinámica clase NP 2**

Nombre: \_\_\_\_\_

¿Cómo creen que se ve la influencia del VGG en su entorno?  
 - Se carga un VGG.  
 - En sus alrededores podemos sentir o comprobar una pequeña patada de plumavit.

Detalle la predicción para cada punto experimentado.

Preguntas	Predicción	Después de ver...
¿Para qué situación y sentido se mueve?	A: B: C: D:	A: B: C: D:
Prueba más cerca y más lejos, ¿cómo es el movimiento de la patada?		
Si carga el VGG más lentamente y grandes movimientos sin los mismos signos, ¿cómo es el movimiento de la patada?		

**Figura 34** Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 14-15

Luego, el profesor realiza la experiencia y lidera la discusión sobre cómo ocurre el fenómeno. Se dejan unos minutos para que los estudiantes puedan mejorar sus explicaciones tras la discusión y observación de la experiencia (actividad 15).



**Figura 35** Pelota de plumavit polarizada y atraída por un generador Van de Graaff encendido

En esta sección el docente expone la relevancia científica del concepto de campo, y en particular la de campo eléctrico, apoyándose en relatos históricos y en aplicaciones. Además, muestra la formulación matemática de campo eléctrico para distribuciones

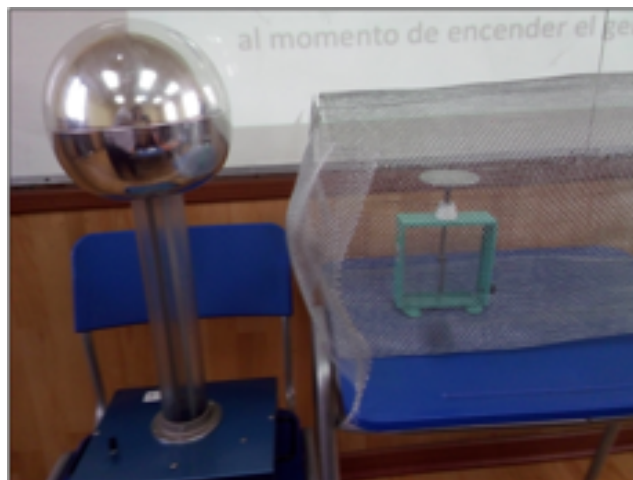
discretas de cargas, señalando cómo varía la intensidad de campo eléctrico en un punto de la región perturbada debido a la distancia y a la carga generadora del campo eléctrico.

A continuación, el profesor expone ante los estudiantes un generador Van de Graaff encendido y un electroscopio en sus cercanías.

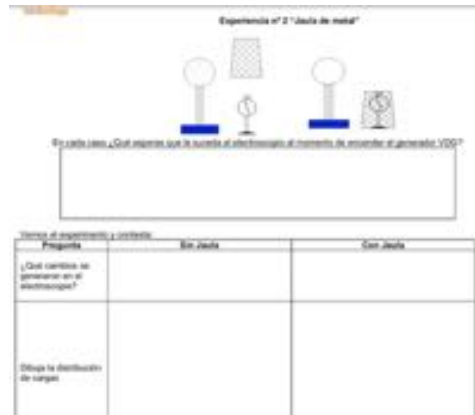


**Figura 36** Electroscopio inducido por un generador Van de Graaff encendido

Luego, el profesor apaga el generador, descarga el electroscopio y lo tapa con una jaula metálica. En este instante el docente les pregunta a los estudiantes qué sucederá con el electroscopio dentro de la jaula cuando vuelva a encender el generador (actividad 16). Después de que los estudiantes responden, el profesor realiza la experiencia y los estudiantes registran lo observado. En este momento los estudiantes escriben una respuesta mejorada (actividad 17). El docente contrasta las ideas de los estudiantes usando la experimentación para construir el concepto de “equilibrio electrostático” y les propone que vuelvan a responder por última vez (actividad 18).



**Figura 37** Imágenes de las actividades 16-17-18



**Figura 38** Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 16-17

El profesor muestra a los estudiantes una imagen donde se aprecia cómo se alinean unos pequeños hilos en aceite debido a un electrodo circular cargado. Les propone que expliquen la situación usando los conocimientos de campo eléctrico (actividad 19). Tras responder, el docente invita a la discusión para contrastar las ideas de la clase con las del modelo de científico. Luego, les da un tiempo para mejorar sus respuestas (actividad 20).



**Figura 39** Imagen del dossier de los estudiantes en las actividades 19-20

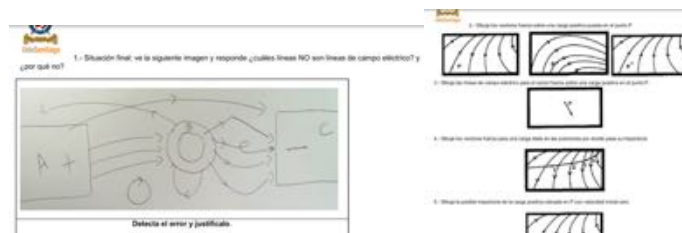
En esta etapa el profesor define las líneas de campo eléctrico o líneas de fuerza y cómo es su representación. El docente les solicita que realicen un diagrama de fuerzas sobre una carga en diferentes puntos de un campo eléctrico para trazar una línea de campo eléctrico (actividad 21).



**Figura 40** Fotografía de un estudiante participando en la actividad 21

El docente realiza una síntesis de los conocimientos trabajados durante esta sesión: campo eléctrico, líneas de campo eléctrico, intensidad de campo eléctrico y equilibrio electrostático.

Finalmente, se les solicita a los estudiantes que identifiquen a) qué líneas de campo eléctrico no corresponden en un esquema que representa un campo eléctrico formado por dos conductores cargados y un cuerpo neutro (actividad 22) y b) vectores fuerza y de intensidad de campo eléctrico en diferentes representaciones (actividad 23).



**Figura 41** Imágenes del dossier de los estudiantes en las actividades 22-23

#### 4.2.3.4 Sesión N° 4 “Distribución uniforme de cargas sobre un conductor”

El docente inicia la clase recordando a los estudiantes las ideas de campo eléctrico y su representación a través de líneas de campo eléctrico. Se realiza una experimentación para averiguar si podemos encender un tubo fluorescente tocando la superficie de un conductor cargado, es decir, si existe diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie de un conductor cargado. Para esto se prueba con dos conductores cargados, uno esférico y uno asimétrico. Luego de la experimentación, se discute que, sobre la superficie de un conductor, no se presenta una diferencia de potencial, concluyendo que se obtiene una

superficie equipotencial. Ahora el profesor muestra un nuevo montaje, que involucra el conductor asimétrico cargado y un péndulo con una pelota de plumavit (poliestireno). Se les indica a los estudiantes que dibujen cómo es la distribución de cargas en la superficie del conductor asimétrico y que señalen por cuál lado del conductor, si el de menor o mayor radio, la pelota es inducida con mayor intensidad (actividad 24).



Figura 42 Imagen de la actividad 24

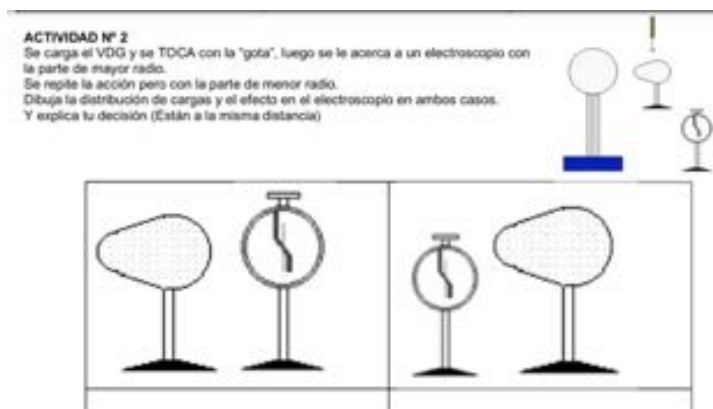


Figura 43 Imagen del dossier de los estudiantes en la actividad 24

El profesor señala que más tarde averiguarán la respuesta, pero los invita a realizar la experiencia. Los estudiantes registran sus observaciones. A continuación, el docente les muestra una representación de una superposición de campos eléctricos que se produce debido a diferentes electrodos: planos y asimétricos, mediante un montaje de hilos flotando en aceite en una cubeta. Los estudiantes deben señalar en qué zonas de la región perturbada es posible registrar una mayor intensidad de campo eléctrico (actividad 25). Luego de unos minutos, el profesor guía la discusión para determinar con claridad cuáles son las zonas de alta densidad de líneas de campo eléctrico, las que son en definitiva los sectores de mayor intensidad de campo eléctrico. Además, el profesor usando una distribución discreta de



cargas, les explica que la representación de líneas de campo eléctrico permite saber la razón entre las cargas involucradas, no así la cantidad exacta en coulomb de cada carga.

Tras la discusión, el profesor indica a los estudiantes que pueden mejorar sus respuestas (actividad 26)

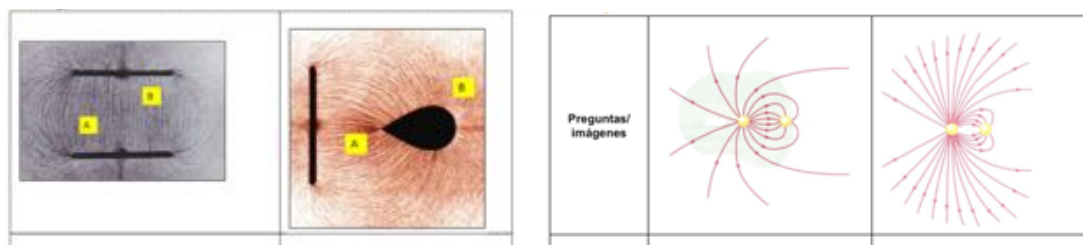


Figura 44 Imágenes del dossier de los estudiantes en la actividad 25-26

En esta última etapa el docente resume las ideas que se han trabajado durante la sesión y las registra en el pizarrón. Con estas nociones en mente el profesor utiliza el concepto de densidad de carga y flujo para llegar a la ley de Gauss y luego determina las fórmulas ya conocidas, como por ejemplo la intensidad de campo eléctrico para una carga puntual.

En este contexto, los estudiantes preguntan los pasos del problema y registran los desarrollos realizados por el profesor. Con las ideas de ley de Gauss y la superficie equipotencial sobre un conductor cargado, se les pide a los estudiantes que realicen un reemplazo algebraico y que interpreten la expresión resultante. Los estudiantes señalan que si una superficie tiene menor radio debería existir una distribución superficial de carga mayor que en la de mayor radio, por lo que en su vecindad se obtiene una región de mayor intensidad de campo eléctrico. Dicho este consenso, el profesor les pide que respondan a la actividad inicial (actividad 27).

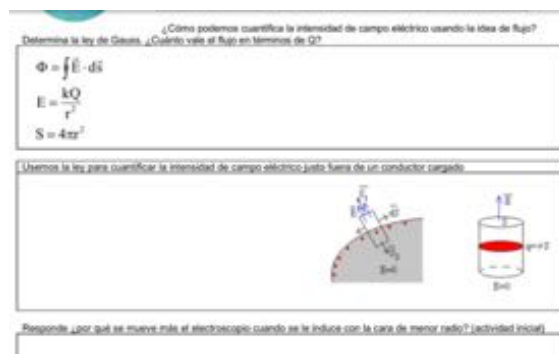


Figura 45 Imagen del dossier de los estudiantes en la actividad 27

## **4.3 Recogida y análisis de datos**

En el siguiente apartado, se presentan los fundamentos teóricos que sustentan la metodología de esta investigación, así como la técnica de recolección de datos utilizada y el plan de análisis de estos.

### **4.3.1 Fundamentos metodológicos de la investigación**

Esta investigación se enmarca en el paradigma de investigación interpretativo ya que se enfoca en interpretar los significados particulares que cada estudiante le asigna a su experiencia en el aula. Desde este paradigma, el conocimiento se construye en base al contexto, cultura y experiencias personales (Lederman y Abell, 2014). El rol de los investigadores en este enfoque es crear conocimiento compartido por medio de diálogos hermenéuticos, por lo tanto, la realidad no se considera como algo que tenga un significado establecido de antemano (Schwandt, 2000). En el paradigma interpretativo, no hay una verdad absoluta, sino múltiples posibles significados que surgen de la interacción en contextos particulares.

Para poder capturar las vivencias de los sujetos en un ambiente específico, en este enfoque se tiende a optar por diseños de carácter cualitativo, como es el caso de esta investigación. Las investigaciones cualitativas se enfocan en “el entendimiento del significado de las acciones de seres vivos, sobre todo de los humanos y sus instituciones” (Hernández et al., 2014, p.9.). Para ello, se observan las situaciones en su contexto natural, sin manipulación de las acciones y reacciones de las personas. Los mismos autores explican que el diseño cualitativo es pertinente “cuando el propósito es examinar la forma en que los individuos perciben y experimentan los fenómenos que los rodean, profundizando en sus puntos de vista, interpretaciones y significados” (p. 358).

El investigador principal de este estudio es además el docente a cargo del curso en que se implementó este trabajo, por lo tanto, esta investigación se enmarca en la metodología de Investigación-Acción educativa (Elliot, 1993; Schön, 1992). En esta línea, el investigador identifica debilidades en su propia práctica pedagógica, elabora un diagnóstico y recolecta datos con el fin de mejorar sus acciones educativas y de comprender los procesos que se articulan en torno a ellas (Colmenares, 2012). Esta investigación se centra en cómo los

estudiantes dan explicaciones a diferentes situaciones problema, reportándolas desde su lenguaje, con el propósito de profundizar la comprensión del profesor e investigador del problema, que en este caso son la misma persona.

Para asegurar la confiabilidad de los resultados y conclusiones de esta investigación, se han seguido los criterios de calidad propuestos por Tracy (2010) para la investigación cualitativa. Estos son:

- La selección de un tema relevante: Como ya se explicó en el planteamiento del problema, el tema seleccionado es relevante tanto para el programa de estudios donde se implementó la investigación como para el sistema educacional del país.
- Rigurosidad: Los constructos teóricos, datos, permanencia en el campo, participantes, contexto, recolección y análisis de los datos son suficientes, abundantes, apropiados y complejos.
- Sinceridad: Se transparentan los sesgos del investigador, los métodos utilizados y las limitaciones y desafíos encontrados.
- Credibilidad: Para asegurarlo, se presentan descripciones densas de los datos, citas y fotografías de algunas respuestas como ejemplo. Además, se triangulan los datos con la teoría existente así como con los dos directores de tesis que han participado en el proceso.
- Resonancia: La representación visual de los resultados es estéticamente atractiva y clara.
- Contribuciones significativas: Los resultados de esta investigación aportan información que es relevante para la teoría y la práctica.
- Ética: Los participantes de esta investigación fueron informados en detalle de cómo serían utilizadas sus respuestas. La participación fue voluntaria y los participantes fueron notificados de la posibilidad de retirarse de ella en cualquier momento. Las respuestas se presentan de manera anónima y se contó con los consentimientos informados de todos los participantes.

- Coherencia del estudio: La investigación cumple los objetivos que se propone y para ello utiliza procedimientos coherentes. La literatura se vincula de manera lógica con datos y permite obtener resultados y conclusiones que respondan las preguntas de investigación.

### 4.3.2 Técnica y estrategias de recogida de datos

Los datos de esta investigación fueron recolectados mediante la técnica de revisión documental, siendo los documentos revisados las respuestas a las guías trabajadas en clase con los estudiantes. Estas respuestas corresponden a distintas actividades de la Secuencia de Enseñanza y Aprendizaje (SEA) que incluyen texto y dibujo, como hemos presentado en el apartado anterior.

Para poder citar claramente cada producción escrita se asignaron códigos, tanto para el estudiante como para la actividad. Los estudiantes fueron codificados como E1, E2, E3, etc., mientras que las actividades fueron codificadas como A1, A2, A3, etc.

Cada uno de los 67 estudiantes que participaron de la secuencia contó con una guía de trabajo para cada sesión de la SEA.

A continuación, la tabla 8 señala los momentos de la SEA donde se recolectaron los datos analizados.

Sesiones	Actividades donde se recogieron los datos	Tipo de explicación
Sesión 1: 3 horas Frotación, Polarización y Contacto	1. Interacción a distancia entre las cargas de un tubo (cargado por frotación) y pequeños pedazos de papel (primera explicación)	Frotación/ Polarización
	2. Interacción por contacto entre las cargas de un tubo, una pelota de metal y una barra de metal (primera explicación)	Contacto
	3. Interacción por contacto entre las cargas de un tubo, una pelota de metal y una barra de metal (explicación mejorada)	Contacto
	4. Interacción a distancia entre un globo de látex (cargado por frotación) y la pared de yeso (primera explicación)	Frotación/ Polarización
	5. Interacción a distancia entre las cargas de un tubo (cargado por frotación) y pequeños pedazos de papel (explicación mejorada)	Frotación/ Polarización
Sesión 2: 3 horas Electroscopio	6. Interacción a distancia entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio (primera explicación)	Inducción
	7. Interacción a distancia entre un tubo de PVC cargado y un	Inducción

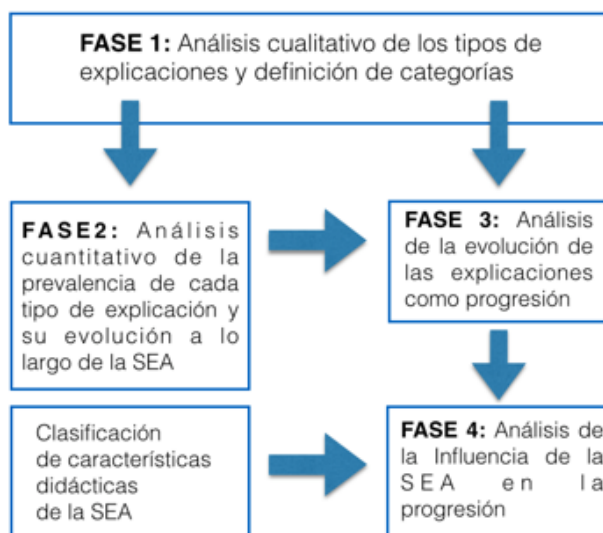
	electroscopio (explicación mejorada)	
	8. Interacción a distancia entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio (explicación mejorada por segunda vez)	Inducción
	9. Interacción por contacto entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio (primera explicación)	Contacto
	10. Interacción por contacto entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio (explicación mejorada)	Contacto
	11. Interacción por contacto entre un tubo de resina cargado y un electroscopio (explicación mejorada por segunda vez)	Contacto
	12. Interacción entre un generador VDG, dos cables (un dieléctrico y un conductor) y un electroscopio (primera explicación)	Inducción/ Contacto
	13. Interacción entre un generador VDG, dos cables (un dieléctrico y un conductor) y un electroscopio (explicación mejorada)	Inducción/ Contacto
Sesión 3: 3 horas Campo Eléctrico y su representación	14. Interacción a distancia entre un generador VDG y una pelota de poliestireno (plumavit) (primera explicación)	Polarización/ Campo eléctrico
	15. Interacción a distancia entre un generador VDG y una pelota de poliestireno (plumavit) (explicación mejorada)	Polarización/ Campo eléctrico
	16. Interacción a distancia entre un generador VDG, un electroscopio y una jaula de Faraday (primera explicación)	Inducción/ Jaula-Faraday
	17. Interacción a distancia entre un generador VDG, un electroscopio y una jaula de Faraday (explicación mejorada)	Inducción/ Jaula-Faraday
	18. Interacción a distancia entre un generador VDG, un electroscopio y una jaula de Faraday (explicación mejorada por segunda vez)	Jaula-Faraday
	19. Interacción a distancia entre un electrodo en una cubeta y pequeños pedazos de hilo flotando en aceite (primera explicación)	Polarización/ Campo eléctrico
	20. Interacción a distancia entre un electrodo en una cubeta y pequeños pedazos de hilo flotando en aceite (explicación mejorada)	Polarización/ Campo eléctrico
	21. Interacción a distancia simulada entre dos cargas de distinto signo (primera explicación)	Líneas de campo eléctrico
	22. Interacción a distancia simulada entre tres cuerpos, dos cargados de distinto signo y uno neutro (explicación mejorada)	Líneas de campo eléctrico
	23. Interacción a distancia simulada sobre una carga de prueba	Líneas de campo

	sobre diferentes configuraciones de campo eléctrico (explicación mejorada por segunda vez)	eléctrico
Sesión 4: 3 horas Distribución uniforme de cargas sobre un conductor	24. Interacción por contacto entre un VDG y un Conductor Asimétrico (primera explicación)	Efecto-Punta
	25. Interacción a distancia simulada entre dos electrodos de diferente geometría en una cubeta con pequeños hilos flotando (primera explicación)	Densidad-Líneas
	26. Interacción a distancia simulada entre dos cargas puntuales donde se ilustran las líneas de campo eléctrico (explicación mejorada)	Densidad-Líneas
	27. Interacción por contacto entre un VDG y un Conductor Asimétrico (explicación mejorada)	Efecto-Punta

**Tabla 8** Actividades donde se recogieron los datos

### 4.3.3 Estrategias de análisis de datos

Se recolectaron 1809 respuestas en total, correspondientes a los 27 tipos de respuestas (texto y dibujo) de cada uno de los 67 estudiantes que participaron en la investigación. Los datos fueron triangulados de manera temporal, al recoger los datos en tres años distintos, y personal, al recolectar información de distintos sujetos (Aguilar y Barroso, 2015). Estas respuestas fueron recolectadas en los momentos señalados en la tabla 8. Todas las guías de trabajo (268, 4 por estudiante) fueron digitalizadas para poder ejecutar el análisis. El análisis de las respuestas se llevó a cabo siguiendo la estructura de cuatro fases que grafica la figura 46 a continuación.



**Figura 46** Fases del análisis de los datos

### 4.3.3.1 Fase 1

La fase 1 corresponde al análisis cualitativo de los tipos de explicaciones y la posterior definición de las categorías inductivas. En esta fase, el primer paso fue digitalizar cada uno de los dossiers de los estudiantes e ingresarlos al software Atlas.ti. Los documentos fueron organizados por año de implementación y sesión de la SEA. En la figura 47 se puede observar a la izquierda una lista de carpetas, donde el nombre de cada una corresponde al año y a la sesión implementada. Por ejemplo, la primera carpeta se llama 2016\_S1 y corresponde a la primera sesión del año 2016.

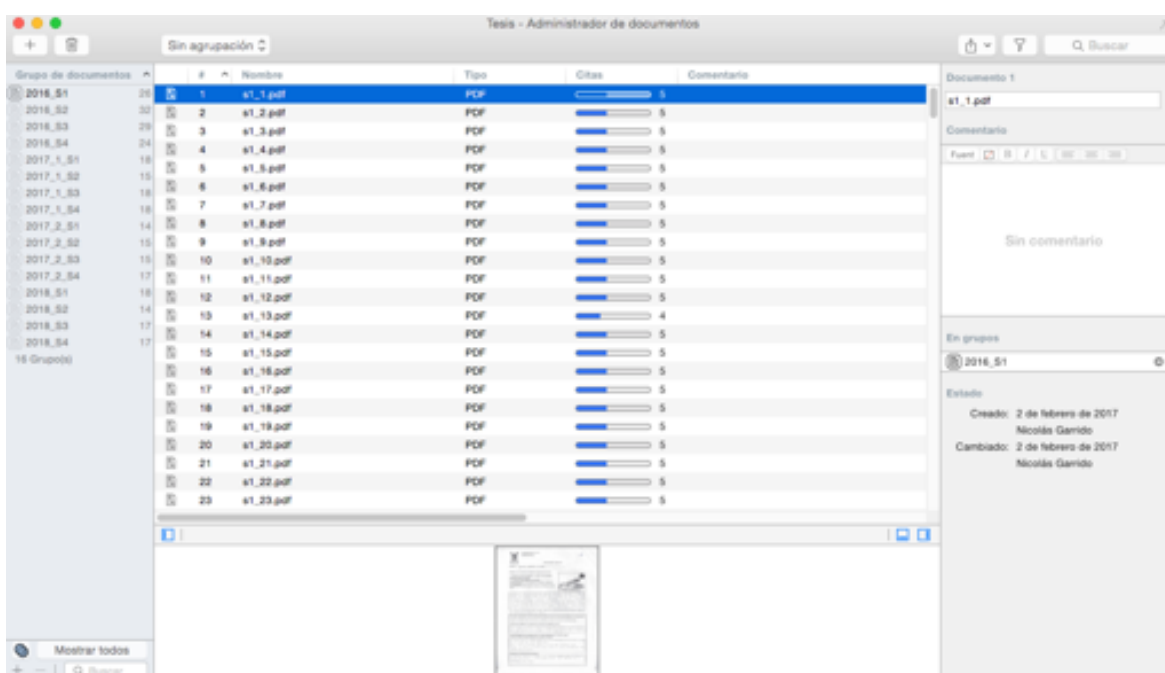


Figura 47 Listado de dossiers digitalizados en Atlas.ti

El siguiente paso consistió en leer las respuestas reiteradas veces para tener una noción del tipo de respuesta que generaron los estudiantes y, de esta manera, poder decidir la forma más apropiada para abordar el análisis.

Luego, mediante la función “cita” del mismo software, se identificaron todas las respuestas de los estudiantes que serían analizadas. Cada una de ellas fue vinculada con una etiqueta según el momento de la SEA al que correspondían. Estas etiquetas fueron: predicción, primera explicación, segunda explicación, tercera explicación o aplicación. En la figura 48 se observa un listado de citas, donde cada una tiene una etiqueta asociada (predicción, explicación, etc.) para su posterior codificación. Esta función facilitó la navegación por los

documentos al permitir acceder a todas las citas que tuvieran una misma etiqueta de manera simple. Por ejemplo, al buscar predicción, el programa muestra la lista de todas las citas asociadas a esa etiqueta que se presentan a lo largo de la SEA.

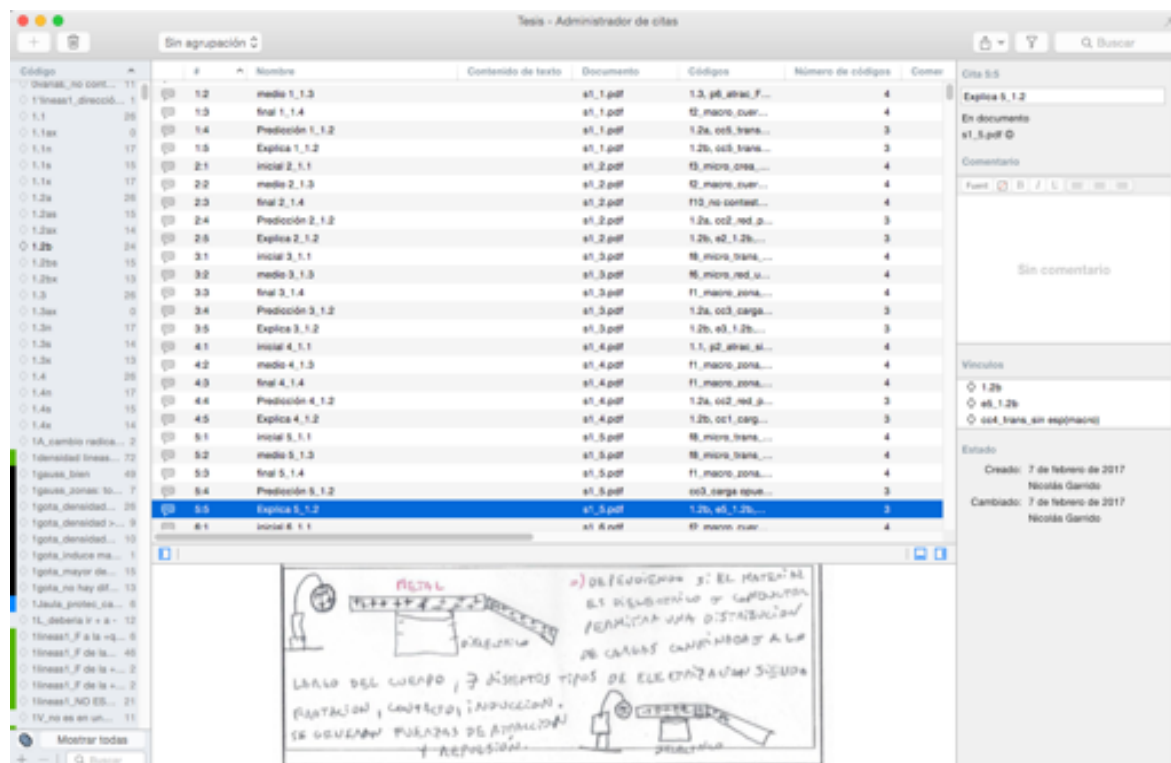


Figura 48 Lista de citas que corresponden a las respuestas a analizar

Luego, se realizó un análisis de contenidos emergentes y una codificación abierta de las 1809 respuestas recolectadas. En el primer análisis, a cada explicación se le asociaron tres códigos: el primero para identificar la actividad y la pregunta a la que correspondía utilizando números, el segundo que relacionaba al estudiante con la actividad, utilizando nombres y números y la última que refiere a la interpretación del contenido de la cita. Para este último código se registraban las ideas clave identificadas en la respuesta. La figura 49 ilustra un ejemplo de una cita con sus tres códigos asociados.



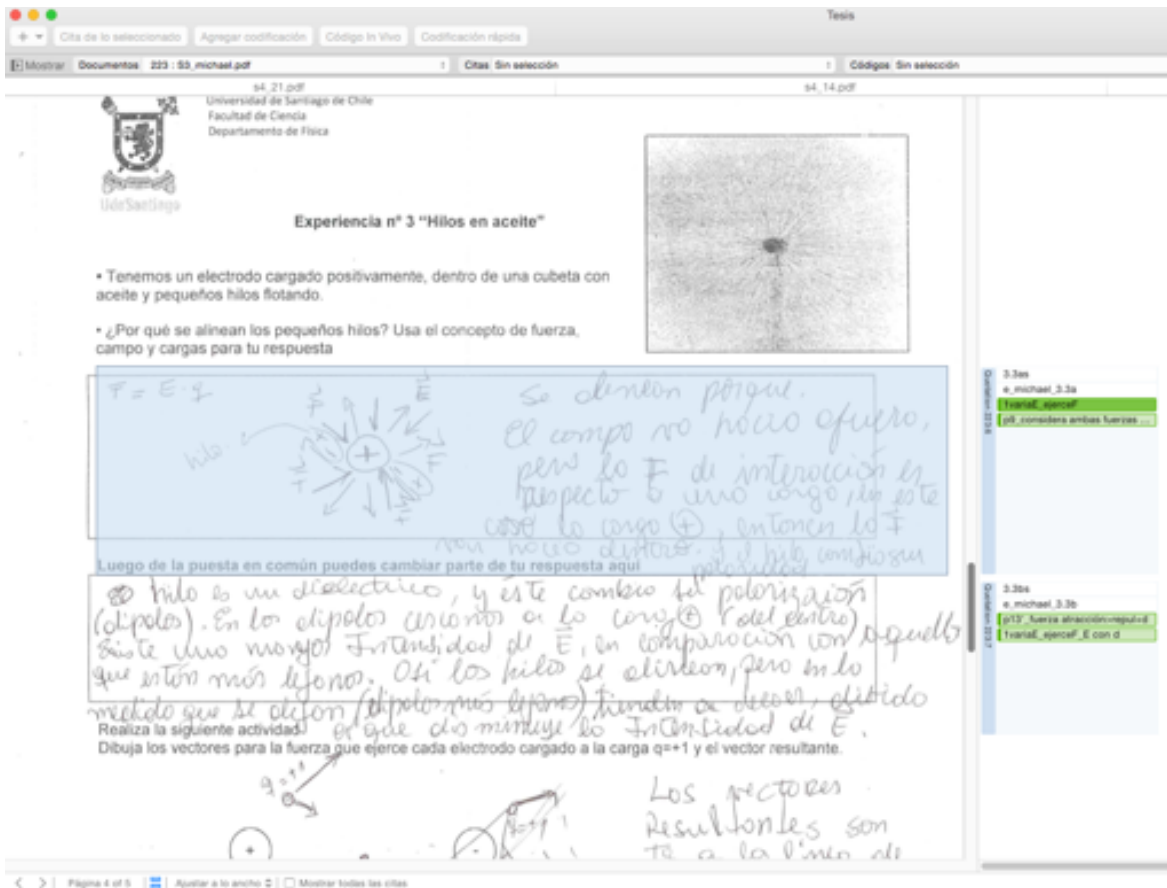


Figura 49 Codificación inductiva

A continuación, se agruparon los códigos que registraban las ideas clave de cada respuesta en las categorías definitivas que se presentan en este trabajo para los tipos de explicación (frotación, polarización, etc.). El criterio para agrupar los códigos fue el grado de elaboración de cada respuesta, considerando la relación entre las ideas del modelo que se demuestran en ella. Por ejemplo, en el caso del modelo de distribución e interacción de cargas para el tipo de explicación de la frotación, las respuestas que incluían la transferencia de electrones, y las características del material dieléctrico, fueron consideradas de alto nivel explicativo. Por el contrario, una respuesta que dijera “se frota y se carga” fue considerada una descripción.

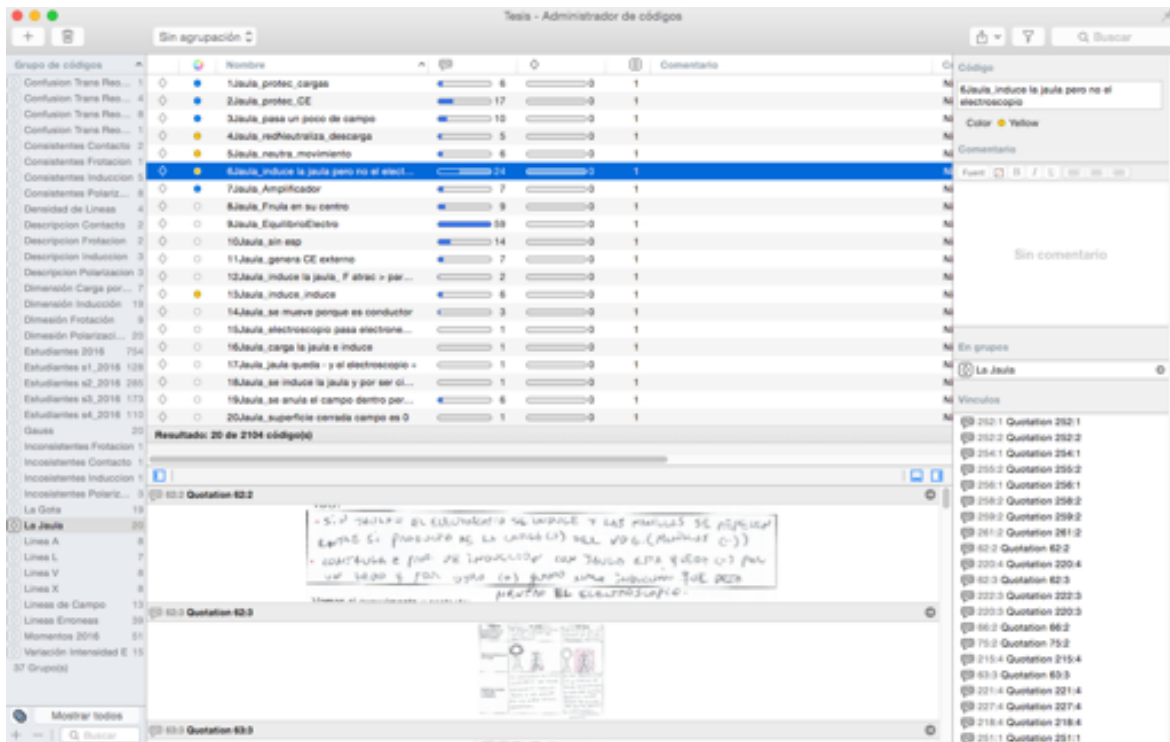
Así, la tabla 9 resume los criterios de agrupación de los códigos para cada uno de los modelos electrostáticos trabajados en la SEA, con el fin de elaborar las categorías definitivas que se presentarán en el capítulo de resultados (5.1).

Modelo	Foco de Análisis	Ejemplo del análisis realizado
Modelo de distribución e interacción entre cargas eléctricas (M-DIC)	<b>Transferencia y reordenamiento de cargas:</b> Cómo los estudiantes explican la electrización de materiales dieléctricos y conductores con los diferentes métodos (electrización por fricción, conducción, polarización e inducción).	Algunos estudiantes mezclan las explicaciones en base a transferencia de cargas (fricción y conducción) con las explicaciones en base al reordenamiento de cargas (polarización e inducción). También surgen algunas ideas alternativas, como la idea de que la atracción de un objeto se debe a una propiedad intrínseca de un cuerpo cargado.
Modelo de Campo Eléctrico (M-CE)	<b>Quien ejerce la fuerza y cómo se representa:</b> Cómo los estudiantes explican la naturaleza del campo eléctrico y su representación (líneas eléctricas y densidad de líneas).	Algunos estudiantes confunden la idea de líneas de campo y la trayectoria de partículas en un campo eléctrico.
Modelo híbrido de distribución de carga y campo eléctrico (DIC+CE)	<b>Rol de los materiales y la relación entre ce - distribución de carga eléctrica:</b> Cómo los estudiantes explican la distribución de cargas eléctricas para obtener un campo eléctrico (Ley de Gauss).	Algunos estudiantes enfocan sus explicaciones en la naturaleza de los materiales (por ejemplo, la jaula de Faraday) en lugar de razonar en términos de distribución de carga.

**Tabla 9** Criterio para la elaboración de categorías a partir de los códigos

Este proceso no fue lineal, por el contrario, en múltiples ocasiones fue necesario volver a revisar los datos y la teoría, característica esencial de la investigación cualitativa que proporciona mayor capacidad de colapsar categorías y con ello obtener significados que ayuden a responder las preguntas de investigación. Esta fase del análisis siguió la lógica planteada en la etapa de reducción de datos de Rodríguez et al. (1996).

En la figura 50, se observa el ambiente de trabajo para la agrupación de los códigos. En ella se pueden ver todos los códigos que fueron asociados al efecto de la jaula de Faraday, los que a su vez fueron agrupados por color para identificar cada categoría según el criterio de la tabla 9 para el modelo híbrido (categorías presentadas en el apartado 5.1). Por lo tanto, cada categoría quedó compuesta por varios códigos. Además, esta herramienta ayuda porque al hacer click en cada uno de los códigos el programa muestra todas las citas que corresponden a todas las respuestas que fueron codificadas de esa manera, sin tener que volver a revisar los documentos uno a uno.



**Figura 50** Agrupación de códigos para la elaboración de categorías para cada tipo de explicación según el criterio de análisis de cada modelo

#### 4.3.3.2 Fase 2

La fase 2 corresponde al análisis cuantitativo de la prevalencia de cada tipo de explicación y su evolución a lo largo de la SEA. Para ello, se utilizó el conteo de coocurrencia de códigos que registra el software Atlas.ti para identificar el número de respuestas clasificadas en cada una de las categorías encontradas.

En las figuras 51 y 52, vemos dos tablas de coocurrencia que luego fueron exportadas al software Microsoft Excel para poder obtener los cálculos de frecuencia absoluta y los porcentajes de prevalencia para cada categoría de cada tipo de explicación. Estos resultados serán presentados en la sección 5.2.

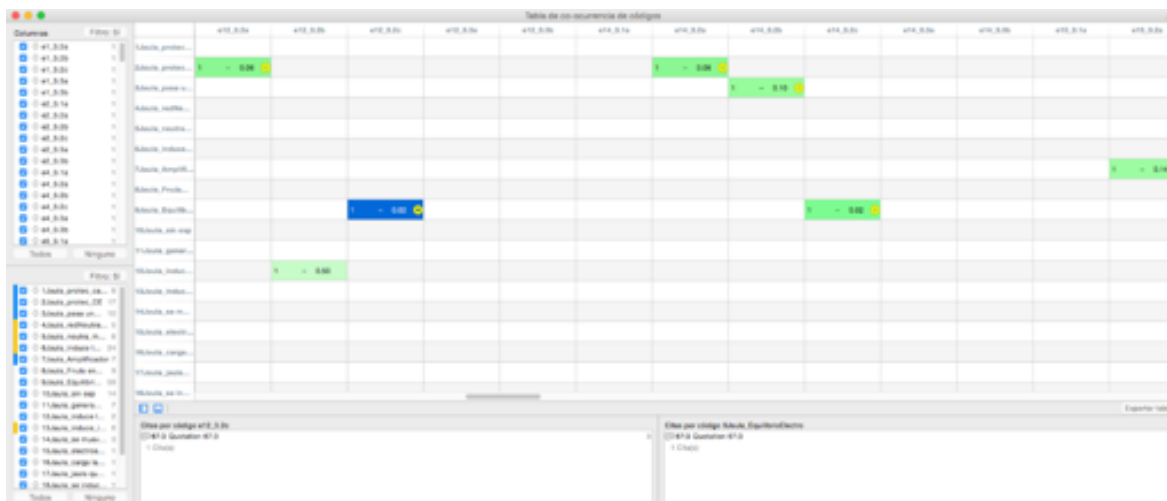


Figura 51 Tabla de coocurrencia para el efecto de la jaula de Faraday

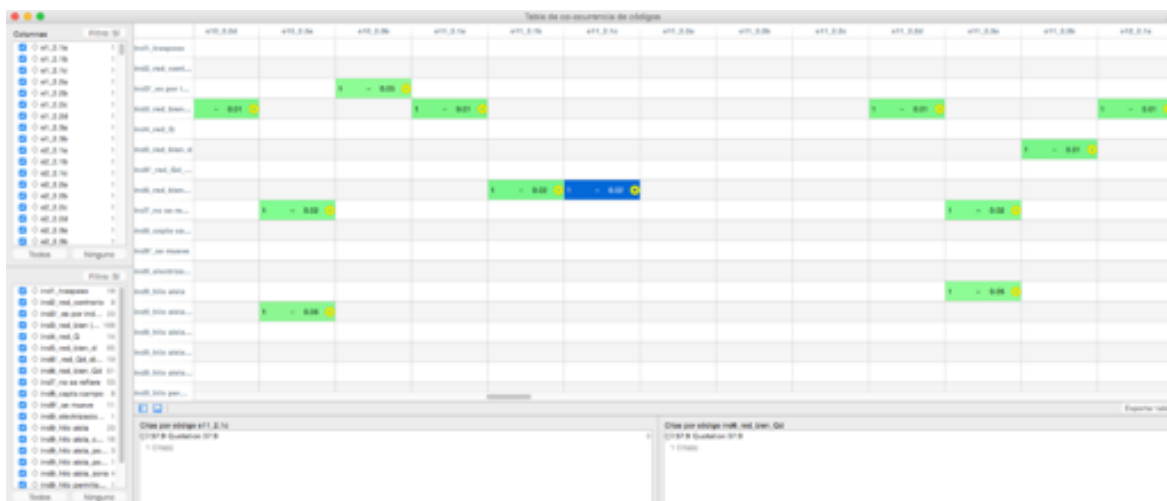


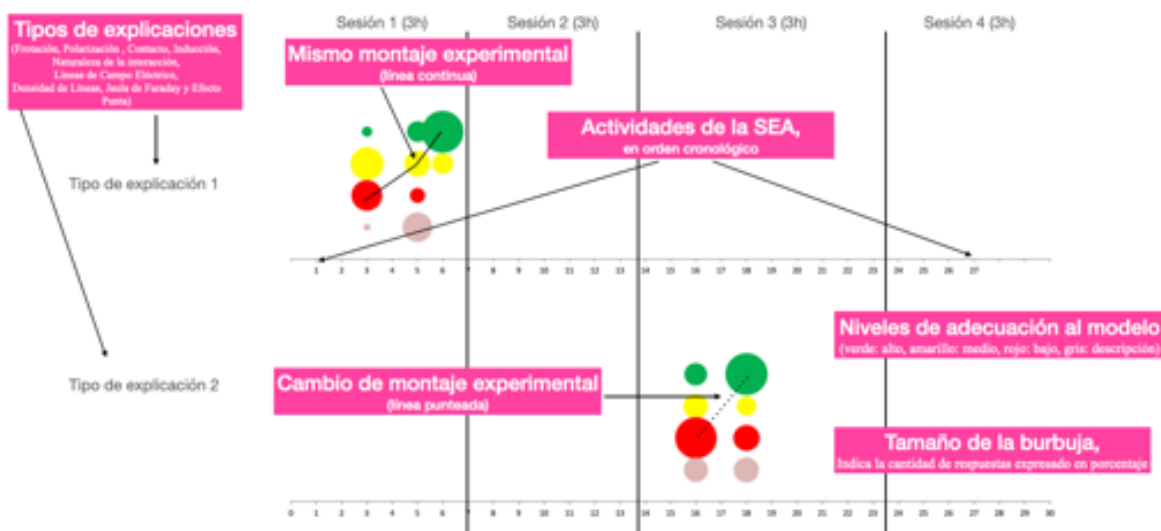
Figura 52 Tabla de coocurrencia para la carga por inducción

### 4.3.3.3 Fase 3

La fase 3 corresponde al análisis de la evolución de las explicaciones como una progresión. En esta fase se construyeron los niveles de adecuación de los modelos que fueron transversales a todos los tipos de explicación. Para esto, se usó una tabla de equivalencia que permitió ajustar las categorías inductivas a los niveles de cada modelo. Este fue el proceso más complejo del análisis de los datos, dado que las categorías por tipo de explicación son en ocasiones muy apegadas al fenómeno de estudio y, por lo tanto, son difíciles de homogeneizar.

Los resultados de este análisis fueron registrados en gráficas inspiradas en el modelo de representación de datos de Hernández et al. (2015), y se exponen en el apartado 5.2. Estas

gráficas corresponden al diseño de burbuja del software Microsoft Excel. En ellas, los tipos de explicación se ubican en el eje vertical, en el eje horizontal se encuentran las actividades en orden cronológico, y el tamaño de cada burbuja muestra la cantidad de respuestas correspondientes a cada nivel (expresadas en porcentaje). Los colores representan el nivel de adecuación al modelo, asemejando un semáforo (verde: alto, amarillo: medio, rojo: bajo, gris: descripción). La figura 53 ilustra un ejemplo de este tipo de gráficas.



**Figura 53** Gráfica de burbujas que ilustra la progresión del nivel de adecuación del modelo híbrido

La figura 54 a continuación muestra un ejemplo de lo que fue el proceso de análisis numérico de los datos recolectados, correspondiente a la hoja de cálculo de las respuestas del efecto de la Jaula de Faraday. En ella se observan tres conjuntos de datos distribuidos en listas. Cada una de ellas representa a una generación distinta de estudiantes. Para cada generación, se presenta la lista de nombres junto con la categoría en que fue codificada cada una de sus respuestas por tipo de explicación en las actividades que correspondan a dicho fenómeno. En este caso, se muestran las de las actividades 16, 17 y 18 ya que en ellas se trabaja la jaula de Faraday. Más abajo, se encuentra el conteo de prevalencias de las respuestas distribuidas por categoría (Resultados a presentar en 5.2). Lo siguiente corresponde a la agrupación por color de las categorías según la tabla de equivalencias para el nivel de adecuación al modelo. Más abajo, se encuentran los cálculos porcentuales de estos datos y finalmente, a mano derecha, se puede ver la construcción de la gráfica de burbuja (Resultados a presentar en 5.2).



**Figura 54** Ambiente de trabajo en Microsoft Excel donde se realiza el conteo de respuestas por categoría y por nivel de adecuación al modelo, y la construcción de la gráfica para el efecto de la jaula de Faraday.

#### 4.3.3.4 Fase 4

La fase 4 consiste en el análisis de la influencia de la SEA en la progresión. Para ello, fue necesario primero clasificar las características didácticas de la SEA. Para ello se definieron 3 dimensiones: **tipo de interacción**, **tipo de experiencia** y **dispositivo experimental**. El detalle de las categorías para estas dimensiones se presenta en la siguiente sección, 4.3.4. Luego, contamos cuántas respuestas avanzan al nivel del modelo esperado, retroceden, pasan a descripciones o se mantienen, según las características clasificadas en las dimensiones recién mencionadas.

Para poder observar si el nivel de las explicaciones sube, baja, se mantiene o baja a descripción, entre dos actividades en que se requiere el mismo tipo de explicación, se trabajó en una hoja de cálculo como la que se muestra en la figura 55. En ella se muestra que la primera columna corresponde el listado de estudiantes (67) y las siguientes columnas la categorización por cada actividad en la SEA para ese tipo de explicación, en este caso se muestra para el tipo de explicación: Polarización.

Se elabora una fórmula para cambiar el nombre acotado de la categoría por un valor numérico en relación con el nivel de adecuación al modelo.

E	1	4	5	14	15	19	20	1	4	Situación
1	REORD	COULOMB	COULOMB	COULOMB	COULOMB	REORD	FUERZA	3	4	
2	FUERZA	FUERZA	0	CONTACTO	DESCRIP	REORD	REORD	4	4	
3	DESCRIP	DESCRIP	FUERZA	0	0	0	0	1	1	
4	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	COULOMB	FUERZA	REORD_F>f	1	1	
5	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD	1	1	
6	FUERZA	COULOMB	COULOMB	DESCRIP	COULOMB	DESCRIP	REORD_F>f	4	4	
7	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	0	0	0	0	1	1	
8	DESCRIP	REORD_F>f	REORD_F>f	0	0	0	0	1	4	
9	DESCRIP	DESCRIP	FUERZA	DESCRIP	COULOMB	REORD_F>f	REORD_F>f	1	1	
10	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	0	1	1	
11	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	0	1	1	
12	FUERZA	FUERZA	REORD_F>f	FUERZA	COULOMB	DESCRIP	REORD_F>f	4	4	
13	REORD	0	FUERZA	DESCRIP	REORD	COULOMB	0	3	0	
14	DESCRIP	DESCRIP	FUERZA	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD	1	1	
15	DESCRIP	FUERZA	FUERZA	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD	1	4	
16	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD_F>f	4	4	

Figura 55 Hoja de cálculo utilizada para reemplazar los códigos por valores numéricos con el fin de cuantificar los cambios de nivel entre pares de actividades. Ejemplo de respuestas de carga por polarización.

Luego, construimos una fórmula que compara los valores numéricos de ambas actividades consecutivas y reporta si hubo un aumento o disminución del nivel y en qué grado. También permite conocer los cambios no trazables, que son aquellos en que el estudiante no respondió una de las dos actividades o ninguna de ellas. La figura 56 muestra este ambiente de trabajo.

E	1	4	5	14	15	19	20	1	4	Situación	4	5	Situación	5	14	Situación	14	15	Situación	15	19	Situación	19	20	Situación
1	REORD	COULOMB	COULOMB	COULOMB	COULOMB	REORD	FUERZA	3	4	Sube	4	5	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	3	Baja?	3	4	Sube
2	FUERZA	FUERZA	0	CONTACTO	DESCRIP	REORD	REORD	4	4	Mantene	4	0	no trazable	0	2	no trazable	2	1	Baja, Descrp	1	3	Sube	3	3	Mantene
3	DESCRIP	DESCRIP	FUERZA	0	0	0	0	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	0	no trazable	0	0	no trazable	0	0	no trazable	0	0	no trazable
4	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	COULOMB	FUERZA	REORD_F>f	1	1	Mantene	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene
5	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	3	Baja?
6	FUERZA	COULOMB	COULOMB	DESCRIP	COULOMB	DESCRIP	REORD_F>f	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube
7	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	0	0	0	0	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	0	no trazable	0	0	no trazable	0	0	no trazable	0	0	no trazable
8	DESCRIP	REORD_F>f	REORD_F>f	0	0	0	0	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	0	no trazable	0	0	no trazable	0	0	no trazable	0	0	no trazable
9	DESCRIP	DESCRIP	FUERZA	DESCRIP	COULOMB	REORD_F>f	REORD_F>f	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene
10	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	0	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	0	no trazable
11	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	0	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	0	no trazable
12	FUERZA	FUERZA	REORD_F>f	FUERZA	COULOMB	DESCRIP	REORD_F>f	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube
13	REORD	0	FUERZA	DESCRIP	REORD	COULOMB	0	3	0	no trazable	0	4	no trazable	4	1	Sube	1	3	Sube	3	4	Sube	4	0	no trazable
14	DESCRIP	DESCRIP	FUERZA	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD	1	1	Mantene	1	4	imp	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	3	Baja?
15	DESCRIP	FUERZA	FUERZA	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	3	Baja?
16	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD_F>f	1	1	Mantene	1	1	Mantene	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene
17	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	COULOMB	REORD	REORD_F>f	1	1	Mantene	1	1	Mantene	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	3	Baja?	3	4	Sube
18	DESCRIP	DESCRIP	REORD_F>f	COULOMB	COULOMB	FUERZA	REORD_F>f	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene
19	DESCRIP	CONTACTO	FUERZA	DESCRIP	COULOMB	REORD	REORD_F>f	1	2	Sube	2	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	3	Baja?	3	4	Sube
20	DESCRIP	DESCRIP	REORD_F>f	COULOMB	COULOMB	REORD_F>f	REORD_F>f	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene
21	DESCRIP	CONTACTO	REORD_F>f	DESCRIP	COULOMB	REORD_F>f	REORD_F>f	1	2	Sube	2	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene
22	DESCRIP	DESCRIP	REORD_F>f	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD_F>f	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene
23	DESCRIP	DESCRIP	REORD_F>f	DESCRIP	COULOMB	FUERZA	REORD_F>f	1	1	Mantene	1	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene
24	DESCRIP	REORD	REORD	REORD_F>f	COULOMB	FUERZA	REORD_F>f	1	3	Sube	3	4	Sube	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene	4	4	Mantene
25	DESCRIP	REORD	FUERZA	DESCRIP	COULOMB	REORD_F>f	0	1	3	Sube	3	4	Sube	4	1	Baja, Descrp	1	4	Sube	4	4	Mantene	4	0	no trazable
26	DESCRIP	DESCRIP	DESCRIP	0	COULOMB	0	REORD	1	1	Mantene	1	1	Mantene	1	0	no trazable	0	4	no trazable	4	0	no trazable	0	3	no trazable

Figura 56 Hoja de cálculo que muestra los cambios en el nivel de adecuación al modelo de las respuestas de los estudiantes cada dos actividades. Ejemplo de actividades sobre la carga por polarización.

Posteriormente, se cuentan los tipos de cambio (suben de nivel, bajan de nivel, pasan a descripción, mantienen el nivel y no trazables) por cada par de actividades consecutivas. En la figura 57 se observa el recuento de los cambios para la carga por polarización.

	de 1 a 4	de 4 a 5	de 5 a 14	de 14 a 15	de 15 a 19	de 19 a 20
Sube de nivel	17	26	4	31	4	15
Baja de nivel	5	1	5	0	16	6
Baja a descripción	2	2	18	2	6	2
Mantiene	28	20	20	27	33	27
No trazable	15	18	20	7	8	17
	67	67	67	67	67	67

**Figura 57** Conteo de la cantidad de respuestas que suben, bajan, se mantienen en el nivel o bajan a descripción por cada par de actividades. Ejemplo de actividades sobre la carga por polarización.

Luego, tras repetir esta acción nueve veces, una para cada tipo de explicación (frotación, polarización, inducción, contacto, naturaleza de la interacción, líneas de campo eléctrico, densidad de líneas de campo eléctrico, jaula de Faraday y efecto punta) los datos numéricos se vincularon con las características didácticas de la SEA en una tabla que se presenta en el apartado 5.3. La figura 58 muestra un extracto de esta tabla.

Tendencia del nivel de adecuación al Modelo según gráficos	Dimensión: Discusión entre pares - con el profesor - explicación Modelo según gráficos	Dimensión: experiencia real: hipotética / previa real / previa hipotética	Dispositivo: igual / distinto	n° de actividades donde se produjo el cambio	Cantidad de respuestas que mejoran	Cantidad de respuestas que bajan	Cantidad de respuestas que pasan a descripción	Cantidad de respuestas que se mantienen en su nivel	No trazable	Total	SUBEN	BAJAN	DELTA	Tendencia del nivel de adecuación al Modelo según datos
1 Bajado	explica_prof	exp_real	Igual	1 - 4 Frotación	14	1	20	15	17	67	14	21	-7	Baja
2 Mantiene	nada	nada	Distinto	4 - 5 Frotación	2	1	16	27	19	67	2	19	-17	Baja
3 Subido	nada	nada	Igual	1 - 4 Polarización	17	5	2	28	15	67	17	7	10	Sube
4 Subido	explica_prof	previainp_real	Distinto	4 - 5 Polarización	26	1	2	20	18	67	26	3	23	Sube
5 Bajado	nada	nada	Distinto	5 - 14 Polarización	4	5	18	20	20	67	4	23	-19	Baja
6 Subido	discusion_con_prof	previainp_real	Igual	16 - 19 Polarización	31	0	2	27	7	67	31	2	29	Sube
7 Mantiene	nada	nada	Distinto	15 - 19 Polarización	4	16	6	33	8	67	4	22	-16	Baja
8 Mantiene	discusion_con_prof	previainp_real	Igual	19 - 20 Polarización	15	6	2	27	17	67	15	8	7	Sube
9 Subido	discusion_con_prof	previainp_real	Igual	6 - 7 Inducción	38	5	0	16	8	67	38	5	33	Sube
10 Mantiene	explica_prof	previainp_real	Igual	7 - 8 Inducción	7	2	0	47	15	67	7	2	5	Sube
11 Bajado	explica_prof	exp_real	Distinto	8 - 12 Inducción	9	51	3	1	12	67	0	54	-54	Baja
12 Subido	discusion_con_prof	previainp_real	Igual	12 - 13 Inducción	54	0	2	9	8	67	54	2	52	Sube
13 Bajado	nada	nada	Distinto	13 - 16 Inducción	2	20	30	3	12	67	2	50	-48	Baja
14 Subido	discusion_pares	previainp_real	Igual	16 - 17 Inducción	26	3	0	23	5	67	26	3	23	Sube
15 Subido	discusion_con_prof	previainp_real	Igual	2 - 3 Contacto	42	0	2	6	17	67	42	2	40	Sube
16 Bajado	explica_prof	nada	Distinto	5 - 8 Contacto	5	26	6	10	20	67	5	32	-27	Baja
17 Subido	discusion_con_prof	previainp_real	Igual	9 - 10 Contacto	29	1	2	21	14	67	29	3	26	Sube
18 Mantiene	explica_prof	previainp_real	Igual	10 - 11 Contacto	7	0	0	16	50	67	7	0	7	Sube
19 Bajado	explica_prof	exp_real	Distinto	11 - 12 Contacto	3	17	1	46	67	67	0	18	-18	Baja
20 Mantiene	discusion_con_prof	previainp_real	Igual	12 - 13 Contacto	22	0	0	37	8	67	22	0	22	Sube
21 Subido	discusion_con_prof	previainp_real	Igual	14 - 15 Campo Elec	35	2	0	25	5	67	35	2	33	Sube

**Figura 58** Conteo de la cantidad de respuestas que suben, bajan, se mantienen en el nivel o bajan a descripción por cada par de actividades, vinculado a las características didácticas de la SEA.

A partir de estos resultados se construyeron 3 tablas, una para cada dimensión de análisis de las características didácticas de la SEA. Estas tablas se presentan en la sección 5.3 y nos permiten analizar el impacto que tienen las características didácticas en los cambios de los niveles de adecuación al modelo de las respuestas.



Finalmente, los valores obtenidos en estas tres tablas fueron sometidos a la prueba de chi cuadrado ( $\chi^2$ ) para determinar si los cambios eran aleatorios o no. Después de esto, se analizó cómo las dimensiones pudieron incidir en los cambios observados para cada tipo de explicación. Los resultados de esta fase se exponen en el apartado 5.3. En esta etapa de la investigación, el trabajo de Treagust et al. (2001) sirvió como inspiración. Los autores mencionados estudiaron de qué manera distintas estrategias de evaluación incluidas en las clases beneficiaban a distintos alumnos y a la planificación de la clase.

Durante este proceso de cuatro fases, los datos fueron constantemente triangulados entre sí y con las ideas del modelo científico escolar y la literatura existente en torno a la didáctica y la enseñanza de la Electroestática.

En la siguiente sección se trata el tema de las categorías de análisis de las dimensiones obtenidas a partir de las características de la SEA.

#### **4.3.4 Detalle del sistema de categorías para el análisis didáctico de la SEA**

En la dimensión “tipo de interacción” encontramos tres tipos de discusión. La primera es la **discusión entre pares**, que se caracteriza por ser una discusión en igualdad de condiciones entre los participantes, es nuestro caso entre los mismos estudiantes. Encontramos discusión entre pares, por ejemplo, entre la primera respuesta sobre líneas de campo en las actividades 21 y 22. Esta categoría generalmente se aprecia entre las primeras y segundas respuestas de una misma idea.

La siguiente categoría la denominamos **discusión con el profesor**. Este tipo de discusión se caracteriza por la mediación de un profesor en el intercambio de ideas entre estudiantes. Generalmente encontramos este tipo de categoría cuando se requiere introducir un nuevo concepto, recordar un concepto ya trabajado o que los estudiantes puedan recolectar más información de la experimentación. Por ejemplo, entre las actividades 7 y 8, el profesor media la discusión y promueve que los estudiantes observen con detalle la experimentación para la carga por inducción.

Por último, levantamos la categoría **explicación del profesor**, que se caracteriza por el protagonismo del profesor y el rol de oyente de los estudiantes. Podemos observar esta categoría cuando el profesor formaliza una o varias ideas. Generalmente la exposición del

profesor se realiza tras finalizar una experimentación, por ejemplo, entre las actividades 15 y 19 sobre campo eléctrico.

En la dimensión “tipo de experiencia” encontramos cuatro categorías. Dos de ellas (experiencia real y experiencia hipotética) aluden a situaciones donde el diálogo o la explicación es sobre un fenómeno que se está trabajando en ese momento, mientras que las otras (experiencia previa real y experiencia previa hipotética) aluden a fenómenos que fueron trabajados anteriormente y por lo tanto, requiere que los estudiantes recuerden una situación previa.

En el primer grupo, se encuentra la **experiencia real**, que se observa cuando la discusión está ocurriendo mientras se demuestra en vivo una experiencia de laboratorio. Ejemplos de esta categoría se presentan entre las actividades 8 y 12 para la idea de inducción, y entre las actividades 11 y 12 para la idea de contacto. En ellas se usa el montaje del generador VDG y un electroscopio, en un momento unidos por un hilo, y en otro por una cadena metálica.

En el primer grupo también se encuentra la **experiencia hipotética**, que no se basa en una demostración en vivo, sino que en una experiencia simulada, descrita o abstracta. Por ejemplo, entre las actividades 21 y 22 para la idea de líneas de campo eléctrico, se discute sobre un diagrama abstracto de una superposición de campos eléctricos.

En el segundo grupo de categorías se encuentra la **experiencia previa real**, que se basa en una demostración en vivo ya realizada anteriormente. Un ejemplo de esta categoría se puede observar entre las actividades 24 y 27 para la idea de efecto punta. La discusión es sobre la experimentación de encender un tubo fluorescente tocando sus terminales sobre una superficie metálica cargada. Al momento de solicitar a los estudiantes sus explicaciones en la actividad 27, se esperaba que ellos recordaran la experimentación realizada al comienzo de la sesión.

La última categoría en este segundo grupo corresponde a **experiencia previa hipotética**, que corresponde a una discusión que hace referencia a una situación pasada que posee las características de ser una experiencia simulada, descrita o abstracta. Un ejemplo de esta categoría se da entre las actividades 25 y 26 para la densidad de líneas de campo eléctrico,

ya que la discusión hace referencia a una experiencia descrita previamente, a la que los estudiantes tienen acceso por medio de imágenes.

Para la última dimensión, “dispositivo experimental” encontramos dos categorías: **igual dispositivo** y **distinto dispositivo**. La categoría **igual dispositivo** se refiere a que entre dos actividades se experimenta o se hace referencia al mismo dispositivo experimental. La categoría **distinto dispositivo** se refiere a que entre dos actividades se experimenta o se hace referencia a distintos dispositivos experimentales. Por ejemplo, en la carga por contacto encontramos que entre las actividades 2 y 3 se usa un montaje que consiste en una barra metálica, sobre un vaso de vidrio, que es cargada por contacto. Por lo tanto, entre ambas actividades la categoría corresponde a igual dispositivo. Luego, en la actividad nº 9, que corresponde a la siguiente vez en que se trabaja con la idea de contacto, se utiliza un electroscopio. En este caso, corresponde la categoría de distinto dispositivo.

A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las características didácticas de la SEA.

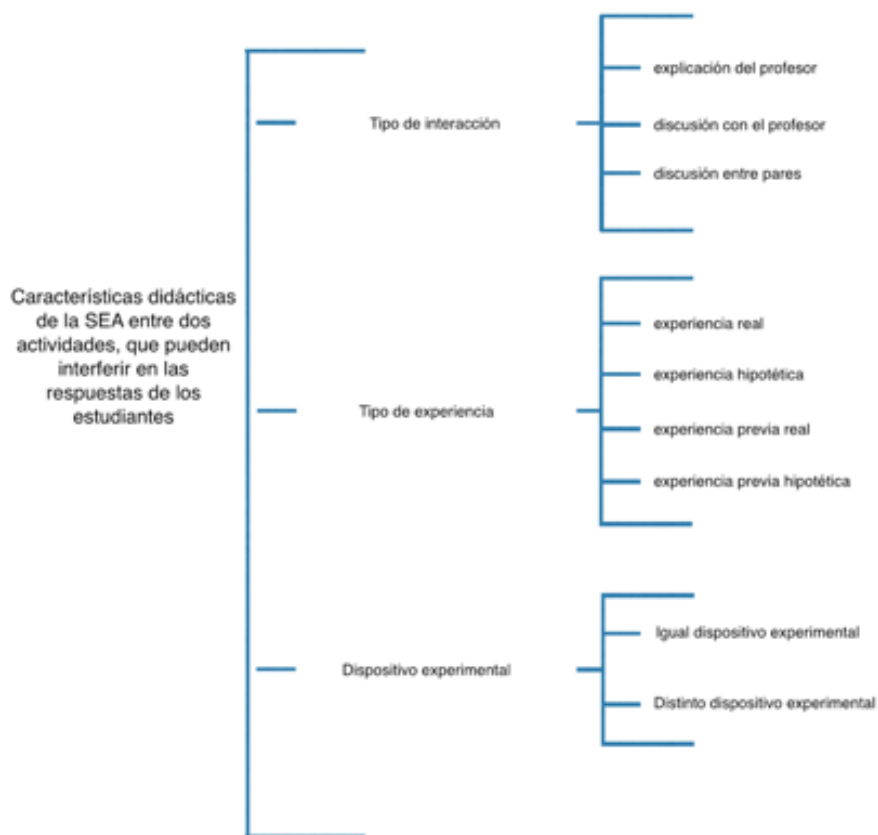


Figura 59 Red sistémica para las categorías sobre las características didácticas de la SEA

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de este estudio, que permitirán dar respuesta a las preguntas de investigación. En primer lugar, se expone la tipología de las distintas explicaciones encontradas. Luego, se muestran los resultados ordenados por tipo de explicación, comenzando por el modelo de distribución e interacción de cargas, pasando al de campo eléctrico y finalizando con el modelo híbrido. Posteriormente, se expone la organización de estas ideas según su nivel de adecuación al modelo. Finalmente, se presenta la influencia de las características didácticas de la SEA en las explicaciones de los estudiantes.



Estudiantes de un liceo público trabajando una secuencia didáctica de electrostática que emana de un seminario de grado propuesto por profesores en formación

## 5.1 Tipología explicaciones identificadas

Los tipos de respuestas que se observan en las actividades seleccionadas de la SEA se categorizaron en diferentes grupos. En los siguientes apartados se describen las categorías encontradas para cada tipo de explicación. Junto con ellas, se presentan citas textuales de las respuestas de los estudiantes para las distintas actividades. Al final de cada cita, se utilizará la siguiente nomenclatura para indicar a quién corresponde y a qué instancia de la SEA: E + número de estudiante + A + número de la actividad en que se recogió la respuesta. Por ejemplo, la combinación “E5, A3” significa que la respuesta corresponde al estudiante 5, para la actividad 3.

### 5.1.1 Tipología explicaciones identificadas basadas en el modelo de distribución e interacción de cargas

#### 5.1.1.1 Categorías para las explicaciones sobre carga por frotación

En el análisis de las respuestas de los estudiantes que explican cómo se produce la carga por frotación, encontramos cinco tipos de respuestas. La primera categoría corresponde a aquellas donde los estudiantes se limitaban a redactar descripciones del proceso, por ejemplo:

“al frotar el peine queda cargado eléctricamente” (E12, A5)

Esta categoría lleva el nombre de **DESCRIPCIÓN** y se caracteriza porque en el redactado del estudiante no se explica el proceso de la carga por frotación, sino que se refiere sólo a la idea de que la frotación permite cargar un cuerpo, es decir el resultado de la operación.

También observamos otro tipo de respuestas para la carga por frotación donde los estudiantes utilizan la idea de que al momento de la frotación se producen cargas, es decir, se evidencia la concepción de que la carga eléctrica se crea al momento de la interacción. Es probable que esta idea surja debido a que tras la frotación existe una propiedad que atrae a pequeños objetos, situación que antes no ocurría. Lo podemos ver en el siguiente ejemplo:

“...donde al frotar un tubo, este se carga eléctricamente teniendo y formando cargas...”  
(E2, A1)

Este tipo de respuestas se codificaron con el nombre de **CREACIÓN**. En esta categoría la carga por frotación se explica por medio de la creación de cargas en los cuerpos frotados.

Otro grupo de estudiantes explica este método de electrización por medio de un reordenamiento de las cargas del cuerpo frotado, esta idea la podemos ver reflejada en la siguiente cita:

“Tras la frotación del tubo las cargas eléctricas se reordenan esto quiere decir que las cargas positivas para un lado y las cargas negativas para otro” (E7, A1)

La idea del reordenamiento de cargas no es correcta para este tipo de fenómeno pues el reordenamiento implica que el cuerpo debería mantener la misma cantidad de cargas, pero distribuidas en función de una carga externa. Para el caso de la frotación, se explica por fenómeno de transferencia, es decir, el resultado de la operación son dos cuerpos cargados con diferente signo, por lo que debería existir un traspaso de carga de un cuerpo al otro. Esto implica que queda un cuerpo con carga en exceso y el otro en defecto. Esto se evidencia por la atracción entre dos cuerpos tras ser frotados. La categoría de respuestas que evidencian esta confusión entre un proceso que es de transferencia por uno de reordenamiento como si fuera una polarización ha sido denominada **REORDENAMIENTO**.

Finalmente existe un grupo de respuestas que hacen referencia a la transferencia de cargas para explicar la fricción, pero al revisar en detalle se evidencia que se pueden clasificar en dos tipos: cuerpo cargado o cuerpo cargado únicamente en la zona frotada. Así, se llamó **TRANSFERENCIA TOTAL** a la categoría de respuestas que señalan que la transferencia de carga produce que los cuerpos frotados queden totalmente cargados. Un ejemplo de respuesta de esta categoría es:

“...cuando se carga por el método de fricción se genera un “traspaso” de electrones libres entre los cuerpos quedando ambos cargados de forma opuesta” (E1, A1)

La siguiente imagen muestra un globo cargado tras ser frotado, según la ilustración de él o la estudiante. Esta ilustración también es un ejemplo de respuesta de esta categoría.

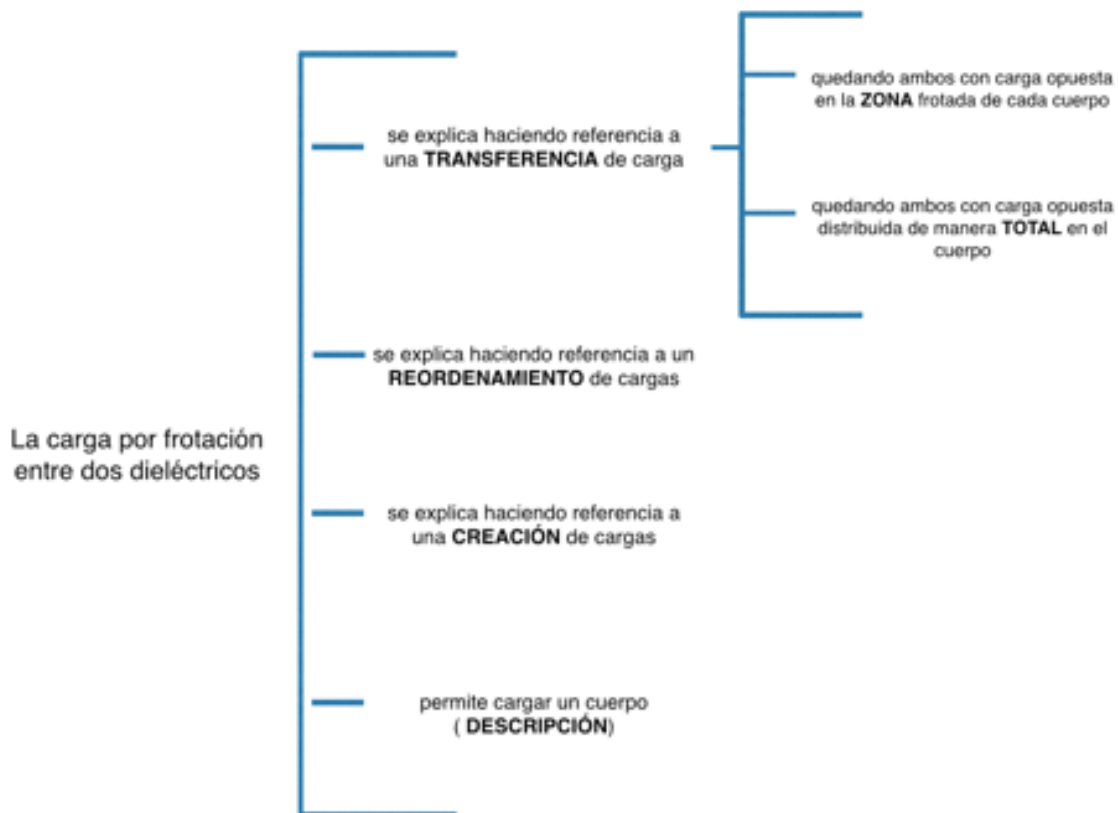


(E25, A3)

Se le llamó **TRANSFERENCIA ZONA** a la categoría de respuestas que consideraron explícitamente la característica del material dieléctrico. Dicha característica es que cuando ingresa carga al material, esta queda confinada en el lugar, puesto que no se permite el desplazamiento de cargas por su superficie. La siguiente cita es un ejemplo de respuesta de esta categoría:

“las cargas del globo se distribuyen a lo largo de la zona de frotación recibiendo los electrones y terminando con carga negativa” (E35, A4)

A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas a la carga por frotación.



**Figura 60** Red Sistémica para la carga por frotación

### 5.1.1.2 Categorías para las explicaciones sobre carga por polarización

En el análisis de las respuestas de los estudiantes que involucran la idea de Polarización, encontramos seis tipos de respuestas. El primer tipo son respuestas que no presentan una explicación. Estas respuestas sólo señalan el resultado observable tras la polarización como por ejemplo una atracción:

“tiende a pegarse al VDG” (E31, A14)

A este tipo de respuestas que le asignan una propiedad atractiva a los cuerpos cargados sin especificar el proceso de reorientación de cargas se le llamó **DESCRIPCIÓN**.

Otra categoría de respuestas explica que la polarización se da cuando hay un contacto entre dos cuerpos. A esta categoría se le llamó **CONTACTO** y su definición corresponde a que la polarización se explica por la transferencia de las cargas de un dieléctrico mediante el contacto entre el neutro y la carga externa (cuerpo cargado). La siguiente es una cita de esta categoría:

“el electrodo al estar en contacto con los hilos hace que en un extremo sea + y en el otro – por lo que se alinean...Al hacer contacto produce que las cargas vayan para un lado y otras para el otro” (E30, A19)

En el siguiente grupo de respuestas todas presentan una clara idea sobre el reordenamiento de cargas del cuerpo neutro debido a una carga externa. Algunas respuestas de esta categoría incluso llegaron a niveles mayores de profundidad, los que se dividieron por el nivel de detalle que entregan al explicar cómo se produce el reordenamiento. La categoría que solo explica la polarización como resultado del reordenamiento de las cargas de un dieléctrico en función del signo de la carga externa (o cuerpo cargado), fue denominada **REORDEAMIENTO**, y se presenta un ejemplo a continuación:

“el dipolo del dieléctrico se alinea y reordena respecto a la carga del electrodo” (E34, A20)

En el nivel de profundidad mayor descrito en el párrafo anterior, se encuentra una categoría de respuestas que, además de hablar de reordenamiento, señala que existe una fuerza de atracción:

“Se da una fuerza de atracción entre el globo que está cargado y la pared donde las cargas se polarizan” (E60, A4)



A este grupo de respuesta lo llamamos **REORDENAMIENTO FUERZA**, porque en vez de reconocer que la polarización se debe a la acción de los dos tipos de fuerza eléctrica (repulsión y atracción) sólo menciona un tipo de fuerza en la explicación .

Al siguiente grupo de respuestas le llamamos **REORDENAMIENTO COULOMB**, pues en este grupo la polarización se explica debido al reordenamiento de las cargas de un dieléctrico por el efecto de una fuerza y además se detallan las variables que intervienen en su magnitud, por ejemplo:

“...se atraen (las cargas opuestas) debido a que la fuerza de interacción entre cargas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, de manera que a poca distancia mayor será la fuerza” (E45, A5)

Finalmente hay un grupo de respuestas que explica que la polarización es debido al reordenamiento de las cargas de un dieléctrico neutro por la fuerza resultante entre las fuerzas de atracción y repulsión, o bien, al reconocimiento de las dos fuerzas involucradas. Este grupo de respuestas corresponde a la explicación más completa para la polarización encontrada en los datos de esta investigación. A esta categoría se le llamó **REORDENAMIENTO DOS FUERZAS**. La siguiente es una cita de dicha categoría:

“...mediante la fuerza de atracción de las cargas sólo una parte de la muralla queda +...al ser la distancia menor entre carga – y + se atraen; por eso no se repelen, distancia entre – y - es mayor” (E8, A4)

A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas a la carga por polarización.

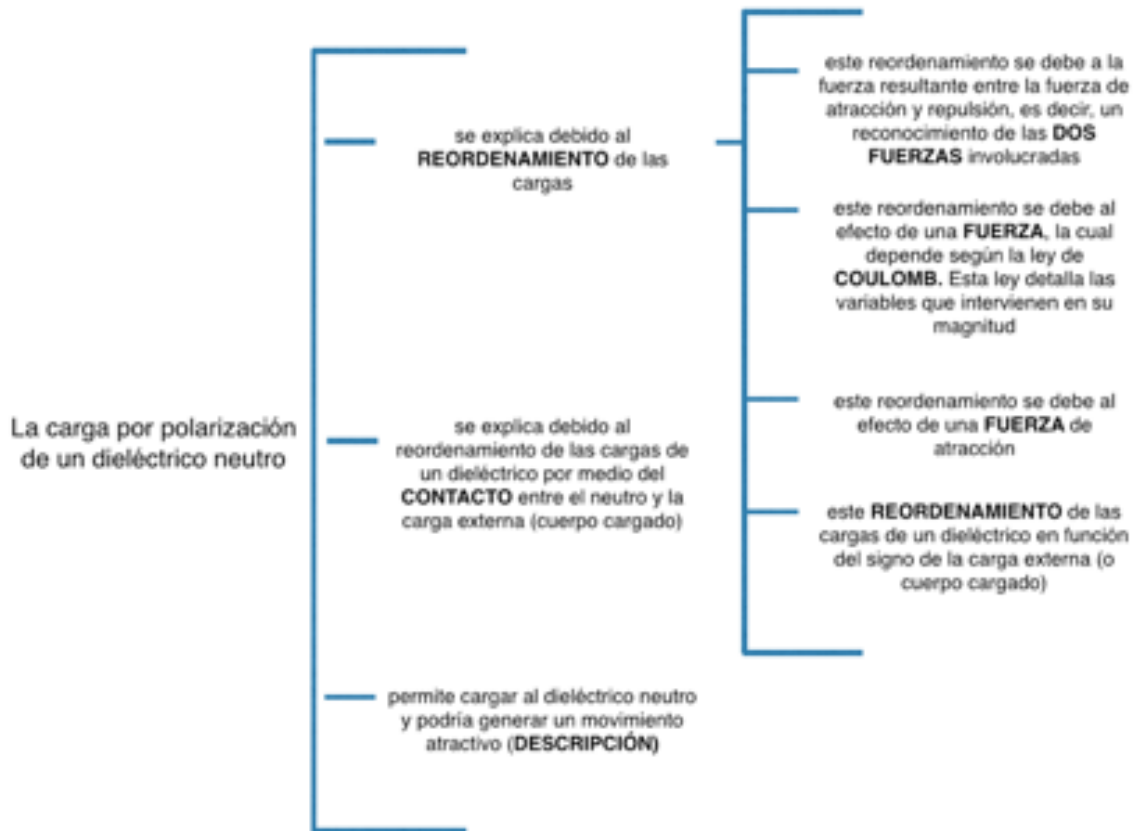


Figura 61 Red Sistémica para la carga por polarización

### 5.1.1.3 Categorías para las explicaciones sobre carga por inducción

Para este tipo de respuestas encontramos cuatro categorías. La primera fue la de aquellas que solo describen la consecuencia de la situación estudiada, al igual que en el caso de los dos fenómenos anteriores. Por ejemplo:

“el electroscopio se moverá levemente” (E16, A16)

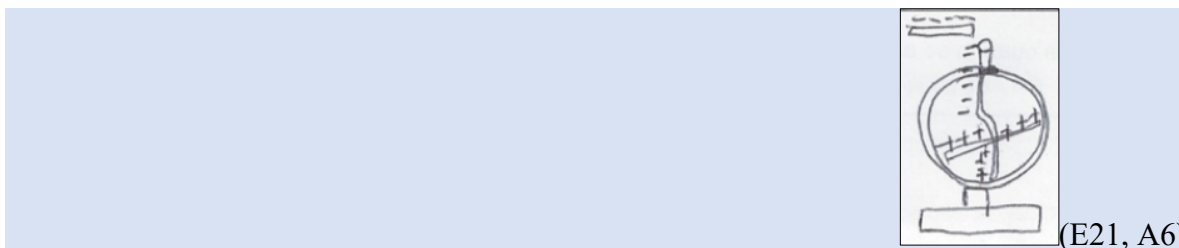
A este grupo le llamamos **DESCRIPCIÓN**, pues no explicitan las relaciones entre variables asociadas a este fenómeno.

El segundo grupo de respuestas se caracteriza por explicar la inducción debido a una transferencia de carga del cuerpo cargado al conductor neutro, ya sea por un medio de contacto o por el aire. Un ejemplo de este tipo de respuestas es,

“Como el hilo es un material dieléctrico, no conduce, la carga del VDG. Pero por inducción se genera el traspaso de carga...” (E30, A13)

A esta categoría se le denominó **TRANSFERENCIA DE CARGA** y nos muestra una confusión entre fenómenos de transferencia y de reordenamiento de cargas.

El siguiente grupo de respuestas nos muestra una confusión de la regla de los signos entre cargas eléctricas cuando se enfrentan a fenómenos de carga por inducción. A esta categoría le llamamos **REORDENAMIENTO CONTRARIO**. Podemos ver un ejemplo en la siguiente imagen.



Finalmente, el último grupo de respuestas lo hemos dividido en dos categorías. Cabe mencionar que en ambas las respuestas presentan la idea del reordenamiento de cargas debido a una acción a distancia y respetan la regla de los signos.

A una parte de este grupo de respuestas le llamamos **REORDENAMIENTO DE CARGAS**, pues presentan el correcto reordenamiento y desplazamiento de las cargas sobre un conductor neutro por el efecto de una carga externa. Un ejemplo de este grupo de respuestas es,

“Al acercarse el caucho a la placa metálica superior el electroscopio se reordena, las cargas quedan arriba positivas y abajo negativas” (E6, A6)

La segunda parte de este grupo, además de hablar del reordenamiento y desplazamiento correcto en función de una carga externa, detalla las variables que intervienen en la magnitud de las fuerzas usando la ley de Coulomb.

“cuando se acerca más, la fuerza de repulsión es mayor debido a que la distancia entre ellos es menor, por lo tanto, la fuerza de atracción aumenta, al igual que la cantidad de cargas y viceversa al alejarse” (E8, A7)

A esta última categoría se le llamó **REORDENAMIENTO COULOMB**.

A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas a la carga por inducción.

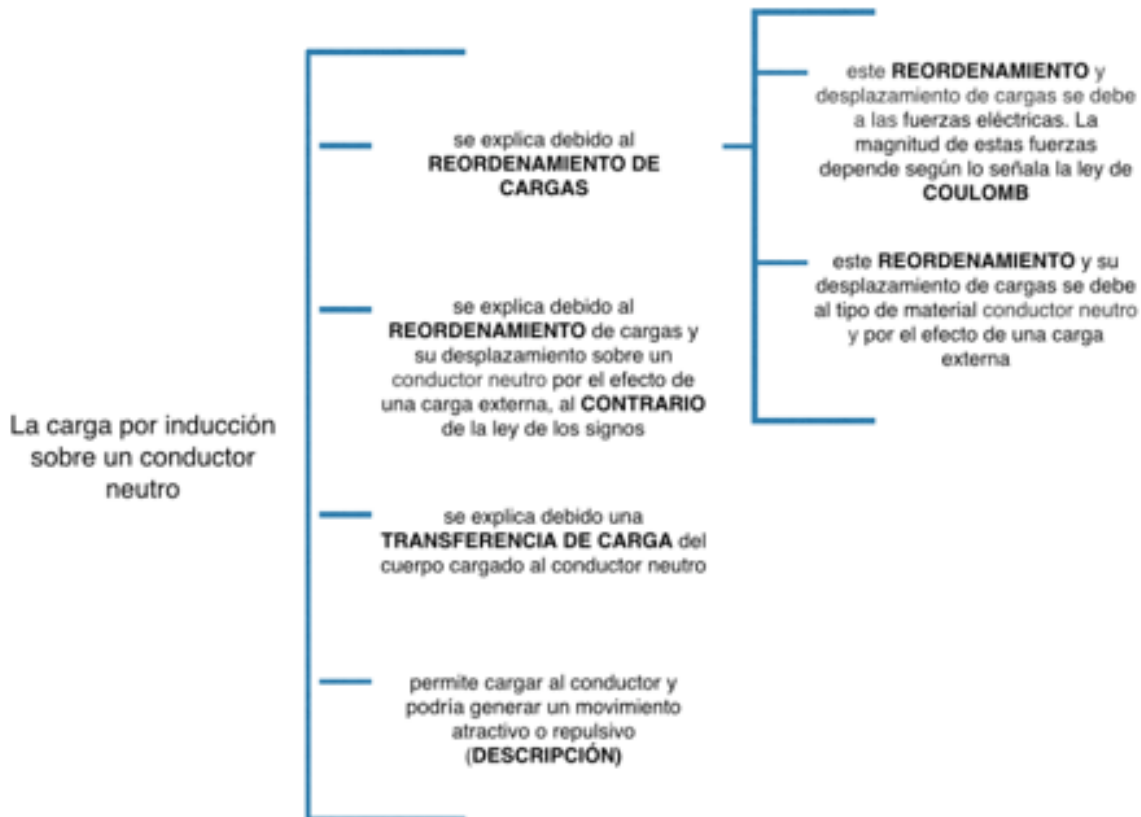


Figura 62 Red Sistémica para la carga por inducción

#### 5.1.1.4 Categorías para las explicaciones sobre carga por contacto

En las respuestas en torno a fenómenos sobre la electrización por contacto se encontraron 5 categorías de respuestas. Primero, se encontró un grupo de ellas que no explica la carga por contacto, sino que sólo hace referencia a la consecuencia final, es decir, al resultado de la operación de la carga por contacto sobre un conductor neutro, en este caso, que este último queda cargado con el mismo signo que el cuerpo que lo carga. A continuación, se presenta un ejemplo de este tipo de respuestas:

“al tener éste (cuerpo cargado) contacto con otra vara metálica, queda cargada con la misma carga de la primera vara” (E7, A3)

A esta categoría de respuestas le llamamos **DESCRIPCIÓN**.

Otro grupo de respuestas se caracterizan por malinterpretar este fenómeno y señalar que la carga por contacto se explica por un proceso de reordenamiento de cargas. Una cita de estas respuestas señala que,

“Luego al tocar la barra de metal las cargas se reordenan y las positivas se acercan a la barra de plástico y las negativas se van al extremo...” (E11, A2)

Este tipo de respuestas las categorizamos bajo el nombre de **REORDENAMIENTO DE CARGAS**.

Un tercer grupo de explicaciones las agrupamos en la categoría **TRANSFERENCIA CONTRARIO**. En ella vemos que los estudiantes se refieren a una transferencia de carga del cuerpo cargado al conductor neutro, pero que la carga que adquiere el conductor es contraria a la transferida. Esta categoría la podemos ver ejemplificada en la siguiente respuesta:

“El generador VDG queda eléctricamente positivo y conduce las cargas negativas del generador al electroscopio. De este modo el electroscopio queda negativo” (E6, A12)

Finalmente tenemos dos grupos que nos señalan que la carga por contacto se produce por una transferencia de carga de un cuerpo cargado a otro neutro, en este caso a un conductor, que queda con el signo de la carga transferida. La distinción entre los dos grupos es que uno señala la distribución de carga sobre el conductor y el otro no. Al grupo que señala la distribución uniforme sobre el conductor se le llamó **UNIFORME** y al que no la señala se le llamó **TRANSFERENCIA DE CARGAS**.

Un ejemplo de la categoría uniforme es:

“Las cargas positivas estarán distribuidas en el sistema (cadena, electroscopio y VDG) completo de manera uniforme...”(E13, A13)

Y de la categoría transferencia de carga:

“Al tocarse se transfieren todas las cargas negativas. Al transferirse habrá más cargas negativas en todo el sistema que positivas” (E8, A9)

A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas a la carga por contacto.



Figura 63 Red Sistémica para la carga por contacto

### 5.1.1.5 Resumen y gradación de las respuestas obtenidas en torno al modelo de distribución e interacción de cargas

Estas categorías que hemos analizado para los cuatro métodos de electrización pueden agruparse, a su vez, a partir de una jerarquía que implique su grado de aproximación al modelo de distribución e interacción de cargas.

Como se menciona en el apartado 4.3.3., se crearon cuatro niveles de adecuación para cada modelo, de modo que las categorías inductivas se agruparon en cada uno de estos niveles.

- Alto, o altamente consistente con el modelo de DIC.
- Medio, mostrando algunas inconsistencias con el modelo de DIC
- Alternativo al modelo de DIC.
- Descriptivo, donde no se ofrece explicación alguna.

A continuación, se muestra la conversión de las categorías inductivas a los niveles de adecuación.

Nivel de adecuación alta al Modelo Científico Escolar	Definición	Frotación	Polarización	Inducción	Contacto
Alto/consistente	Responden usando apropiadamente el modelo de distribución e interacción entre cargas eléctricas.	Transferencia cargando el cuerpo en la zona frotada	Reordenamiento de cargas por dos fuerzas	Reordenamiento de cargas por una fuerza que se mide por la ley de Coulomb	Transferencia cargando el cuerpo de manera uniforme
			Reordenamiento de cargas por una fuerza que se mide por la ley de Coulomb		
			Reordenamiento de cargas por una fuerza		
Medio/algunas inconsistencias	Responden no considerando la distribución de cargas según el material o no utilizan el concepto de fuerza eléctrica para el movimiento o reordenamiento de cargas.	Transferencia cargando el cuerpo de manera total	La polarización se explica debido al reordenamiento o de las cargas de un dieléctrico en función del signo de la carga externa (o cuerpo cargado).	La inducción se explica debido al reordenamiento o desplazamiento de las cargas de un conductor neutro por el efecto de una carga externa.	Transferencia cargando el cuerpo de manera total
Alternativo/inconsistente	Responden con confusión entre transferencia y reordenamiento de cargas o con alguna idea alternativa.	Reordenamiento de cargas	Transferencia de cargas	Reordenamiento de cargas al contrario	Transferencia cargando el cuerpo de manera contraria
		Creación de cargas		Transferencia de cargas	Reordenamiento de cargas
Descriptivo	Responde describiendo el fenómeno electrostático sin aportar una explicación.	Descripción ( <i>se frota y se carga</i> )	Descripción ( <i>se atraen</i> )	Descripción ( <i>se atraen</i> )	Descripción ( <i>se tocan y se cargan</i> )

**Tabla 10** Equivalencia para las categorías inductivas con los niveles de adecuación al modelo de distribución e interacción de cargas

## 5.1.2 Tipología explicaciones identificadas basadas en el modelo de campo eléctrico

### 5.1.2.1 Categorías para las explicaciones sobre la naturaleza de la interacción entre cargas

Para las respuestas donde se problematiza sobre la interacción entre cargas, se obtuvieron tres grupos de respuestas.

El primer grupo sólo describe el resultado de la experimentación. A esta categoría le llamamos **DESCRIPCIÓN** y un ejemplo de ella es,

“los hilos reordenan sus cargas y atraen la zona más negativa y repelen zona positiva. Además, se alinean con las líneas de campo eléctrico” (E9, A19)

La segunda categoría se denomina **ALTERNATIVAS**, que se caracteriza por fundar la explicación en alguna(s) idea(s) alternativa(s) para justificar la interacción entre cargas. Un ejemplo de este tipo de respuestas es,

“el VDG emite cargas positivas por lo tanto la corriente de convección hacia afuera. Por lo que la pelota se moverá hacia el generador...” (E2,A14)

La tercera categoría de respuestas fue denominada **ACCIÓN A DISTANCIA**, pues la interacción entre cargas eléctricas se explica por la fuerza que ejerce una carga sobre otra. Una cita de esta categoría es,

“dada la carga del VDG, ... , las pelotas de plumavit que están neutras son atraídas por las cargas del VDG por una fuerza” (E4, A14)

La última categoría de respuestas encontradas son las que hacen referencia a la presencia de un campo eléctrico para explicar la interacción entre cargas. Un ejemplo de esta categoría es,

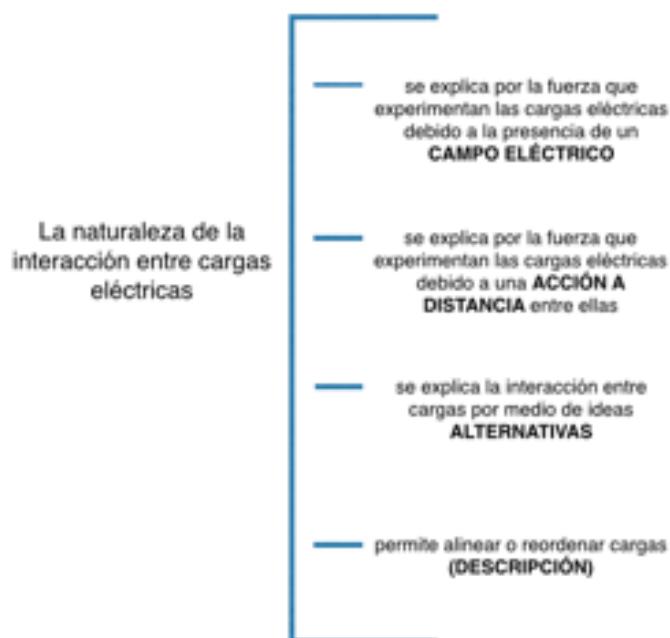
“En los dipolos cercanos a la carga central (electrodo cargado) existe una mayor intensidad de campo, en comparación con aquellos que están más lejos. Así, los hilos se alinean, pero en la medida que se alejan (dipolos más lejanos) tienden al desorden (no tan alineados) debido a que disminuye la intensidad de campo y por tanto la fuerza sobre ellos (dipolos)” (E45, A20)



Antes de establecer esta categoría, las respuestas estaban divididas en tres categorías que luego se redujeron a una. La primera de estas señalaba que el campo ejerce fuerza sobre otras cargas, la segunda que el campo generado es capaz de alinear las cargas, y la última que el campo ejerce la fuerza sobre las cargas considerando el valor de la intensidad de campo en diferentes puntos, como en el ejemplo. Luego de analizar y reflexionar sobre ellas, concluimos que estas respuestas tienen una misma naturaleza y que son muy diferentes a las que hablan de una acción a distancia ya que no consideran la idea de campo eléctrico.

Finalmente, este tipo de respuestas las categorizamos bajo el nombre de **CAMPO ELÉCTRICO**. En este grupo podemos ver que existe un reconocimiento del concepto de campo eléctrico como región del espacio y que este ejerce fuerza sobre las cargas. La magnitud de la fuerza está en función de su intensidad en cada punto, que en el caso presentado varía con la distancia a partir del electrodo generador de campo.

A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas a la naturaleza de la interacción entre cargas.



**Figura 64** Red Sistémica para la naturaleza de la interacción entre cargas

### 5.1.2.2 Categorías para las explicaciones sobre el significado de las Líneas de Campo Eléctrico

Las respuestas de los estudiantes sobre las líneas de campo eléctrico fueron categorizadas en cuatro grupos. Un grupo de respuestas refleja la idea de que las líneas de campo son una entidad física y que se puede describir por medio de convenciones, como por ejemplo que las líneas de campo de una carga puntual positiva salen de manera radial.

“no es una línea de campo, ya que el sentido que tiene el campo eléctrico es de una carga positiva a la negativa y está sería inversa” (E4, A22)

La idea de que las líneas son una entidad física no es una noción poco común entre los estudiantes. Algunos estudiantes se refieren a las líneas como si fueran parte del fenómeno o la misma perturbación del medio, o como si interactuaran con las cargas, con otro campo, etc.

“... la A (la línea) esta opuesta a la dirección del campo y la C (otra línea) no interactúa con el campo...” (E2, A22)

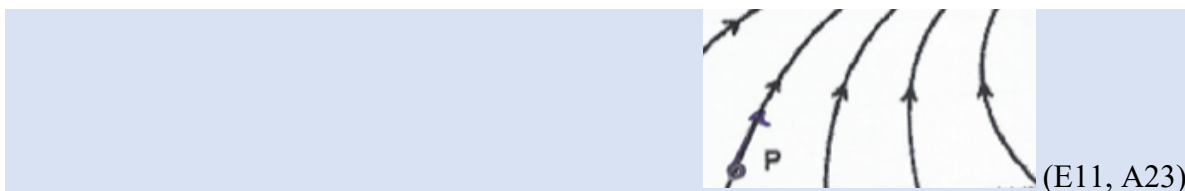
A esta categoría de respuestas le llamamos **DESCRIPCIÓN** por no presentar ninguna relación entre conceptos y alejarse de la definición de representación que tienen las líneas de campo o de fuerza.

El siguiente grupo de respuestas propone que las líneas de campo eléctrico son líneas de trayectorias que seguiría una carga eléctrica sobre ellas. En las respuestas encontramos que los estudiantes interpretan que la carga positiva sigue el sentido de la línea de campo y que la carga negativa haría lo mismo, pero en sentido contrario. Sin embargo, nos parece más interesante en general considerar que puede ser una mala interpretación de cómo los conceptos de fuerza, aceleración y velocidad se articulan para predecir una trayectoria que no corresponde a las líneas de campo, salvo cuando es en una dimensión. A esta categoría la nombramos **TRAYECTORIA**. Un ejemplo de respuesta es:

“las líneas de campo son los caminos por donde viajan las cargas...” (E26, A21)

El tercer grupo de respuestas explica que las líneas marcan la dirección y sentido de la fuerza eléctrica. En la siguiente imagen vemos cinco líneas de campo eléctrico. Sobre esta

imagen se les solicita a los estudiantes dibujar el vector fuerza sobre una carga de prueba en el punto “P”. A esta categoría de respuestas la nombramos **FUERZA**.



La última categoría para las líneas de campo eléctrico corresponde a respuestas que contienen las ideas del modelo, es decir, la verdadera representación que cumplen las líneas en este contexto. A este grupo de respuestas se le llamó **TANGENTE**. En la siguiente imagen se puede ver que él o la estudiante dibuja el vector fuerza en un punto tangencial a la línea.



A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas a las líneas de campo eléctrico.



Figura 65 Red Sistémica para las líneas de campo eléctrico

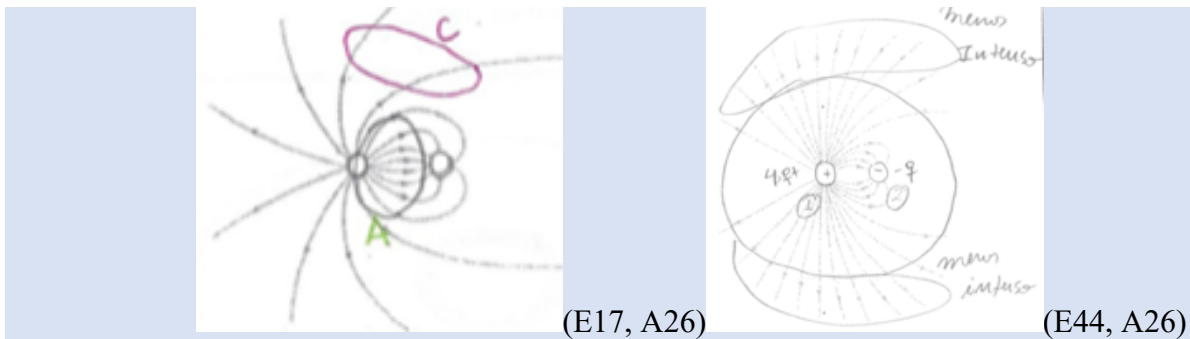
### 5.1.2.3 Categorías para las explicaciones sobre el significado de la densidad de líneas de campo eléctrico

Para el significado de la densidad de líneas de campo eléctrico, encontramos tres tipos de respuestas. Dos de estas categorías no consideran que la densidad de las líneas represente algo importante. Para referirse a la magnitud de intensidad de campo eléctrico usan la variable distancia o la existencia de líneas. A las respuestas que emplean la idea de que la intensidad de campo eléctrico varía con la distancia, sin considerar la densidad de las líneas, le llamamos **POSICIÓN**. La siguiente es una cita que ejemplifica esta categoría:

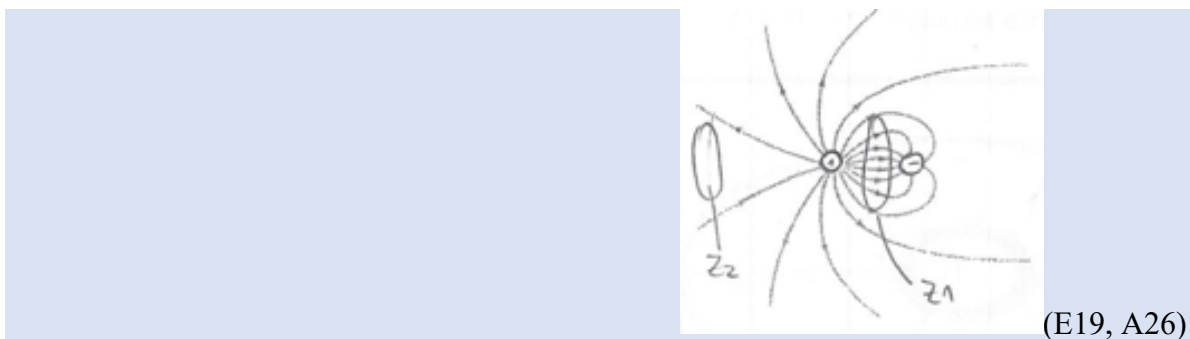
“si ponemos una carga positiva en A, la placa la atraerá y el objeto la repelerá con más fuerza porque se encuentra más cerca” (E29, A25)

La cita es una respuesta dada tras mostrar a los estudiantes una imagen de un campo constante, más específicamente, la representación de un campo eléctrico entre dos placas cargadas paralelas. En este contexto, el ejemplo ilustra que aún persiste la idea de la posición para hablar de la intensidad de campo eléctrico.

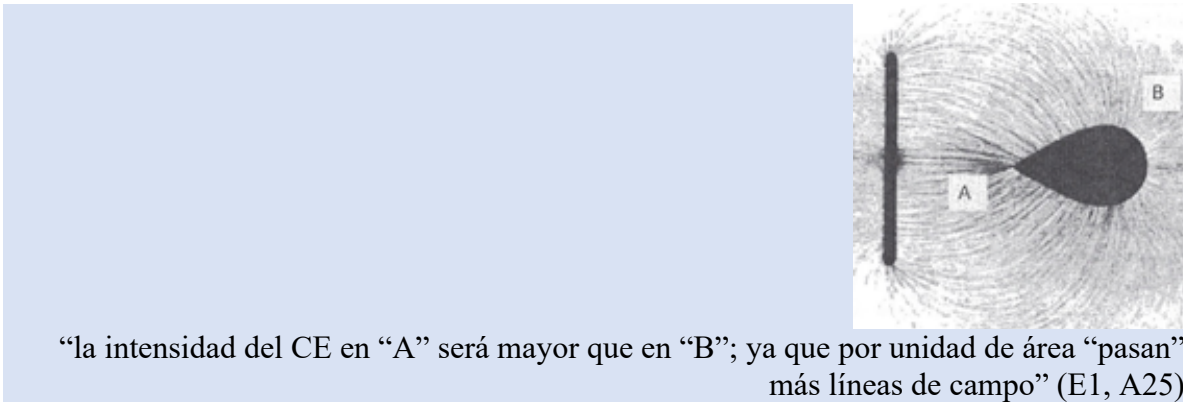
El otro grupo que no considera la densidad de líneas en sus respuestas señala que la intensidad de campo eléctrico puede ser mayor o menor en función de la separación de las líneas de campo. De esa manera, puede parecer que hablan de densidad de líneas de campo para referirse a la intensidad, pero tras una revisión extensa, pudimos interpretar que la afirmación anterior se da sólo cuando observan dónde hay o no hay líneas de campo para relacionarlas con la intensidad. A esta categoría le llamamos **LÍNEAS**. Tanto los dibujos como las citas presentadas a continuación son ejemplos de esta categoría:



La última categoría de respuestas sobre la densidad de líneas sí considera la densidad como una representación de la intensidad del campo eléctrico en cada punto y ha sido denominada **PROPORCIONAL**. En el siguiente ejemplo de la categoría se evidencia el contraste con los dibujos presentados en el grupo anterior:



El siguiente dibujo representa otra respuesta de esta categoría ante otra actividad de la SEA.



A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas a la densidad de líneas de campo eléctrico.

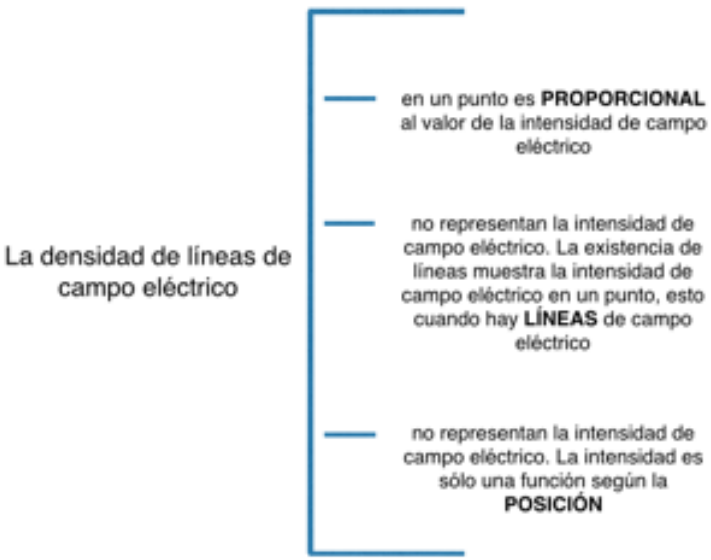


Figura 66 Red Sistémica para la densidad de líneas de campo eléctrico

**5.1.2.4 Resumen y gradación de las respuestas obtenidas entorno al modelo de campo eléctrico**

Este conjunto de categorías que hemos analizado para la naturaleza de la interacción y del significado de la representación de un campo eléctrico, pueden agruparse a partir de una jerarquía que implique su grado de aproximación al modelo de campo eléctrico.

Igual como se ha hecho para el apartado 5.1.1.5, y tal y como se menciona en el apartado 4.3.3, se crearon cuatro niveles de adecuación para cada modelo, de modo que las categorías inductivas se agruparon en cada uno de estos niveles.

- Alto, o altamente consistente con el modelo de CE.
- Medio, mostrando algunas inconsistencias con el modelo de CE
- Alternativo al modelo de CE.
- Descriptivo, donde no se ofrece explicación alguna.

Cabe señalar, que esta vez el nivel “Descriptivo” no se ha usado para la Categorías para las explicaciones sobre el significado de la densidad de líneas de campo eléctrico, debido a la propia naturaleza de la pregunta.

A continuación, se muestra la conversión de las categorías inductivas a los niveles de adecuación.

Nivel de adecuación alta al Modelo Científico Escolar	Definición	Naturaleza de la Interacción entre cargas	Líneas de Campo eléctrico	Densidad de líneas de campo eléctrico
Alto/consistente	Responden usando apropiadamente el modelo electrostático de campo eléctrico.	El campo ejerce fuerza sobre una carga	La fuerza sobre la carga de prueba es tangente a la línea de campo eléctrico	La densidad de líneas representa la intensidad de campo eléctrico en un punto
Medio/algunas inconsistencias	Responde usando un modelo de interacción a distancia.	Una carga ejerce fuerza sobre otra por acción a distancia	La fuerza sobre la carga corresponde al sentido de la línea	La intensidad de campo eléctrico depende de la distancia
Alternativo/inconsistente	Responde con ideas alternativas en torno al campo y su representación.	Ideas alternativas sobre campo eléctrico	La línea es una trayectoria de carga	La intensidad de campo se puede observar si existen líneas
Descriptivo	Responde describiendo el fenómeno electrostático.	Descripción ( <i>se atraen, se alinean</i> )	Descripción ( <i>positivas salen, negativas entran, las líneas interactúan</i> )	-

**Tabla 11** Equivalencia para las categorías inductivas con los niveles de adecuación al modelo del modelo de campo eléctrico y su representación

### 5.1.3 Tipología explicaciones identificadas basadas en la combinación entre el modelo de distribución e interacción de cargas y el modelo de campo eléctrico

#### 5.1.3.1 Categorías para las explicaciones sobre el efecto de la jaula de Faraday

El proceso por el cual se llegó a las categorías finales de las respuestas en torno al efecto de la jaula de Faraday fue complejo, ya que hubo que redefinir muchas veces el foco del análisis. Se llegó a tener hasta diez categorías de respuestas. Luego, haciendo un análisis más fino, pudimos concentrarlas en cuatro categorías oficiales, de entre las cuales solo **EQUILIBRIO ELECTROSTÁTICO** y **DESCRIPCIÓN** estuvieron claramente definidas desde el comienzo del análisis.

La categoría **DESCRIPCIÓN** reúne las respuestas que no contienen elementos explicativos del efecto en cuestión. Estas respuestas tienden a responder sólo a la pregunta ¿qué pasará si?, con respuestas tipo: “*no pasa nada*”. Es decir, manifiestan la posible consecuencia del efecto de la jaula de Faraday. Una cita de esta categoría es:

“el electroscopio (que está en el interior de una jaula) no se moverá” (E17, A16)

La categoría **MOVIMIENTO DE CARGA**, proviene de la fusión de cinco categorías previas. Todas las respuestas de estas 5 categorías tienen en común que hacen referencia al movimiento de las cargas de la jaula, pero no presentan una explicación para la nula interacción interna. A continuación, se presentan 5 ejemplos de tipos de respuestas que constituyen la categoría **MOVIMIENTO DE CARGA**

“el VDG está positivo e induce la jaula de forma que la cara más cercana queda negativa y más lejana positiva y lo demás neutro, por inducción contraria, dejando el electroscopio neutro” (E5, A16)

En este primer ejemplo, el o la estudiante hace referencia a una doble inducción. Es decir, que la jaula se induce y vuelve a inducir a los elementos internos, generando una nula interacción interna.

“...por lo que produce un reordenamiento de las cargas de manera más rápida por lo que no interactúa con el electroscopio” (E30, A17)



En este segundo ejemplo, quien responde considera que no es posible establecer un campo que pueda interactuar con los elementos al interior de la jaula (un electroscopio) debido a que cree que las cargas eléctricas de la jaula se encuentran en un intenso movimiento.

“La jaula recibe toda la carga por lo que al estar en contacto con el suelo se descarga a tierra” (E30, A16)

En el ejemplo anterior, el o la estudiante cree que, debido a que la jaula es conductora, funciona como un cable a tierra, por lo que nunca se carga, lo que le lleva a concluir que no habrá interacción en su interior.



En el caso de esta respuesta ilustrada por el o la estudiante, se demuestra un razonamiento en torno a la idea de que, producto de la interacción de las cargas con el campo externo, estas presentan una disposición externa, lo que genera un campo dirigido hacia fuera de la jaula. Por lo tanto, no existe un campo eléctrico que interactúe con el interior.

“la jaula actúa como conductor, cargándose y generando que, en su centro, la sumatoria de las fuerzas o de los campos sea 0” (E20, A17)

En este último ejemplo, el o la participante cree que debido a la interacción de las cargas con el campo externo, estas se desplazan generando una fuerza nula sólo en el centro de la jaula, debido a que todas están a la misma distancia.

La tercera categoría de este grupo de fenómenos tiene como elemento central el papel que juega la materialidad de la jaula, por sobre sus propiedades eléctricas. Es decir, se explica la nula interacción interna debido a que creen que la jaula puede ser protectora o amplificadora de influencias externas. A esta categoría le llamamos **JAULA**. Una cita de esta categoría es la siguiente.

“La jaula actuará como escudo para el electroscopio con relación al campo eléctrico (externo). Esto debido a que el campo chocará con la rejilla. (E14, A16)

“Debería suceder que el electroscopio se cargue más debido a la inducción de las cargas de la jaula por varios lados” (E41, A16)

La última categoría fue denominada **EQUILIBRIO ELECTROSTÁTICO** y corresponde a las respuestas que contemplan lo que plantea el modelo esperado: que, debido a la presencia de un campo eléctrico externo, las cargas de la jaula se distribuyen de tal manera que generan un campo eléctrico contrario, dando como resultado que el campo sea nulo al interior de la jaula en todos los puntos. Un ejemplo de respuesta para esta categoría es el siguiente:

“al ser la jaula de metal (conductora) se carga y genera un campo eléctrico igual de intenso que el del VDG pero al contrario, por lo que dentro de la jaula el campo eléctrico es cero, por lo que existe un equilibrio” (E1, A18)

A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas al efecto de la jaula de Faraday.

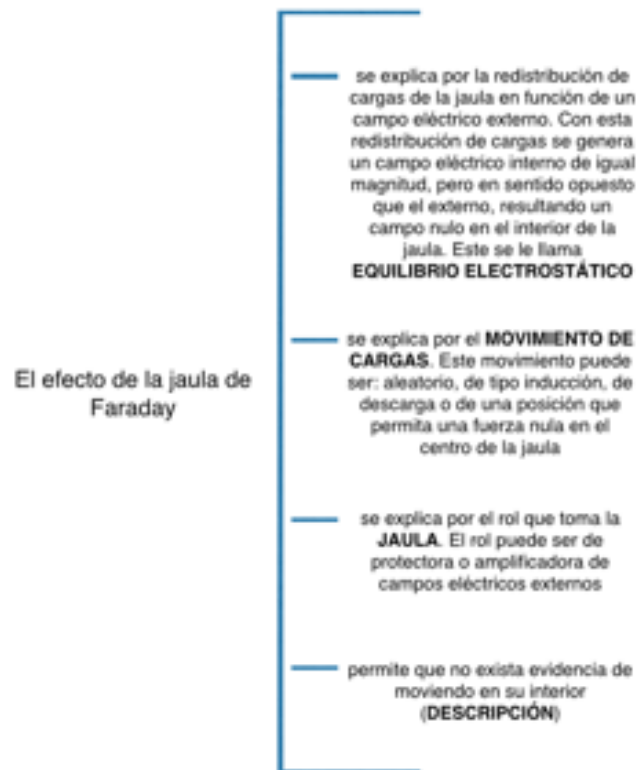


Figura 67 Red Sistémica para el efecto de la jaula de Faraday

### 5.1.3.2 Categorías para las explicaciones sobre el efecto punta

Para estas respuestas encontramos cuatro tipos de categorías. El primer grupo corresponde al que llamamos **DESCRIPCIÓN**, en el cual los estudiantes exponen una afirmación sobre lo que piensan que va a ocurrir, sin una explicación donde se explicita la relación entre conceptos. Se exponen dos ejemplos que, además de no explicar el fenómeno, se contraponen:

“...generará una inducción de mayor magnitud sobre el electroscopio, en cambio, con el mayor radio inducirá con menos intensidad” (E25, A24)

“El lado con radio más grande moverá más al electroscopio” (E26, A24)

Al siguiente grupo le llamamos **FORMA DEL CONDUCTOR**, debido a que las respuestas hacen referencia a la asimetría del conductor como principal elemento responsable del fenómeno:

“esto depende de la forma de la figura ya que tener una menor superficie la carga es más intensa” (E22, A24)

Otro grupo de respuestas recibió el nombre de **NO UNIFORME**, pues incluyen la idea de que hay una mayor cantidad de cargas acumuladas en diferentes partes de un conductor.



“Hay más cargas en el lado izquierdo que en el derecho” (E23, A27)

En el último grupo, que lleva por nombre **EQUIPOTENCIAL**, es posible detectar las ideas del modelo esperado, pues relacionan la superficie equipotencial de un conductor y su consecuencia al tener asimetría o radios diferentes. Estas respuestas guían hacia una secuencia de eventos que permite hablar de intensidad de campo eléctrico en función de la densidad de cargas eléctricas, por ejemplo:

“debido a que la intensidad de campo eléctrico aumenta cuando el radio disminuye, debido a que para mantener el potencial constante la densidad de carga debe aumentar” (E29, A27)

A continuación, se muestra una red sistémica que resume los tipos de categorías para las respuestas asociadas al efecto punta.

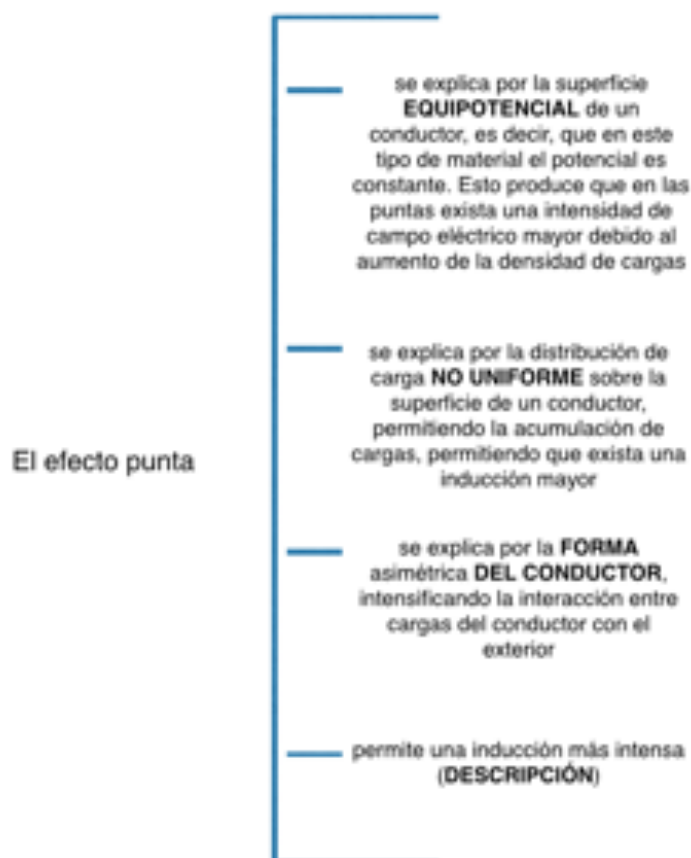


Figura 68 Red Sistémica para el efecto punta

### 5.1.3.3 Resumen y gradación de las respuestas obtenidas entorno al modelo de campo eléctrico

Este conjunto de categorías que hemos analizado para el efecto de la jaula de Faraday y del efecto Punta, pueden agruparse a partir de una jerarquía que implique su grado de aproximación al modelo híbrido, siguiendo el mismo procedimiento que para los apartados anteriores. Así, de nuevo se usaron cuatro niveles de adecuación para cada modelo: “Alto/consistente”, “Medio/algunas inconsistencias”, “Alternativo/inconsistente” y “Descriptivo”. Las categorías inductivas se agruparon en cada uno de estos niveles.

A continuación, se muestra la conversión de las categorías inductivas a los niveles de adecuación.

Nivel de adecuación alta al Modelo Científico Escolar	Definición	Jaula de Faraday	Efecto Punta
Alto/consistente	Responde relacionando las cargas eléctricas y el campo que se obtiene de esa distribución.	Equilibrio Electrostático	Superficie equipotencial
Medio/algunas inconsistencias	Responde no señalando una relación entre las cargas y el campo eléctrico.	Entorno al movimiento de las cargas	Distribución de carga no uniforme
Alternativo/inconsistente	Responde refiriéndose al efecto que puede producir el material y su geometría.	Referencia al efecto de la Jaula	El efecto se explica por la forma asimétrica del conductor
Descriptivo	Responde describiendo el fenómeno electrostático.	-	Descripción ( <i>induce más por el radio mayor, induce más por el radio menor</i> ).

**Tabla 12** Equivalencia para las categorías inductivas con los niveles de adecuación para el Modelo Híbrido

## 5.2 Evolución de las explicaciones en las respuestas de los estudiantes a lo largo de la SEA.

En los siguientes apartados se presenta la evolución de las respuestas de los estudiantes ordenadas por tipo de explicación, siguiendo el mismo orden que en el apartado 5.1. En primer lugar, se muestra la evolución de las ideas del modelo de distribución e interacción de cargas (frotación, polarización, inducción, contacto). En segundo lugar, se encuentran las ideas del modelo de campo eléctrico (naturaleza de la interacción, líneas de campo eléctrico, densidad de líneas de campo eléctrico). Finalmente, se presentan las ideas del modelo híbrido (efecto de la jaula de Faraday y efecto punta).

### 5.2.1 Evolución de las explicaciones asociadas al modelo de distribución e interacción de cargas

#### 5.2.1.1 Evolución de las explicaciones de la carga por frotación

La carga por frotación se trabajó en tres actividades de la primera sesión de la secuencia: 1, 4 y 5. La tabla 13 ilustra el recuento de los tipos de respuesta de los estudiantes para cada actividad.

Categorías/Actividad	1	4	5
TRANSFERENCIA ZONA	1 (1,49%)	9 (13,43%)	5 (7,46%)
TRANSFERENCIA TOTAL	25 (37,31%)	13 (19,40%)	4 (5,97%)
REORDENAMIENTO	19 (28,35%)	3 (4,48%)	0 (0,00%)
CREACIÓN	2 (2,99%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
DESCRIPCIÓN	9 (13,43%)	26 (38,81%)	45 (67,16%)
NO CONTESTA	11 (16,42%)	16 (23,88%)	13 (19,40%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)

**Tabla 13** Evolución de las explicaciones para la carga por frotación. Se remarcan los valores más altos

La tabla 13 muestra que, inicialmente, hay una diversidad de ideas presentes en las respuestas de los estudiantes, que luego se distribuyen entre las categorías de transferencia y descripción, para finalmente concentrarse en descripciones. También se observa que las categorías de reordenamiento y creación desaparecen a lo largo de las actividades. Con respecto a las categorías de transferencia, se observa una disminución de la de tipo total,

mientras que en la de tipo parcial (transferencia zona) no existe una tendencia clara, ya que inicialmente aumenta, para luego disminuir.

En la actividad 1, las respuestas de los estudiantes se concentran entre las categorías de transferencia total (37,31%) y reordenamiento de cargas (28,35%). Además, vemos que once respuestas se reparten entre la creación de cargas (2,99%) y la descripción (13,43%). Es preocupante ver que un 44,77% de las respuestas refleja un desconocimiento sobre el proceso de la electrización por fricción o frotación, contra un 38,80% que sí entiende que el proceso se debe por una transferencia de carga. Este hallazgo invita a revisar el programa de los cursos impartidos en años anteriores, que construyen los conocimientos básicos para la comprensión de esta asignatura.

Luego, en la actividad 4 desaparece la idea de creación de cargas tal como reportan Furió y Guisasola (1998a) en su investigación. En este contexto la noción de reordenamiento disminuye a un 4,48% y el concepto de transferencia de carga en la zona aumenta a un 13,43%. Este cambio, se debe en parte a que entre las actividades 1 y 4 se trabajó sobre la diferencia entre materiales conductores y dieléctricos (actividades 2 y 3), sobre la carga por contacto, la que también implica una transferencia de cargas, y sobre las ideas principales de la electrostática como por ejemplo, la conservación de la carga.

Al finalizar la primera sesión de la secuencia, en la actividad 5, se presenta una disminución de las ideas de transferencia llegando a un 13,43% (entre ambas categorías) y un alza muy considerable de las descripciones (67,16%).

Posiblemente, la alta presencia de descripciones al final de la sesión se deba a la necesidad de usar simultáneamente la frotación y la polarización para explicar el fenómeno. En este sentido, se observa que la carga por frotación pierde nivel de detalle mientras que la polarización y la consecuente atracción entre dos dieléctricos gana en detalle (ver el aumento en polarización en el apartado 5.2.2.2)

Otra posible explicación es que los estudiantes hayan preferido detallar la causa del movimiento real de un objeto, en desmedro de lo que ocurre microscópicamente para que se inicie el movimiento; o que desconozcan el comportamiento de las cargas eléctricas en los materiales dieléctricos (Park, 2001). También es una posibilidad que consideren

innecesario explicar tres veces algo que creen que ya saben y reconocen, y prefieren detallar algo que están aprendiendo a medida que avanza la sesión. Esta última hipótesis encuentra sustento en la evidencia de que sólo cuatro estudiantes suben su nivel explicativo gradualmente, desde la actividad 1 a la 5. La mayoría de quienes incluyen la transferencia de zona en su respuesta en la actividad 4 no vuelven a hacerlo explícitamente en la 5.

### 5.2.2.2 Evolución de las explicaciones de la carga por polarización

La polarización de un dieléctrico se analizó en siete actividades a lo largo de la secuencia: 1, 4, 5, 14, 15, 19 y 20. La tabla 14 ilustra el recuento de las respuestas de los estudiantes por cada categoría sobre la polarización.

Categorías/Actividad	1	4	5	14	15	19	20
DOS FUERZAS	0 (0,00%)	1 (1,49%)	13 (19,40%)	4 (5,97%)	12 (17,91%)	8 (11,94%)	21 (31,34%)
COULOMB	0 (0,00%)	7 (10,45%)	18 (26,87%)	15 (22,39%)	39 (58,21%)	1 (1,49%)	5 (7,46%)
FUERZA	6 (8,96%)	6 (8,96%)	8 (11,94%)	3 (4,48%)	1 (1,49%)	22 (32,84%)	6 (8,96%)
REORDENAMIENTO	23 (34,33%)	15 (22,39%)	7 (10,45%)	7 (10,45%)	4 (5,97%)	14 (20,90%)	11 (16,42%)
CONTACTO	1 (1,49%)	5 (7,46%)	0 (0,00%)	3 (4,48%)	0 (0,00%)	5 (7,46%)	2 (2,99%)
DESCRIPCIÓN	27 (40,30%)	18 (26,87%)	8 (11,94%)	28 (41,79%)	6 (8,96%)	9 (13,43%)	7 (10,45%)
NO CONTESTA	10 (14,93%)	15 (22,39%)	13 (19,40%)	7 (10,45%)	5 (7,46%)	8 (11,94%)	15 (22,39%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)

**Tabla 14** Evolución de las explicaciones de la carga por polarización. Se remarcan los valores más altos

A medida que se avanza en las actividades 1, 4 y 5, se observa que la categoría de descripción tiende a bajar, mientras que aparece la mención a las fuerzas involucradas y al reordenamiento. Luego, en la actividad 14, la primera de esta temática en la tercera sesión, los estudiantes comienzan sus respuestas ya incorporando las fuerzas involucradas pero con un alto nivel de descripciones. En la siguiente actividad, 15, aumenta la presencia de las fuerzas y disminuyen las descripciones. Este mismo patrón se repite en el paso de las actividades 19 a la 20, llegando a una explicación final que ha mejorado en cuanto a sus detalles. Con respecto a la categoría del contacto, no existe una tendencia clara, ya que aumenta y disminuye a medida que progresan las actividades.

Las respuestas de la actividad 1 se distribuyen en su mayoría entre el reordenamiento (34,33%) y las descripciones (40,30%). Esto implica que, al preguntar por un fenómeno de



atracción que involucra la polarización por primera vez, aparentemente los estudiantes atribuyen una propiedad atractiva a los cuerpos cargados, encapsulando en esta propiedad todo el proceso de polarización y la acción de las fuerzas de atracción y repulsión. En esta actividad también hay una respuesta que considera que la polarización se da debido a un contacto entre dieléctricos, demostrando una confusión entre los procesos de transferencia y reordenamiento. El mayor nivel de detalle alcanzado por las respuestas de los alumnos corresponde a la categoría de fuerza, donde se encuentran seis respuestas que involucran ideas del modelo pero que no son completas.

Luego, en la actividad 4, las respuestas que involucran el proceso de reordenamiento se elevan hasta un 43,29%, para luego aumentar a un 68,66% en la actividad 5. A medida que crece la cantidad de respuestas que aluden a las fuerzas involucradas, disminuyen aquellas en las categorías de reordenamiento simple y descripciones. En la actividad 4 aumentan las ideas de contacto, posiblemente debido a que los estudiantes se focalizan en el contacto entre el globo y la pared y no en cómo se desarrolla el proceso de atracción entre el globo y la pared. Un ejemplo de respuesta de esta categoría es la del estudiante 34: *“al acercar (globo con la pared), la zona de frotación comienza a ceder electrones a la pared y la pared reordena un poco sus cargas. Como el globo está en contacto este reordena las cargas de la zona de contacto con la pared permitiendo su atracción”* (E34,A4).

Al pasar a la actividad 5 y cambiar el montaje en que se presenta el fenómeno, las respuestas que incluyen la idea de contacto disminuyen a cero tras la explicación del profesor, que favoreció la corrección de este razonamiento erróneo (ver 5.3). Dicha explicación incluyó la formalización de la carga por contacto y la ley de Coulomb. Este mismo diseño de clase promovió que un 19,40% de los estudiantes alcanzara el máximo nivel esperado de respuesta.

Al cambiar a la sesión 3, en la actividad 14, se observa que la mayoría de las respuestas se distribuyen entre un 43,29% de respuestas que incorporan la idea de reordenamiento, y un 41,79% que se ubican en la categoría de descripciones. Por lo tanto, más de un 40,00% de los estudiantes ya comienza la sesión con respuestas más cercanas a la esperada, a diferencia de lo que ocurrió en la primera sesión. Con respecto al grupo de estudiantes que se encuentra en la categoría de descripciones, es necesario considerar que una respuesta

descriptiva no necesariamente implica que el estudiante no comprende el fenómeno, sino que podría significar que no comprende la pregunta y, por ende, reduce su respuesta a conceptos aislados y observables. Por otra parte, existe además un porcentaje menor (4,48%) de respuestas que involucran la noción de contacto para hablar de polarización en esta actividad.

En la respuesta mejorada del mismo montaje, correspondiente a la actividad 15, las categorías del reordenamiento aumentan hasta llegar a un 83,58% y las de descripciones se reducen a un 8,96%. En esta instancia ya no existen respuestas de la categoría de contacto. Varios factores se conjugan para el resultado de esta actividad: el haber podido predecir y observar el fenómeno a analizar permite a los estudiantes desechar o validar sus hipótesis, y la discusión en conjunto con el profesor ayudó a complementar sus respuestas. Este último punto será desarrollado en mayor profundidad en la sección 5.3.

Esta tendencia se mantiene en general para las actividades 19 y 20. Sin embargo, hay una leve disminución en el nivel de detalle de las respuestas que presentan la idea de reordenamiento y un leve aumento en aquellas que incorporan la idea de contacto. Esto puede deberse al cambio de montaje experimental, que podría invitar a un razonamiento de carga por contacto en vez de acción a distancia o a través de campo, tema que será desarrollado en la sección 5.3. A pesar de esto, es importante destacar que al final de la serie de actividades un 31,34% de los estudiantes alcanzó el máximo grado de detalle esperado en sus respuestas, y un 64,18% ya incorpora la noción de reordenamiento en su lógica explicativa.

### 5.2.2.3 Evolución de las explicaciones sobre la carga por inducción

La carga por inducción sobre un conductor se analizó en siete actividades a lo largo de la secuencia: las actividades 6, 7, 8, 12 y 13 de la segunda sesión, y las actividades 16 y 17.

La tabla 15 ilustra el recuento de las respuestas de los estudiantes por cada categoría.

Categorías/Actividad	6	7	8	12	13	16	17
REORD COULOMB	18 (26,87%)	51 (76,12%)	53 (79,10%)	1 (1,49%)	48 (71,64%)	3 (4,48%)	1 (1,49%)
REORDENAMIENTO	34 (50,75%)	6 (8,96%)	3 (4,48%)	8 (11,94%)	7 (10,45%)	21 (31,34%)	56 (83,58%)
REORD CONTRA	3 (4,48%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	1 (1,49%)	4 (5,97%)
TRANSFERENCIA	6 (8,96%)	2 (2,99%)	0 (0,00%)	48 (71,64%)	2 (2,99%)	3 (4,48%)	1 (1,49%)
DESCRIPCIÓN	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	3 (4,48%)	2 (2,99%)	34 (50,75%)	0 (0,00%)
NO CONTESTA	6 (8,96%)	8 (11,94%)	11 (16,42%)	7 (10,45%)	8 (11,94%)	5 (7,46%)	5 (7,46%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)

**Tabla 15** Evolución de las explicaciones de la carga por inducción. Se remarcan los valores más altos

A diferencia de los fenómenos analizados anteriormente, en este caso, la mayoría de las respuestas de los estudiantes se agrupan desde el inicio en las categorías que se acercan más a la respuesta esperada, que en este caso son aquellas que involucran el reordenamiento. Existen dos posibles explicaciones para esta tendencia: que los estudiantes ya conocieran la idea trabajada anteriormente, o que lo aprendido en la sesión anterior (carga por frotación, polarización, contacto y distinción entre material dieléctrico y conductor) facilitó su comprensión del nuevo fenómeno.

Por otra parte, la tendencia a mantener respuestas cercanas a la esperada se mantuvo constante entre las actividades 6, 7 y 8, donde el porcentaje de respuestas que hacen alusión al reordenamiento nunca baja del 75,00%, llegando incluso un 79,10% al máximo nivel de detalle en la actividad 8. También es importante destacar que, tras la explicación del profesor, no solo se alcanza este resultado favorable, sino que también desaparecen las explicaciones que contienen ideas inapropiadas para explicar el fenómeno, como el reordenamiento en contra y la transferencia.

En las tres actividades iniciales - que involucran el mismo montaje - no hubo respuestas clasificadas en la categoría de descripción. Esto puede deberse a que la forma en que se

presentó el experimento, mediante una secuencia de etapas, ayudó a que los estudiantes incluyeran más detalles en sus explicaciones en vez de presentar una visión global del fenómeno.

Luego, en la actividad 12, al cambiar de montaje, se observa que aumenta la cantidad de respuestas que involucran la transferencia como proceso para explicar el fenómeno observado y disminuye la presencia de la inducción en las explicaciones de los estudiantes. Una posible explicación para esta tendencia es que el nuevo montaje, que consiste en un electroscopio unido a un generador de Van der Graaff (VDG), involucra dos procesos (inducción y contacto), lo que podría significar un aumento en la dificultad de la tarea. Otra potencial causa es que este montaje atraiga la atención de los estudiantes hacia la unión de los dos cuerpos, concentrando el foco de análisis en la transferencia de carga (carga por contacto) en vez de observar los diferentes procesos que ocurren en el experimento, como la inducción. Tras la explicación del profesor, quien además guía la atención de los estudiantes hacia lo que necesitan observar para alcanzar la respuesta óptima, las respuestas que involucran la inducción vuelven a aumentar y aquellas que apelan a la transferencia disminuyen. Esta secuencia de los resultados muestra que los estudiantes tuvieron dificultades para transferir sus conocimientos a un nuevo contexto, sin embargo, tras la explicación del profesor vuelven rápidamente a alcanzar el nivel demostrado en las actividades anteriores.

Finalmente, en la actividad 16, que consiste en explicar el fenómeno de la jaula de Faraday por primera vez, se observa el mismo patrón: la mayoría de las respuestas se distribuyen entre las que explican el fenómeno con los elementos del reordenamiento (35,82%) y las que lo describen (50,75%). También se presentan en menor porcentaje algunas ideas que no corresponden a la explicación esperada como el reordenamiento al contrario (1,49%) y la transferencia (4,48%). Sin embargo, al igual que en las secuencias anteriores, tras la explicación del profesor en la actividad 17 - la explicación mejorada de la jaula de Faraday -, el porcentaje de respuestas que involucran el reordenamiento y sus variables aumentan, disminuyen las ideas erróneas y desaparece la descripción. En esta última actividad se observa que un 83,58% de las respuestas llegan al nivel de reordenamiento, que era el nivel

máximo esperado para esta actividad. Esto se debe a que el montaje no permite explorar las variables de distancia y carga para la intensidad de la inducción.

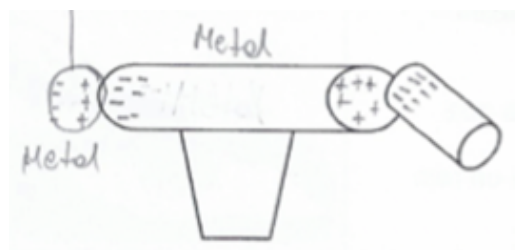
#### 5.2.2.4 Evolución de las explicaciones sobre la carga por contacto

La carga por contacto sobre un conductor se analizó en siete actividades a lo largo de la secuencia: las actividades 2 y 3 de la primera sesión, y las actividades 9, 10, 11, 12 y 13 de la segunda sesión. La tabla 16 ilustra el recuento de las respuestas de los estudiantes por cada categoría.

Categorías/Actividad	2	3	9	10	11	12	13
TRANS UNIFORME	7 (10,45%)	36 (53,73%)	12 (17,91%)	31 (46,27%)	14 (20,90%)	0 (0,00%)	9 (13,43%)
TRANSFERENCIA	6 (8,96%)	13 (19,40%)	29 (43,28%)	15 (22,39%)	5 (7,46%)	43 (64,18%)	49 (73,13%)
TRANS CONTRARIO	3 (4,48%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	7 (10,45%)	0 (0,00%)
REORDENAMIENTO	34 (50,75%)	0 (0,00%)	10 (14,93%)	1 (1,49%)	0 (0,00%)	3 (4,48%)	0 (0,00%)
DESCRIPCIÓN	3 (4,48%)	2 (2,99%)	10 (14,93%)	6 (8,96%)	0 (0,00%)	6 (8,96%)	2 (2,99%)
NO CONTESTA	14 (20,90%)	16 (23,88%)	6 (8,96%)	14 (20,90%)	48 (71,64%)	8 (11,94%)	7 (10,45%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)

**Tabla 16** Evolución de las explicaciones de la carga por contacto. Se remarcan los valores más altos

En la primera actividad (2) diseñada para trabajar la idea de carga por contacto las respuestas de los estudiantes se distribuyen entre las distintas categorías, siendo el reordenamiento la más recurrente (50,75%). Esto evidencia que, a la hora de predecir el fenómeno a analizar, los estudiantes piensan que este proceso polariza las cargas. Un ejemplo de este tipo de respuestas es la del estudiante 44.



(E44, A2)

**Figura 69** Parte de la respuesta del estudiante 44 en la actividad 2

El resto de las respuestas se distribuyen mayoritariamente entre respuestas esperadas y en blanco. Luego, tras la discusión del profesor desaparecen las ideas de reordenamiento y transferencia contraria, pasando la mayoría de las respuestas (73,13%) a las categorías de

las explicaciones apropiadas. Dentro de este porcentaje, existe un 53,73% de las respuestas que contemplan la característica del material conductor cuando está cargado, categoría que demuestra el mayor nivel explicativo.

En la primera actividad (9) de la siguiente sesión, vuelve a aparecer la idea de reordenamiento entre las respuestas de los estudiantes pero esta vez en menor cantidad (14,93%). Sin embargo, a pesar de eso, la mayoría de las explicaciones, específicamente un 61,19% se distribuyen entre las categorías de transferencia y transferencia uniforme. Tras la discusión con el profesor en el paso de la actividad 9 a la 10, las respuestas en la categoría del reordenamiento se reducen a un 1,49% y aquellas que corresponden a las categorías esperadas aumentan a un 68,66%. Tras la explicación del profesor, en el paso a la actividad 11, desaparecen completamente las respuestas que hacen alusión a las ideas inapropiadas para el proceso. Por otro lado, si bien las respuestas clasificadas en las categorías óptimas disminuyen a un 28,36%, aquellas en que los estudiantes no responden aumentaron considerablemente, hasta llegar a un 71,64%. De ellas, un 64,58% (31) ya habían sido contestadas en el ejercicio anterior y codificadas en la categoría de respuestas más óptima. Por lo tanto, en esta serie de actividades se observa la evolución favorable de las explicaciones de los estudiantes para un mismo montaje.

Posteriormente, se vuelve a cambiar el dispositivo experimental (ver 5.3), lo que explica que en la actividad 12 vuelvan a aparecer respuestas alusivas a la transferencia contraria (10,45%) y al reordenamiento (4,48%) aunque en porcentajes minoritarios en relación con aquellas que explicitan la transferencia (64,18%). Dentro de este porcentaje, la mayoría de las respuestas otorgan una explicación correcta pero macroscópica, sin llegar al nivel máximo de detalle esperado. Luego de la experimentación y discusión de resultados con el profesor, se observa en la actividad 13 que las respuestas se concentran en su mayoría entre las dos categorías óptimas, pero de ellas solo un 13,43% alcanza el nivel explicativo superior. Una posible explicación para este fenómeno es que el dispositivo experimental usado en las dos actividades finales no fue el más apropiado para lograr que los estudiantes hablaran de la distribución de carga uniforme sobre la superficie de un conductor, a diferencia de los utilizados anteriormente.

En general, se observa que las respuestas para la explicación de la carga por contacto tienden a incluir mayoritariamente la noción de transferencia y van evolucionando a medida que avanzan las actividades, pero también vuelven a diversificarse cada vez que hay un cambio de dispositivo experimental.

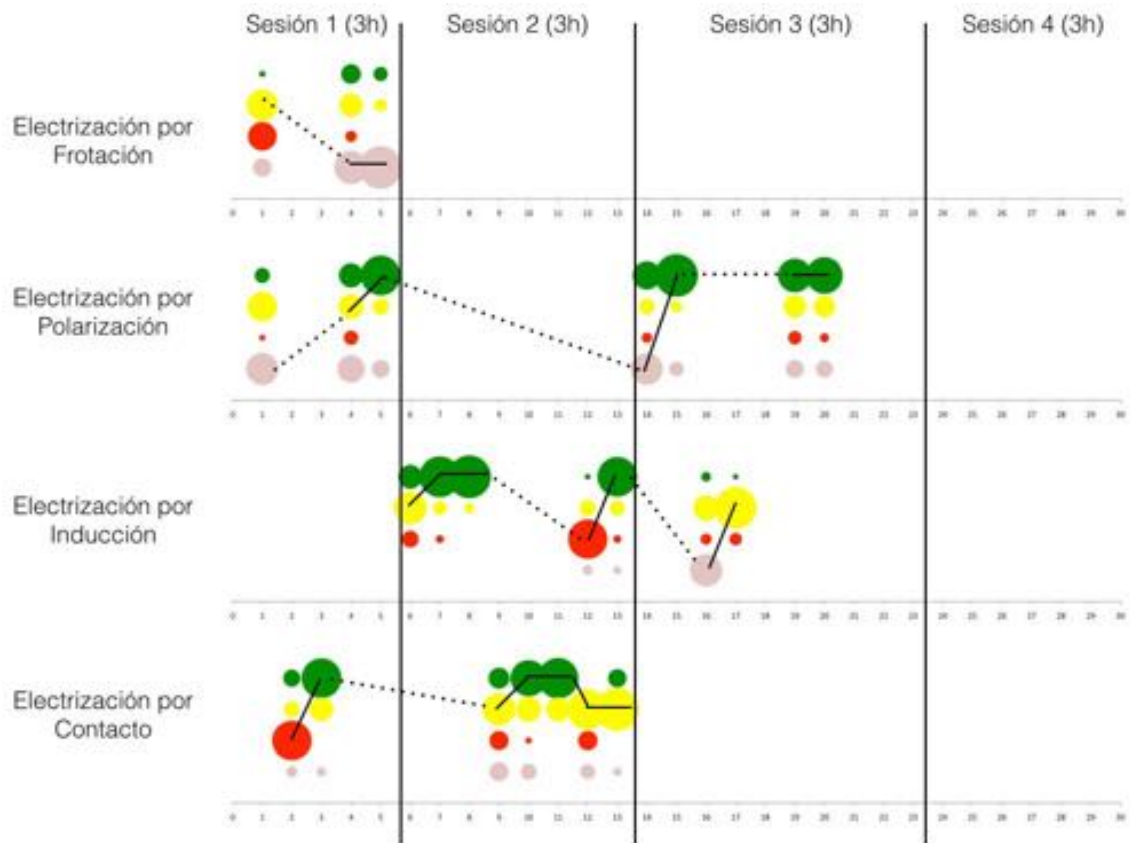
#### **5.2.2.5 Representación gráfica de la progresión de las explicaciones relativas al modelo de distribución e interacción de cargas**

La representación gráfica muestra la cantidad de respuestas, de los 67 estudiantes del estudio, tal como se ha dicho en la metodología en el apartado 4.3.3.3 en la figura 53. Para ello, se utilizan círculos de color que representan los distintos niveles de adecuación para cada tipo de explicación. Los colores se asignaron a los círculos de la siguiente manera:

- Verde: Alto/consistente
- Amarillo: Medio/algunas inconsistencias
- Rojo: Alternativo/inconsistente
- Gris: Descriptivo

En el eje horizontal de la gráfica se muestra el número de las actividades donde se recopilaron las respuestas en orden cronológico. Con respecto al tamaño de los círculos, estos representan la cantidad de respuestas para cada nivel. A mayor tamaño del círculo, mayor es la cantidad de respuestas categorizadas en ese nivel de adecuación. De igual forma, a menor tamaño del mismo, menor es la cantidad de respuestas pertenecientes a ese nivel.

Se incluyen también líneas continuas que corresponden a la conexión entre actividades donde los estudiantes trabajan con el mismo fenómeno electrostático, mientras que las líneas punteadas corresponden a la conexión entre las actividades en las que se utilizan distintos dispositivos experimentales. Además, las líneas nos muestran el cambio de nivel de las respuestas del grupo de estudiantes. En el apartado 5.3 se proseguirá con la discusión de esta progresión mostrada en la siguiente figura.



**Figura 70** Gráfica que corresponde al número de respuestas clasificadas en cada nivel de adecuación para cada dimensión (frotación, polarización, inducción y contacto) y por cada actividad (1 al 27). La cantidad de respuestas es representada por el tamaño de los círculos.



## 5.2.2 Evolución de las explicaciones asociadas al modelo de campo eléctrico

### 5.2.3.1 Evolución de las explicaciones sobre la naturaleza de la interacción entre cargas

La naturaleza de la interacción entre cargas se analizó en cuatro actividades a lo largo de la secuencia: las actividades 14, 15, 19 y 20, todas ellas de la tercera sesión. La tabla 17 ilustra el recuento de las respuestas de los estudiantes por cada categoría.

Categorías/Actividad	14	15	19	20
CAMPO ELÉCTRICO	7 (10,45%)	38 (56,72%)	51 (76,12%)	53 (79,10%)
ACCIÓN A DISTANCIA	23 (34,33%)	20 (29,85%)	6 (8,96%)	6 (8,96%)
ALTERNATIVAS	3 (4,48%)	0 (0,00%)	2 (2,99%)	2 (2,99%)
DESCRIPCIÓN	29 (43,28%)	4 (5,97%)	3 (4,48%)	1 (1,49%)
NO CONTESTA	5 (7,46%)	5 (7,46%)	5 (7,46%)	5 (7,46%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)

**Tabla 17** Evolución de las explicaciones sobre la naturaleza de la interacción entre cargas. Se remarcen los valores más altos

En esta serie de actividades se observa un aumento sostenido de las respuestas esperadas a medida que avanzan las actividades. Además, a diferencia del caso analizado en el punto anterior, se observa que el cambio de dispositivo experimental (ver 5.3) no impacta negativamente en las respuestas de los estudiantes de manera significativa.

En la primera actividad de esta serie (14), que consistía en explicar la atracción de una pelota de plumavit a un generador de VDG, la mayoría de las respuestas se distribuyeron entre las categorías de descripción (43,28%) y de acción a distancia (34,33%). Sólo un 10,45% de las explicaciones incluyeron la idea de campo eléctrico y un 7,46% no respondió la actividad. Luego de discutir los resultados de la experimentación inicial con el profesor, las respuestas que hacen alusión al campo eléctrico aumentaron a un 56,72%. Por su parte, aquellas pertenecientes a la categoría de acción a distancia disminuyeron a un 29,85% y las descripciones a un 5,97%.

Posteriormente, en la actividad 19 y tras el cambio de montaje, las respuestas de la categoría de campo eléctrico aumentan a un 76,12%, las de la acción a distancia

disminuyen a un 8,96% y las descripciones experimentan una leve disminución hasta llegar a un 4,48%. Es posible que estas variaciones se deban a que entre las actividades 15 y 19 se formaliza el concepto de campo eléctrico. También se puede atribuir este resultado a que el dispositivo experimental utilizado en la actividad 19 es aparentemente más pertinente para trabajar la idea de campo, pues muestra una evidente zona totalmente perturbada (pequeños hilos orientados por un electrodo cargado). Por lo tanto, tras la actividad 20, en que se vuelve a pedir a los estudiantes que expliquen el mismo fenómeno, las respuestas codificadas en la categoría de campo eléctrico llegan a su punto máximo, alcanzando un 79,10%.

### 5.2.3.2 Evolución de las explicaciones sobre las líneas de campo eléctrico

La explicación sobre las líneas de campo eléctrico se analizó en tres actividades a lo largo de la secuencia: las actividades 21, 22, y 23, todas ellas de la tercera sesión. La tabla 18 ilustra el recuento de las respuestas de los estudiantes por cada categoría.

Categorías/Actividad	21	22	23
TANGENTE	16 (23,88%)	5 (7,46%)	37 (55,22%)
FUERZA	33 (49,25%)	11 (16,42%)	16 (23,88%)
TRAYECTORIA	7 (10,45%)	2 (2,99%)	0 (0,00%)
DESCRIPCIÓN	5 (7,46%)	43 (64,18%)	2 (2,99%)
NO CONTESTA	6 (8,96%)	6 (8,96%)	12 (17,91%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)

**Tabla 18** Evolución de las explicaciones sobre las líneas de campo eléctrico. Se remarcen los valores más altos

En este conjunto de actividades se observa que las respuestas de los estudiantes involucionan en el paso de la actividad 21 a la 22, para luego evolucionar y alcanzar niveles de mayor adecuación científica en la actividad 23.

Las respuestas en la actividad 21 se concentran en las categorías tangente (23,88%) y fuerza (49,25%). A pesar de que esta actividad se centró en encontrar la relación entre la fuerza resultante sobre una carga de prueba y las líneas de campo eléctrico, un 10,45% de las respuestas aluden a la idea de trayectoria para referirse a la función de las líneas de campo. Además, un 7,46% de las respuestas corresponden a descripciones.

Luego, en la actividad 22, que consistía en determinar qué líneas de campo son erradas en un dibujo (dispositivo experimental hipotético) se observa un aumento de las descripciones, llegando a un 64,18%, mientras que la fuerza y tangente disminuyen a un 16,42% y 7,46%, respectivamente. Una posible explicación para este resultado es que el tipo de requerimiento hecho a los estudiantes no fuera lo suficientemente claro o que se necesitaran recursos o orientaciones extra para que los estudiantes supieran exactamente qué se esperaba de ellos. Como resultado, optaron por responder usando las convenciones para referirse a las líneas de campo y la idea de que la línea de campo es una entidad física, como también lo reportan Törnkvist et al. (1993).

Finalmente, la actividad 23 contenía cuatro tipos de tareas: 1) determinar direcciones de fuerza sobre partículas en patrones de líneas de campo, 2) determinar el campo adecuado para una serie de vectores fuerza sobre partículas, 3) determinar los vectores fuerza en trayectorias de partículas positivas y negativas sobre un patrón de líneas de campo eléctrico, y 4) determinar la trayectoria probable para dos partículas con igual carga pero de signo contrario en un patrón de líneas de campo. En esta actividad, la categoría de tangente aumentó a un 55,22% y la de fuerza a un 23,88%. Además, la categoría de trayectorias desaparece y el porcentaje de descripciones se redujo a un 2,99%, equivalente a sólo dos respuestas. En este caso, también es posible que el tipo de tarea haya influido en que los resultados fueran favorables. La representación y la constante solicitud de determinar fuerza, líneas y trayectorias puede haber ayudado a que los estudiantes auto regularan sus conocimientos antes de exponer sus respuestas.

### 5.2.3.3 Evolución de las explicaciones sobre la densidad de líneas de campo eléctrico

La explicación sobre la densidad de líneas de campo eléctrico se analizó en dos actividades a lo largo de la secuencia: las actividades 25 y 26 de la cuarta sesión. La tabla 19 ilustra el recuento de las respuestas de los estudiantes por cada categoría.

Categorías/Actividad	25	26
PROPORCIONAL	48 (71,64%)	24 (35,82%)
LÍNEAS	0 (0,00%)	19 (28,36%)
POSICIÓN	12 (17,91%)	5 (7,46%)
NO CONTESTA	7 (10,45%)	19 (28,36%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)

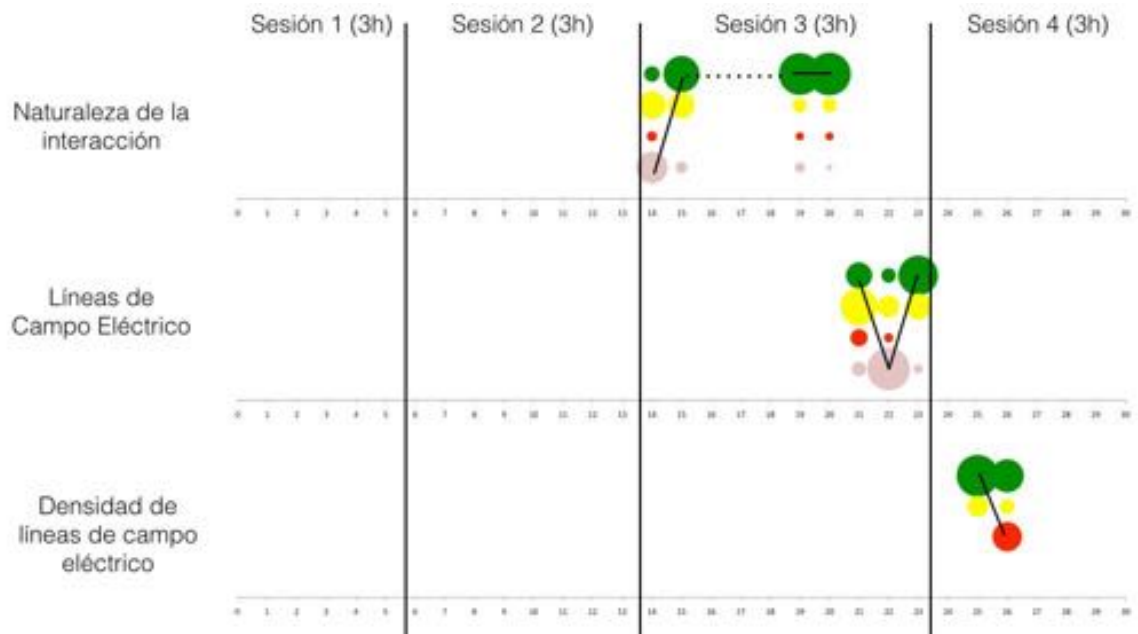
**Tabla 19** Evolución de las explicaciones sobre la densidad de líneas de campo eléctrico. Se remarcan los valores más altos

En esta serie de actividades se observa que las respuestas iniciales de los estudiantes son mayoritariamente óptimas, con un 71,64% incluyendo la noción de proporcionalidad en sus explicaciones y sólo un 17,91% incluyendo el concepto de posición. Sin embargo, al pasar a la actividad 26, las respuestas óptimas disminuyen a un 35,82%, las de posición se reducen a un 7,46%, y aparece un 28,36% de respuestas que atribuyen la explicación a las líneas de campo.

Una posible explicación para este resultado es que la representación utilizada en la actividad 26 ayude a percibir la proporcionalidad entre líneas de campo y carga eléctrica, pero sea confusa a la hora de orientar el pensamiento en torno a la relación entre intensidad de campo eléctrico y densidad de líneas de campo eléctrico.

### 5.2.2.4 Representación gráfica de la progresión de las explicaciones relativas al modelo de campo eléctrico

Se presenta a continuación la representación gráfica de las respuestas clasificadas en cada nivel de adecuación al modelo de campo eléctrico, al igual que en apartado 5.2.2.5 para las ideas del modelo de distribución e interacción de cargas.



**Figura 71** Gráfica que corresponde al número de respuestas clasificadas en cada nivel de adecuación para cada dimensión (naturaleza de la interacción entre cargas, líneas de campo eléctrico y densidad de líneas de campo eléctrico) y por cada actividad (1 al 27). La cantidad de respuestas es representada por el tamaño de los círculos

## 5.2.3 Evolución de las explicaciones asociadas al modelo híbrido (DIC + CE)

### 5.2.3.1 Evolución de las explicaciones sobre el efecto jaula de Faraday

La explicación sobre el efecto jaula de Faraday se analizó en tres actividades a lo largo de la secuencia: las actividades 16, 17 y 18 de la tercera sesión. La tabla 20 ilustra el recuento de las respuestas de los estudiantes por cada categoría.

Categorías/Actividad	16	17	18
EQUILIBRIO ELECTROSTÁTICO	1 (1,49%)	7 (10,45%)	51 (76,12%)
MOVIMIENTO DE CARGAS	18 (26,87%)	42 (62,69%)	4 (5,97%)
JAULA	30 (44,78%)	12 (17,91%)	1 (1,49%)
DESCRIPCIÓN	13 (19,40%)	1 (1,49%)	6 (8,96%)
NO CONTESTA	5 (7,46%)	5 (7,46%)	5 (7,46%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)	67 (100,00%)

**Tabla 20** Evolución de las explicaciones sobre el efecto jaula de Faraday. Se remarcan los valores más altos

En la actividad 16, que corresponde a la primera explicación para el efecto de la jaula de Faraday, y que consistía en predecir lo que ocurriría en la interacción a distancia entre un generador VDG, un electroscopio y una jaula de Faraday. En esta primera instancia, la mayoría de las respuestas (44,78%) se refirieron al rol de la jaula en este proceso, atribuyéndole al material la capacidad de impedir la interacción entre el generador VDG y el electroscopio. Un 26,87% de las respuestas explicaron el proceso haciendo alusión al movimiento de las cargas y un 19,40% fueron descripciones. Solo un estudiante, que representa un 1,49%, ocupó la noción de equilibrio electrostático para explicar el fenómeno.

Luego de la experimentación y observación del efecto de la jaula de Faraday, las respuestas que atribuían el fenómeno a la jaula disminuyeron a un 17,91% y las descripciones a un 1,49%. Por el contrario, las respuestas que mencionan el movimiento de cargas aumentaron a un 62,69% y aquellas que apelan al equilibrio electrostático a un 10,45%. Este resultado permite concluir que la experimentación ayudó a que los estudiantes piensen más en las cargas eléctricas, y menos en la jaula como una barrera física de inducción o campo eléctrico.

Finalmente, en la actividad 18, llevada a cabo tras una discusión con el profesor, la mayoría de los estudiantes (76,12%) alcanza el nivel máximo esperado al atribuir lo observado al equilibrio electrostático. Un 5,97% de las explicaciones habla sobre el movimiento de las cargas y solo un 1,49% (es decir, un estudiante) sobre el rol de la jaula. Las descripciones en esta actividad llegan a un 8,96%. Esta mejora es coherente con lo expuesto por Garrido y Couso (2017) quienes hacen referencia a que es necesaria la ayuda de un experto, para aportar nuevos enfoques e ideas en el momento adecuado.

### 5.2.3.2 Evolución de las explicaciones sobre el efecto punta

La explicación sobre el efecto punta se analizó en dos actividades a lo largo de la secuencia: las actividades 24 y 27 de la cuarta sesión. La tabla 21 ilustra el recuento de las respuestas de los estudiantes por cada categoría.

Categorías/Actividad	24	27
EQUIPOTENCIAL	28 (41,79%)	47 (70,15%)
NO UNIFORME	18 (26,87%)	13 (19,40%)
FORMA DEL CONDUCTOR	7 (10,45%)	1 (1,49%)
DESCRIPCIÓN	8 (11,94%)	0 (0,00%)
NO CONTESTA	6 (8,96%)	6 (8,96%)
TOTAL	67 (100,00%)	67 (100,00%)

**Tabla 21** Evolución de las explicaciones sobre el efecto punta. Se remarcan los valores más altos

En el paso de la actividad 24 a la 27 se observa una evolución favorable de las explicaciones, donde la mayoría de los estudiantes alcanza la máxima respuesta esperada.

En la actividad 24, donde los estudiantes tuvieron que predecir cómo se distribuirían las cargas en un conductor asimétrico luego de la interacción por contacto con un VDG, la mayoría de las respuestas (41,79) contempla una relación entre la distribución de cargas y la superficie equipotencial del conductor. Un 26,87% solamente hace referencia a la distribución no uniforme de las cargas sobre la superficie del conductor, un 11,94% describe el proceso y un 10,45% atribuye el fenómeno a la forma del conductor. Las categorías “forma del conductor” y “no uniforme” representan un 37,32% del total de las respuestas, evidenciando así que la idea de concentración de cargas o espacio disponible para mayor cantidad de carga es recurrente para explicar este tipo de fenómenos. Posiblemente, esto se deba a que existen representaciones poco claras sobre el efecto punta

a las que los estudiantes tienen acceso sin contar con la guía de un profesor. Por ejemplo, es habitual encontrar en sitios web no especializados, pero frecuentemente visitados por los estudiantes, que el efecto punta, “*se produce por la acumulación de carga en esa parte de un cuerpo. Cuando un material posee carga eléctrica, esta se distribuye por todo el cuerpo (superficie, si se trata de conductores)*”, sin mencionar la superficie equipotencial y su consecuencia. El papel de las representaciones tiene que ir de la mano con explicaciones que muestren las relaciones entre variables (López y Pintó, 2017).

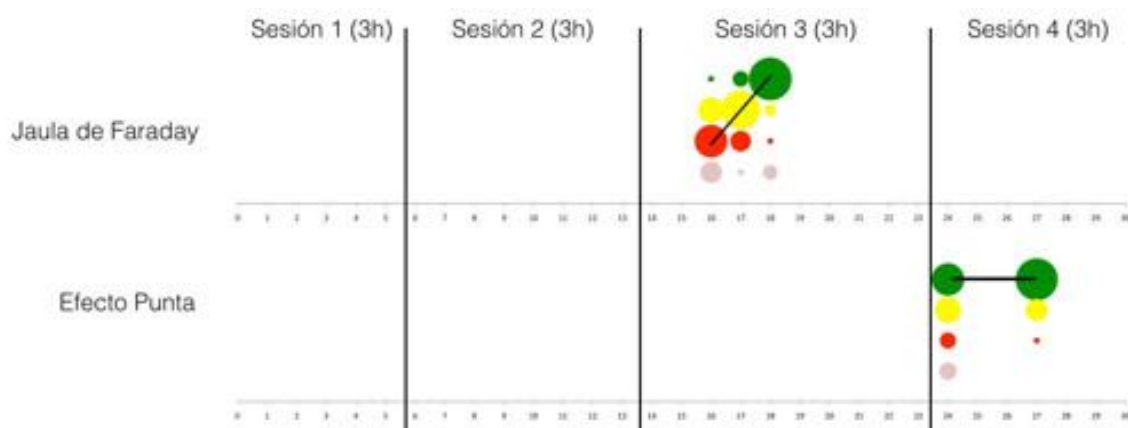
Tras la experimentación y posterior análisis de variables con herramientas matemáticas, el 70,15% de los estudiantes explica el fenómeno mediante el rol de la superficie equipotencial. Las descripciones desaparecen y solo un estudiante menciona la forma del conductor. Las explicaciones que se refieren solo a la distribución no uniforme de las cargas también disminuyen, llegando a un 19,40%.

Existen algunas variables que podrían explicar la evolución favorable de las respuestas para el efecto punta. Primero, que entre las actividades 24 y 27 se trabajó la noción de densidad de líneas y segundo, que debido a que la superficie equipotencial no es observable directamente, se articuló la experimentación con los procedimientos matemáticos necesarios para modelar la distribución de carga adecuada.



### 5.2.3.3 Representación gráfica de la progresión de las explicaciones relativas al modelo híbrido

Se presenta a continuación la representación gráfica de las respuestas clasificadas en cada nivel de adecuación al modelo de híbrido, al igual que en apartado 5.2.2.4 para las ideas del modelo de campo eléctrico.



**Figura 72** Gráfica que corresponde al número de respuestas clasificadas en cada nivel de adecuación para cada dimensión (jaula de Faraday y efecto punta) y por cada actividad (1 al 27). La cantidad de respuestas es representada por el tamaño de los círculos.

En el siguiente apartado se discutirán la evolución de las explicaciones de los estudiantes que podemos observar en este gráfico a partir de las características didácticas de la SEA.

### **5.3 Análisis de la influencia de las características didácticas de la SEA sobre las explicaciones de los estudiantes**

En este apartado se presenta el resultado del análisis de la influencia de las distintas características didácticas de la SEA en el nivel de respuesta de los estudiantes. Como se menciona en el apartado 4.3.3.4, para obtenerlo, se analizó la evolución de las explicaciones en pares de actividades que apuntan a trabajar el mismo tipo de explicación (por ejemplo, en las actividades 1 y 4 se trabaja el concepto de frotación) y para cada par, se identificó quién lideró las discusiones en esa actividad, el contexto en el que ellas se desarrollaron y si se usó un dispositivo experimental igual o distinto a la hora de recoger las respuestas. Además, se determinó cuántas respuestas suben de nivel en el paso de una actividad a otra, cuántas bajan de nivel, cuántas bajan al nivel descriptivo, cuántas se mantienen en el nivel y cuántas no fueron trazables (Hernández et al., 2015). Todo esto, con el objetivo de identificar qué características de la SEA fueron más influyentes en la evolución de las ideas de los estudiantes entre actividades.

A continuación, en la tabla 22, se presenta el detalle de la cantidad de respuestas que suben de nivel, que bajan de nivel, que bajan a descripción o que se mantienen en el nivel para cada par de actividades. Además, se muestran las características didácticas de cada instancia de la SEA.

Situaciones consecutivas donde se observa el mismo tipo de explicación	Tipo de interacción	Tipo de experiencia	Dispositivo experimental	Cantidad de respuestas que suben de nivel	Cantidad de respuestas que bajan de nivel	Cantidad de respuesta que bajan al nivel descriptivo	Cantidad de respuestas que se mantienen su nivel	<sup>6</sup> No trazable	Total de respuestas
1 - 4 Frotación	Explicación del profesor	Experiencia hipotética	Igual	14	1	20	15	17	67
4 - 5 Frotación	nada	nada	Distinto	2	1	18	27	19	67
1 - 4 Polarización	nada	nada	Igual	17	5	2	28	15	67
4 - 5 Polarización	Explicación del profesor	Experiencia. previa real	Distinto	26	1	2	20	18	67
5 - 14 Polarización	nada	nada	Distinto	4	5	18	20	20	67
14 - 15 Polarización	Discusión con el profesor	Experiencia. previa real	Igual	31	0	2	27	7	67
15 - 19 Polarización	nada	nada	Distinto	4	16	6	33	8	67
19 - 20 Polarización	Discusión con el profesor	Experiencia previa hipotética	Igual	15	6	2	27	17	67
6 - 7 Inducción	Discusión con el profesor	Experiencia. previa real	Igual	38	5	0	16	8	67
7 - 8 Inducción	Explicación del profesor	Experiencia. previa real	Igual	7	2	0	47	11	67
8 - 12 Inducción	Explicación del profesor	Experiencia real	Distinto	0	51	3	1	12	67
12 - 13 Inducción	Discusión con el profesor	Experiencia. previa real	Igual	54	0	2	3	8	67
13 - 16 Inducción	nada	nada	Distinto	2	20	30	3	12	67
16 - 17 Inducción	Discusión entre pares	Experiencia. previa real	Igual	36	3	0	23	5	67
2 - 3 Contacto	Discusión con el profesor	Experiencia. previa real	Igual	42	0	2	6	17	67
3 - 9 Contacto	Explicación del profesor	nada	Distinto	5	26	6	10	20	67
9 - 10 Contacto	Discusión con el profesor	Experiencia. previa real	Igual	29	1	2	21	14	67
10 - 11	Explicación del	Experiencia.	Igual	7	0	0	10	50	67

<sup>6</sup> Los “no trazable” de la tabla muestra la cantidad de estudiantes que en alguna de las dos actividades no respondió.

Contacto	profesor	previa real							
11 - 12 Contacto	Explicación del profesor	Experiencia real	Distinto	0	17	1	1	48	67
12 - 13 Contacto	Discusión con el profesor	Experiencia. previa real	Igual	22	0	0	37	8	67
14 - 15 Campo Elec	Discusión con el profesor	Experiencia. previa real	Igual	35	2	0	25	5	67
15 - 19 Campo Elec	Explicación del profesor	Experiencia hipotética	Distinto	45	4	3	10	5	67
19 - 20 Campo Elec	Discusión con el profesor	Experiencia previa hipotética	Igual	8	6	1	47	5	67
21 - 22 Líneas de Campo	Explicación del profesor	Experiencia hipotética	Igual	4	3	37	17	6	67
22 - 23 Líneas de Campo	Discusión entre pares	Experiencia hipotética	Distinto	44	2	0	8	13	67
25 - 26 Densidad de Líneas	Discusión con el profesor	Experiencia previa hipotética	Distinto	3	22	0	23	19	67
16 - 17 Jaula de Faraday	Discusión entre pares	Experiencia. previa real	Igual	37	2	0	28	0	67
17 - 18 Jaula de Faraday	Explicación del profesor	Experiencia. previa real	Igual	46	2	6	13	0	67
24 - 27 Efecto Punta	Discusión con el profesor	Experiencia. previa real	Igual	25	2	0	34	6	67

**Tabla 22** Recuento sobre el cambio de nivel de las respuestas por cada situación consecutiva donde se observa el mismo tipo de explicación. Además, se muestra la clasificación sobre las características didácticas de la SEA por cada situación consecutiva.

En la siguiente tabla, se muestra el detalle de la distribución por nivel de respuestas que se mantienen y la cantidad de respuestas que resultaron no trazables por tener una respuesta solo para la primera actividad del par.

Situaciones consecutivas donde se observa el mismo tipo de explicación	Distribución por nivel de respuestas que se mantienen				Cantidad de respuestas que se mantienen en su nivel	Distribución por nivel de respuestas no trazables con una respuesta				Cantidad de respuestas no trazables que tienen una respuesta
	Alto	Medio	Bajo	Descripción		Alto	Medio	Bajo	Descripción	
1 - 4 Frotación	1	7	1	6	15	0	5	1	0	6
4 - 5 Frotación	2	2	0	23	27	0	1	0	2	3
1 - 4 Polarización	3	9	0	16	28	0	5	0	0	5
4 - 5 Polarización	11	3	0	6	20	2	1	0	0	3
5 - 14 Polarización	14	2	0	4	20	4	1	0	2	7
14 - 15 Polarización	21	2	0	4	27	0	0	0	0	0
15 - 19 Polarización	29	1	0	3	33	2	1	0	0	3
19 - 20 Polarización	18	2	2	5	27	6	2	1	0	9
6 - 7 Inducción	14	2	0	0	16	1	1	0	0	2
7 - 8 Inducción	47	0	0	0	47	2	1	0	0	3
8 - 12 Inducción	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
12 - 13 Inducción	1	0	2	0	3	0	0	1	0	1
13 - 16 Inducción	1	0	1	1	3	4	0	0	0	4
16 - 17 Inducción	1	20	2	0	23	0	0	0	0	0
2 - 3 Contacto	6	0	0	0	6	1	1	1	0	3
3 - 9 Contacto	6	4	0	0	10	3	1	0	0	4
9 - 10 Contacto	8	8	1	4	21	3	1	3	1	8
10 - 11 Contacto	7	3	0	0	10	24	7	0	5	36
11 - 12 Contacto	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
12 - 13 Contacto	0	35	0	2	37	0	0	0	0	0
14 - 15 Campo Elec	5	16	0	4	25	0	0	0	0	0
15 - 19 Campo Elec	8	2	0	0	10	0	0	0	0	0
19 - 20 Campo Elec	46	1	0	0	47	0	0	0	0	0
21 - 22 Líneas de Campo	2	9	1	5	17	0	0	0	0	0
22 - 23 Líneas de Campo	2	5	0	1	8	1	1	0	5	7
25 - 26 Densidad de Líneas	21	2	0	0	23	9	3	0	0	12
16 - 17 Jaula de Faraday	1	19	7	1	28	0	0	0	0	0
17 - 18 Jaula de Faraday	5	7	1	0	13	0	0	0	0	0
24 - 27 Efecto Punta	26	7	1	0	34	0	0	0	0	0

**Tabla 23** Distribución por nivel de adecuación de respuestas que se mantienen y de respuestas no trazables con una respuesta.

En las siguientes secciones, se presenta el análisis detallado de la información presentada en la tabla 22 y 23. Para cada dimensión, se explican las tendencias arrojadas por los datos y se exponen ejemplos de citas textuales de las respuestas de los estudiantes con el objetivo de transparentar la codificación de las respuestas.

### 5.3.1 Análisis de la evolución de las respuestas de los estudiantes según el tipo de interacción de aula

En esta sección se analizará la influencia de quienes lideran las discusiones en cada momento de la SEA, en los cambios del nivel de las respuestas de los estudiantes.

Cambio de nivel/ tipo de interacción	Explicación del profesor	Discusión con el profesor	Discusión entre pares	No hay discusión ni explicación relacionada
Subida	154 (23,0%)	302 (41,0%)	117 (58,2%)	29 (8,7%)
Bajada	107 (16,0%)	44 (6,0%)	7 (3,5%)	47 (14,0%)
Cambio a descripción	78 (11,6%)	11 (1,5%)	0 (0,0%)	74 (22,1%)
Mantiene el nivel	144 (21,5%)	266 (36,1%)	59 (29,4%)	111 (33,1%)
No trazable	187 (27,9%)	114 (15,5%)	18 (9,0%)	74 (22,1%)
Total	670 (100,0%)	737 (100,0%)	201 (100,0%)	335 (100,0%)

**Tabla 24** Recuento sobre el cambio de nivel de las respuestas por cada tipo de interacción se observa quién(es) lideran la discusión. Se remarcan los valores más altos

Los valores presentados en la tabla 24 fueron sometidos a la prueba estadística de  $\chi^2$  (chi cuadrado), la que evidenció que los datos obtenidos no fueron aleatorios, sino que responden a las diferencias del contexto de enseñanza ( $p$  value = 0). Por lo tanto, existen diferencias significativas en la calidad de las explicaciones de los estudiantes según el tipo de interacción que precedió a cada respuesta.

Al analizar los datos de cada tipo de interacción, se observa una clara tendencia a favor de las discusiones, ya sea entre estudiantes o con el profesor, que resultan ser las que más aportan a mejorar la calidad de las explicaciones de los estudiantes. De entre estos dos tipos de discusiones, hubo más instancias de diálogo con el profesor que entre pares, sin embargo, proporcionalmente, aquellas entre estudiantes impactaron más en la calidad de las respuestas, como se discute más adelante. Esto resulta consistente con la literatura (Mercer,

2008) que reporta que las discusiones entre pares son beneficiosas para el aprendizaje ya que permiten a los estudiantes revisar sus ideas al compararlas con las de los demás.

En segundo lugar, se ubican las explicaciones del profesor. Este tipo de interacción, que analizaremos en el siguiente apartado, produjo que la calidad de las respuestas subiera en ocasiones y en otras bajara o se mantuvieran. Por lo tanto, se puede interpretar que este tipo de interacción no explica por sí solo el cambio en el nivel de las respuestas, sino que es necesario analizar otros factores que pueden haber influenciado el resultado, como el tipo de lenguaje y montaje utilizado. Este tema se discutirá en más detalle en los siguientes párrafos.

En el caso de las instancias de la SEA donde no hay ni discusión ni explicación relacionada, la tendencia mayoritaria es a mantener o bajar el nivel de las respuestas. Este resultado respalda la hipótesis (Garrido y Couso, 2017) de que no es probable que haya una evolución espontánea de las ideas científicas sin un estímulo apropiado. En los siguientes párrafos, se presenta el análisis detallado de los resultados de cada categoría.

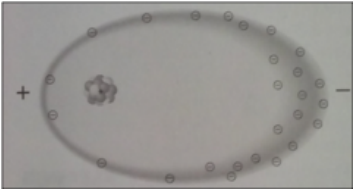
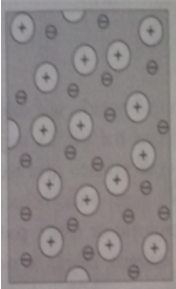
#### **5.3.1.1 Explicación del profesor**

En la categoría de las explicaciones del profesor, se observa que, tras ellas, un 23,0% de las respuestas suben de nivel, un 27,6% baja de nivel en mayor o menor grado y un 21,5% mantiene el nivel. Por lo tanto, consideramos que, si bien la explicación del profesor a lo largo de la SEA ayudó a que los estudiantes mejoraran sus respuestas, su impacto no fue suficiente ya que solo abarcó un porcentaje minoritario de las respuestas.

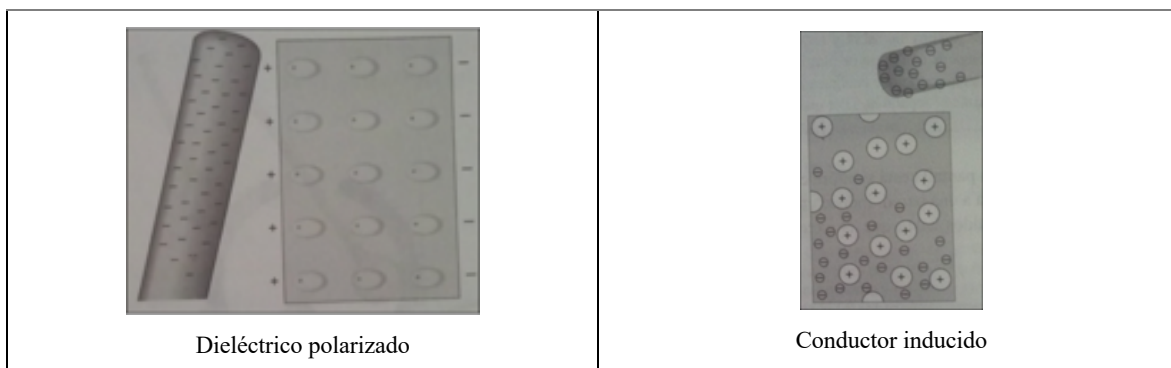
Comenzaremos analizando algunas citas del 23,0% de respuestas que subieron de nivel tras la explicación del profesor. Por ejemplo, en la actividad 4, donde los estudiantes deben explicar la interacción a distancia entre un globo de látex cargado por frotación y una pared neutra, la estudiante 18 responde lo siguiente: “...por lo que el globo queda pegado a la pared, es atraído, por esto implica que en el sector donde está en contacto el globo con la pared debe tener una carga opuesta al globo...”(E18,A4). Esta respuesta se considera de nivel descriptivo para la polarización, debido a que expresa que el objeto previamente cargado será atraído hacia el objeto neutro, sin mencionar el proceso de reordenamiento de cargas. Este proceso consiste en que la carga de la pared que es contraria del exceso de

carga del globo quede orientada en la dirección del encuentro de estos objetos, de modo que la fuerza de atracción supera en magnitud a la de repulsión debido a la menor distancia entre las cargas opuestas. Estos elementos sí se encuentran en la respuesta de la misma estudiante para la actividad 5, donde señala que: *“mediante electrización por inducción las cargas del papel son reordenadas. Por otro lado, los papeles se pegan a la peineta debido que la fuerza de atracción es mayor, esto se debe a que la distancia entre cargas de distinto signo es menor...”* (E18,A5). Esta nueva explicación entregada en la actividad 5 demuestra un nivel alto de adecuación al modelo.

La explicación del profesor entre las actividades 4 y 5 podría explicar la mejora de la calidad de la respuesta de la estudiante. Entre ambas actividades, el profesor expone sobre la distinción entre los materiales dieléctricos y conductores, y luego personifica la repulsión de cargas negativas en un conductor y en un dieléctrico, haciendo énfasis en el movimiento de las cargas del material en cada una de las situaciones. Tras la actuación, el profesor muestra y describe las siguientes imágenes de la tabla 25. Las imágenes representan la diferencia del proceso de reordenamiento de las cargas eléctricas, en los materiales dieléctricos y conductores. Por lo tanto, esta explicación se caracterizó por incluir varias representaciones, entre ellas, lenguaje escrito, oral y gestual, además de las representaciones gráficas utilizadas. Este tipo de interacción se enmarca en el modelo de multimodalidad, el que, de acuerdo con la evidencia (Klein y Kirkpatrick, 2010), es beneficioso para el aprendizaje.

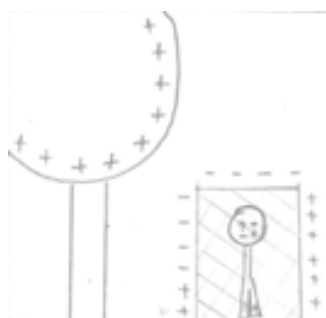
Imágenes de apoyo para la explicación de la Polarización de un dieléctrico	Imágenes de apoyo para la explicación de la Inducción sobre un conductor
 <p data-bbox="418 1663 591 1692">Átomo polarizado</p>	 <p data-bbox="857 1713 1321 1743">Conductor neutro sin ninguna influencia externa</p>





**Tabla 25** imágenes que ayudaron para sostener la explicación de la polarización de un dieléctrico y la inducción sobre un conductor

Otro ejemplo de un cambio ascendente en el nivel de las respuestas es la mejora que muestra la explicación del estudiante 50 entre las actividades 17 y 18, donde se pide a los estudiantes explicar el efecto de la jaula de Faraday. En la actividad 17 el estudiante señala que: *“(Figura 73) ... el electroscopio dentro de la jaula no se mueve ya que en dirección al VDG, la jaula está cargada negativamente y el VDG de forma positiva, por lo que sistema se encontrará en estado neutro y no influenciará al electroscopio”*(E50,A17).



**Figura 73** dibujo que acompaña la respuesta escrita del estudiante 50 en la actividad 17

Este tipo de respuesta fue clasificado en el nivel medio, pues hace referencia a un reordenamiento de las cargas, pero no provee una explicación que conecte el nuevo orden de las cargas de la jaula con el nulo movimiento del electroscopio. Luego en la actividad n° 18 el estudiante señala: *“(Figura 74) ... Esto mismo genera a su vez un campo eléctrico al interior de la jaula que resulta ser contrario al generado por el VDG, esto provoca que el electroscopio dentro de la jaula esté bajo la influencia de dos campos, pero la resultante es nula. Por lo que el no haber un campo dentro de la jaula (en todos los puntos de ella), no existen fuerzas que puedan desplazar cargas, por lo que el electroscopio no se mueve”*(E50,A18).

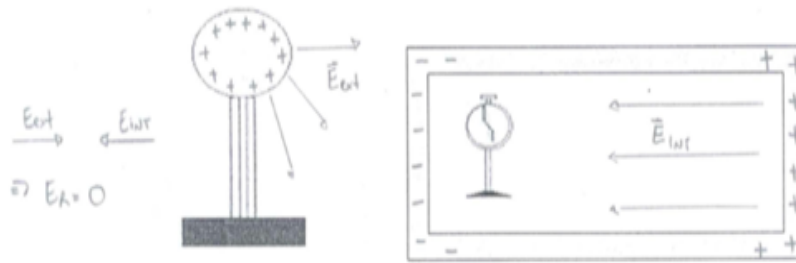


Figura 74 dibujo que acompaña la respuesta escrita del estudiante 50 en la actividad 18

En esta respuesta, se observa que el estudiante añade la idea de campo eléctrico para completar su explicación sobre por qué el electroscopio no sufre reordenamiento y por consecuencia, el movimiento de sus agujas. En esta nueva respuesta, demuestra un nivel alto de apego al modelo propuesto.

La mejora de la calidad de la respuesta de este estudiante posiblemente se deba en parte a la explicación del profesor, quien, entre ambas actividades, articula el conocimiento previo de los estudiantes, la evidencia recabada tras la experimentación, y las ideas del modelo científico. Para ello, el docente primero pide a los estudiantes que hagan una predicción de lo que ocurrirá en el experimento y por qué. Luego, los estudiantes observan el experimento y deben redactar una nueva explicación, esta vez para el fenómeno observado. Tras esto, el profesor sintetiza las observaciones de los estudiantes en las siguientes afirmaciones:

- a. Como la jaula es de metal puede desplazar cargas libremente.
- b. Estas cargas son desplazadas debido a la presencia de un campo eléctrico generado por las cargas del VDG.
- c. El campo eléctrico del VDG ejerce fuerza sobre las cargas de la jaula, desplazándolas por la superficie de ésta.

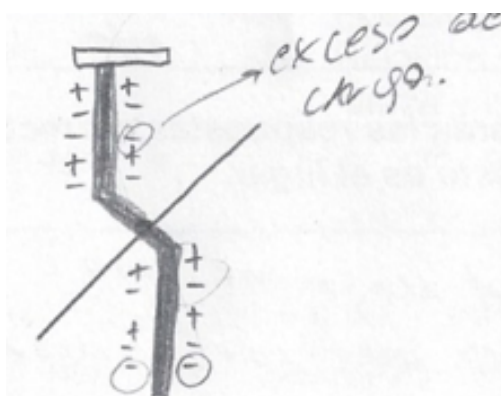
Luego, el profesor pregunta ¿Cómo debería ser el campo eléctrico dentro de la jaula para que no exista movimiento del electroscopio? Junto a esta pregunta, el profesor desplaza el electroscopio dentro de la jaula para confrontar la idea de que sólo en el centro se da el efecto. Para apoyar la experimentación, el profesor usa imágenes de equilibrio electrostático donde se muestra la distribución de cargas de un conductor en presencia de un campo eléctrico, representado por líneas, que lo cruzan. Dada esto el profesor señala que:

- a. Este desplazamiento genera un campo eléctrico dentro de la jaula tan intenso como el producido por el VDG haciendo que dentro de la jaula el campo sea nulo.
- b. Si el campo es nulo, no es posible desplazar cargas, pues no hay quien ejerza fuerza sobre ellas.

Al finalizar, el profesor señala cómo podría aplicarse este razonamiento desde la ley de Coulomb. Este hallazgo es evidencia para la tesis que sostiene que la indagación como único enfoque hacia el aprendizaje tiene un límite y no es suficiente para que los estudiantes se apropien del conocimiento de un modelo (Garrido y Couso, 2017). En este caso, posiblemente los estudiantes no habrían podido llegar a la conclusión final sin el andamiaje proporcionado por el docente.

De entre las respuestas recolectadas, un 16% bajó de nivel, moviéndose entre los niveles alto, medio o alternativo. A continuación, se analizarán algunas citas de respuestas de los estudiantes que fueron categorizados en este rango.

Un tipo de respuesta encontrado en esta categoría se refleja en el cambio observado entre las explicaciones del estudiante 14 en las actividades 11 y 12 para la carga por contacto. En la actividad 11, donde se le pide explicar la distribución de cargas en un electroscopio cargado por contacto, responde que *“(Figura 75) el electroscopio neutro al entrar en contacto con la barra, ésta traspasa parte del exceso de carga negativa... (dibujo)”*(E14,A11).



**Figura 75** dibujo que acompaña la respuesta escrita del estudiante 14 en la actividad 11

En dicha respuesta se puede identificar la transferencia de carga en exceso y también la distribución uniforme de todas las cargas en la superficie de un electroscopio. Además, el

dibujo incluye no solo las cargas nuevas, sino también las cargas que ya existían en el conductor y su distribución apropiada, demostrando un alto nivel de adecuación al modelo. En cambio en la actividad 12, cuando se solicita explicar la distribución de cargas en un sistema compuesto por un VDG encendido, una cadena y un electroscopio, el mismo estudiante señala que, *“la cadena al ser un conductor transporta la carga y como sabemos que el VDG posee carga positiva, tenderá a cargarse positivamente el electroscopio, reordenando las cargas del electroscopio”*(E14,A12). En este caso, el nivel de explicación baja a un nivel medio, por la escasa claridad que refleja sobre el proceso de transferencia de carga y por no detallar la distribución de cargas en el electroscopio tras la transferencia. El uso de la palabra “reordenamiento” para denominar el proceso de transferencia, implica que, si bien el alumno entiende el proceso, confunde su nombre.

Una posible causa de este resultado es que las explicaciones del docente contienen evidencias de la experimentación y un lenguaje apegado al modelo científico con énfasis en las relaciones entre conceptos y analogías a fenómenos similares (Helaakoski y Viiri, 2014), lo que puede equivaler a un exceso de información para los estudiantes, quienes primero deben decodificar las unidades menores de significado para luego comprender el mensaje global (Lemke, 1997).

Por otra parte, del 11,6% de respuestas que bajan a un nivel descriptivo, un 8,5% son explicaciones sobre la frotación, es decir, entre las actividades 1 y 4, y sobre las líneas de campo eléctrico, trabajadas entre las actividades 21 y 22. El análisis del aumento de descripciones en ambas situaciones fue presentado en los apartados 5.2.1.1 para la frotación y 5.2.3.2 para las líneas de campo eléctrico. Sin embargo, desde la mirada del impacto que tiene la explicación del docente en estos resultados, es posible concluir que es necesario mejorar las explicaciones de estas dos temáticas.

Un ejemplo de esta categoría se observa en la respuesta de la estudiante 8 en la actividad 1 *“...están neutros, luego que frotamos, hacemos que las cargas se agiten y logren un traspaso de cargas dejando la barra cargada positiva o negativa...”*(E8,A1). Esta explicación fue categorizada en un nivel medio de adecuación al modelo por relacionar la fricción entre dos cuerpos neutros con la transferencia de cargas eléctricas. Para alcanzar el nivel alto debió además señalar el tipo de material y cómo éste adquiere o cede carga. En la

actividad 4, la misma estudiante señala que “...al momento de frotar se carga”(E8,A4), solo describiendo el resultado final de la operación sin el detalle de la electrización por frotación. Este ejemplo ilustra que los conocimientos de la estudiante en torno a la frotación aún no están del todo consolidados y que, aparentemente, la explicación del profesor tampoco fue suficiente para conseguir este resultado. Una posible causa para esto es que la explicación del fenómeno de transferencia de electrones debido a una fricción no contó con las múltiples representaciones con que se representaron los otros fenómenos. Las explicaciones en este caso fueron predominantemente verbales, en modalidad oral y escrita, sin presentar experimentos ni imágenes que evidenciaran este proceso de carga. Esto se debe a que la mayoría de las imágenes encontradas en libros de texto y en la web no ilustran el proceso de carga en sí, sino más bien el resultado final (la transferencia de electrones). Esto explicaría, en parte, que los estudiantes respondan de manera descriptiva, de igual manera que lo hacen las imágenes existentes sobre el tema.

Con respecto al 21,5% de respuestas que mantienen su nivel, es importante destacar que la mayoría de ellas, un 13,1% (correspondiente a 88 respuestas), lo hace porque ya corresponden a respuestas de alto nivel de adecuación al modelo. Por el contrario, un 0,44% (equivalente a 3 respuestas) mantuvo un nivel alternativo/inconsistente.

A continuación, se presenta un ejemplo de una respuesta que se mantiene en el nivel alto en el paso de una actividad a otra. Este es el caso del estudiante 6 entre las actividades 7 y 8. La actividad 7 requería que los estudiantes explicaran la interacción a distancia entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio tras haber observado el fenómeno. En esta instancia, el estudiante respondió que “...mientras más cerca esté de la placa superior, mas se inclina la barra metálica dentro del electroscopio. Esto sucede porque la fuerza de atracción (+ y -) y repulsión (- y -) es mayor. La fuerza esta relacionada con la distancia y la cantidad de cargas...”(E6,A7). Luego, en la actividad 8, tras escuchar la explicación del profesor, su respuesta fue que “la cargas negativas se desplazan lo más lejano al cuerpo del caucho cargado negativamente (lo más lejano siempre y cuando el material lo permita) Las cargas positivas se quedan en el lugar. La barra metálica se mueve con respecto al eje por la fuerza de repulsión (entre cargas negativas)”(E6,A8). Ambas explicaciones corresponden al nivel alto ya que en ellas se señala el movimiento de cargas y las variables

que intervienen en la fuerza eléctrica para que se produzca ese movimiento. Además, en la segunda respuesta se añade mayor nivel de detalle sobre la distribución de cargas en un material conductor al ser inducido.

Finalmente, hay un 27,9% de las respuestas que fueron clasificadas como “no trazables”. Esto debido a que no hubo explicaciones para dichas preguntas por distintos motivos: estudiantes que se ausentaron de la clase, otros que no respondieron la pregunta y un porcentaje menor que no lo hizo pensando en que ya había alcanzado el nivel máximo de adecuación. De este 27,9%, un 4,7%, correspondiente a 32 respuestas fue dejado en blanco por los estudiantes porque ya se había alcanzado el nivel alto en la actividad anterior.

### **5.3.1.2 Discusión con el profesor**

En la categoría de las discusiones con el profesor se observa que un 41,0% de las respuestas suben de nivel, un 7,5% baja de nivel en distinto grado y un 36,1% se mantiene en el mismo nivel. Por lo tanto, es posible concluir que la discusión con el profesor fue más beneficiosa para la obtención de respuestas más adecuadas al modelo, que las explicaciones.

En primer lugar, se analizarán ejemplos de discusiones llevadas a cabo antes de que las respuestas de los estudiantes mejoraran. Una de ellas se llevó a cabo entre las actividades 12 y 13, donde los estudiantes tuvieron que explicar la interacción entre un generador VDG, dos cables (un dieléctrico y un conductor) y un electroscopio. Antes de observar este experimento, los estudiantes escriben sus predicciones sobre lo que ocurrirá. Después, los estudiantes observan la carga de un electroscopio unido por una cadena metálica a un generador de VDG y luego unidos por un hilo. Para comenzar la discusión, el profesor indaga sobre las ideas usadas por los estudiantes en sus predicciones. Por ejemplo, la respuesta del estudiante 44 señala que: “como el hilo no es un conductor y está en contacto con el VDG y el electroscopio, cuando el generador se cargue positivo el electroscopio no reaccionará”(E44,A12). Este tipo de respuesta, que solo hace referencia a la transferencia de carga, y no a la inducción, como si el aislante pudiera “bloquear” la interacción a distancia, se categorizó en el nivel inconsistente. Al reconocer que la carga por inducción no es observada por los estudiantes, el profesor pregunta sobre los distintos resultados de la experimentación y sobre cómo la distancia podría influir en ellos. Estas preguntas permiten

que los estudiantes tengan otro foco de atención en la experiencia y consideren la inducción como una posible explicación.

Tras la discusión con el profesor, el mismo estudiante señala en la actividad 13 que *“...con el hilo, como es un dieléctrico, se carga solo en la zona de contacto y no transfiere por todo éste, pero si acercamos el electroscopio al VDG, sus agujas se repelen ya que éste se induce, reordenándose sus cargas, como el VDG es positivo, los electrones se agrupan en la parte superior y en la inferior queda positivo, haciendo que se repelan entre sí”* (E44,A13). En este extracto de la respuesta del estudiante se observa claramente la presencia de elementos del modelo de distribución y carga eléctrica, en particular de la idea de inducción, como el reordenamiento de cargas y su dependencia de la interacción con la distancia, llegando así al nivel alto de adecuación al modelo.

El impacto de las discusiones con el docente en las explicaciones de los estudiantes se puede explicar por el tipo de interacción que promueve el profesor, el que tuvo como objetivo hacer el conocimiento explícito, tanto para los estudiantes como para él. De esta manera, se cuenta con una base conocida por todos para la construcción de un nuevo conocimiento. A este tipo de interacción, Mercer (1995) le llama “obtener conocimiento relevante de los estudiantes” que luego podrá ser incorporado al proceso de andamiaje.

Por el contrario, un 6% de todas las respuestas recolectadas bajó de nivel de profundidad y sólo un 1,5% baja hasta llegar al nivel descriptivo. Esto puede deberse a distintos factores, entre ellos la posible dificultad que podría significar el cambio de tipo de representación, tema que se desarrollará en el apartado 5.3.3. De todos modos, al comparar el porcentaje de respuestas que bajan en algún grado con aquellas que aumentan tras la discusión con el profesor, se mantiene la evidencia para la hipótesis de que este tipo de interacción benefició el nivel de las respuestas.

Con respecto al 36,1% de las respuestas que mantuvieron su nivel, es importante mencionar que la mayoría de ellas (22,5%) ya se encontraban en un nivel alto de adecuación al modelo, por lo tanto, no podían mejorar más considerando las herramientas y contenidos desarrollados en la SEA. Dentro del porcentaje restante, un 10,1% corresponde a respuestas que se mantuvieron en el nivel medio, y un 0,8% mantuvo un nivel inconsistente. Este

último porcentaje se concentró en un conjunto de actividades (12, 13, 14, 15, 19, 20, 24 y 27) que tienen en común el requerir la articulación entre dos ideas (contacto e inducción, polarización y campo eléctrico) para desarrollar la explicación adecuada. En el caso de las actividades 24 y 27, requiere articular las ideas de dos modelos, lo que puede volver la tarea más compleja.

A continuación, se presenta un ejemplo de una respuesta que se mantuvo en el nivel alto en el paso de una actividad a otra. Este es el caso de la estudiante 1 entre las actividades 19 y 20. En la actividad 19 los estudiantes tenían que explicar la interacción a distancia entre un electrodo en una cubeta y pequeños pedazos de hilo flotando en aceite. En esta instancia, la estudiante respondió que *“el campo eléctrico generado por el electrodo es radial, lo que genera que los hilos se muevan de esa forma (de la figura: hilos alineados) se van a reorganizar las cargas de los hilos, es decir hay una polarización de los dieléctricos (hilos)”*(E1,A19). Luego, en la actividad 20, tras la discusión con el profesor la estudiante agregó que además *“los hilos orientan sus dipolos debido a la fuerza que ejerce el CE generador por el electrodo...”*(E1,A20). A pesar de que en esta segunda respuesta hay mayor nivel de detalle en lo que respecta a las cargas eléctricas porque se refiere a la reorientación de un dipolo, en ambas se interpreta que la estudiante reconoce la acción del campo eléctrico sobre las cargas de los hilos, por lo tanto, la discusión con el profesor le ayudó a profundizar su explicación y mantenerla en un nivel de adecuación alto.

Finalmente, se encontró un 15,5% de respuestas clasificadas en la categoría de “no trazables”. En este porcentaje se encuentran aquellas preguntas donde no hubo explicaciones por que los estudiantes no las completaron, o no asistieron a la sesión, o las dejaron en blanco pensando en que ya había alcanzado el nivel máximo de adecuación en sus explicaciones anteriores. De este 15,5%, un 2,7%, correspondiente a 20 respuestas, fue dejado en blanco por los estudiantes porque ya se había alcanzado el nivel alto en la actividad anterior.

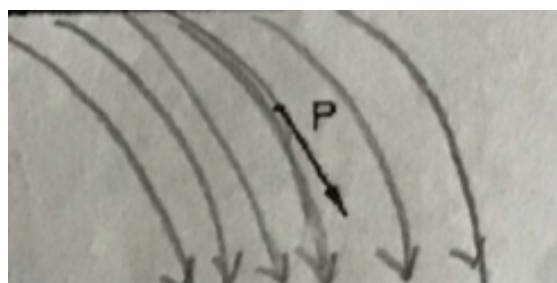
En general, podemos apreciar que la discusión con el profesor pudo promover mejoras sostenidas en los niveles de adecuación al modelo de las respuestas durante la SEA.



### 5.3.1.3 Discusión entre pares

En la categoría de discusión entre pares, se observa que un 58,2% de las respuestas recolectadas sube de nivel tras este tipo de interacción, un 3,5% baja de nivel en mayor o menor grado, un 0,0% baja al nivel descriptivo y un 29,4% se mantiene en el mismo nivel. Por lo tanto, se vuelve evidente que la discusión entre pares resulta ser el tipo de interacción que más ayuda a la mejora de las respuestas en este contexto.

Primero, se presentarán algunos ejemplos de respuestas que se encuentran en el 58,2% de respuestas que subieron de nivel. Uno de estos casos se encuentra en las actividades 22, donde los estudiantes tienen que responder qué líneas no corresponden a líneas de campo eléctrico en un diagrama y por qué, y en la 23, donde se les solicita dibujar los vectores que representan a la fuerza eléctrica, líneas de trayectorias y líneas de campo eléctrico dadas diferentes situaciones. En la actividad 22 la estudiante 59 respondió que la línea que ella seleccionó “...no es línea porque las líneas de campo van de positivo a negativo”(E59,A22). Esta respuesta fue categorizada en el nivel descriptivo, pues solo considera las convenciones sobre las líneas de campo eléctrico, dejando de lado, por ejemplo, la explicación de su construcción o la idea de función vectorial para reconocer las líneas erradas de la imagen. Luego, en la actividad 23, la misma estudiante, dibuja las líneas de campo eléctrico para el vector fuerza sobre una carga positiva en P, logrando un resultado altamente apegado al modelo científico, como se observa en la siguiente imagen:



(E59,A23)

Figura 76 dibujo de una de las respuestas de la estudiante 59 en la actividad 23

Entre ambas actividades, hay un período prudente de discusión entre los estudiantes, donde comentan sus resultados de las actividades 21 y 22, resuelven sus dudas y comparten sus conocimientos con los demás. Luego de esto, comienzan a abordar la actividad 23 de forma crítica tras este período de reflexión colectiva. Probablemente, al asignar tiempo para el cuestionamiento en este entorno de aprendizaje, los estudiantes lograron pasar de una

discusión de debate, sobre las convenciones de las líneas de campo eléctrico, a una conversación de tipo exploratoria (Mercer, 1995), sobre la representación de las líneas de campo eléctrico.

A continuación, se presentará un ejemplo seleccionado del 3,5% de respuestas que bajaron de nivel tras la discusión entre pares. Este ejemplo corresponde al caso del estudiante 21 en el mismo par de actividades (22 y 23). En la primera actividad, el estudiante argumenta su decisión de la siguiente manera: *“la tendencia de la curva no representa como si estuviera una carga en ese lugar, pues debería representar una tangente”* (E21,A22). Luego, en la actividad 23, el estudiante completa el siguiente dibujo, ilustrando la fuerza eléctrica que experimentaría una carga positiva ubicada en el punto P, dado el patrón de líneas de campo que se ve en la imagen.



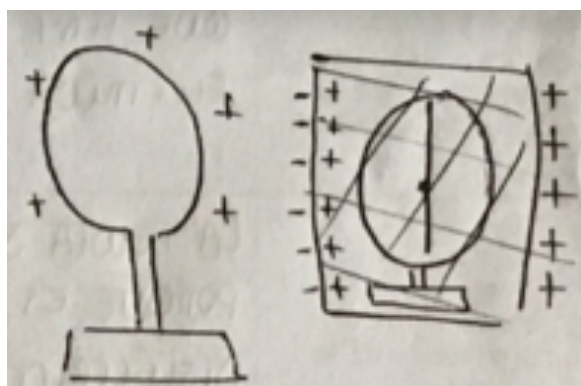
(E21,A23)

Figura 77 dibujo de la respuesta del estudiante 21 en la actividad 23

A pesar de que en la actividad anterior escribió explícitamente que la dirección de la fuerza sería tangencial a las líneas de campo, al dibujarla, dibujó una línea sobre las mismas. Una posible explicación sería que la persona que responde no entiende el significado de la representación de las líneas de campo eléctrico, ya que interpreta que la línea de campo representa directamente la dirección y sentido de la fuerza eléctrica en todos los puntos.

Con respecto al 29,4% de las explicaciones que mantienen su nivel en el paso de una actividad a otra, es importante mencionar que la mayoría de ellas (21,8%, correspondiente a 44 respuestas) se mantiene en el nivel medio, un 2,0% (4 respuestas) se mantiene en el nivel alto y un 4,5% (9 respuestas) en el nivel alternativo/inconsistente. Estos resultados muestran que la discusión entre pares, al generar consenso entre las ideas de los estudiantes, permite que la gran mayoría de ellos tenga al menos nociones intermedias de lo que significa el fenómeno sobre el que han discutido.

Un ejemplo de una explicación que se mantiene en el nivel medio es la del estudiante 51, para las actividades 16 y 17. En la primera actividad, donde los estudiantes tenían que predecir lo que ocurrirá en la interacción a distancia entre un generador VDG, un electroscopio y una jaula de Faraday. En esta instancia, el estudiante señaló que *“la jaula se cargará positivamente y esta carga al electroscopio negativamente”* (E51,A16). Luego, en la actividad 17, el estudiante debía explicar el fenómeno tras haberlo observado. La respuesta del estudiante en este caso fue: *“el electroscopio no se mueve, queda neutro, debido a que la jaula genera un campo exterior”* (E51,A17). Dicha explicación fue complementada con el siguiente dibujo:



(E51,A17)

Figura 78 dibujo de la respuesta del estudiante 51 en la actividad 17

La respuesta del estudiante se mantiene en un nivel medio debido a que hace referencia a cómo se podrían distribuir las cargas eléctricas, dada la influencia de un campo eléctrico externo. Sin embargo, no alcanza el nivel alto porque habla de una interacción externa pero no del fenómeno que ocurre al interior de la jaula.

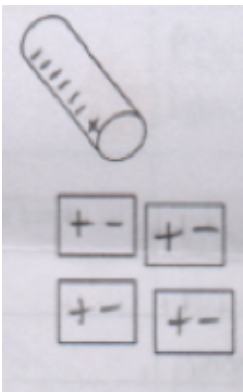
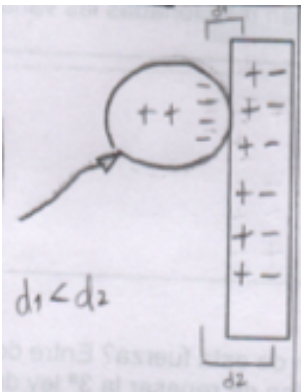
Finalmente, un 9,0% de los datos fue clasificado como “no trazable” debido a que no hubo respuesta a las preguntas planteadas. Esto se debe a que los estudiantes no asistieron a la clase, no la respondieron o decidieron dejarla en blanco creyendo que ya habían alcanzado el máximo nivel de adecuación. De este 9,0%, un 0,5%, correspondiente a 1 respuesta, fue dejado en blanco porque ya se había alcanzado el nivel alto en la actividad anterior.

#### 5.3.1.4 No hay discusión ni explicación relacionada

Finalmente, en aquellas instancias de la SEA donde no hubo una discusión ni una explicación previa relacionada al tema que los estudiantes debían trabajar, un 8,7% de las respuestas suben de nivel, un 36,1% bajan de nivel en mayor o menor grado y un 33,1% se

mantiene en el nivel. Por lo tanto, se observa que la mayoría de las respuestas tienden a bajar o a mantenerse en el mismo nivel en estos casos.

A continuación, se analizará un ejemplo de una respuesta que mejora luego de una instancia en que no hay discusiones ni explicaciones en la sala. En el paso de la actividad 1 - donde se pide a los estudiantes explicar la interacción a distancia entre las cargas de un tubo cargado por frotación y pequeños pedazos de papel - a la 4 - donde deben explicar la interacción a distancia entre un globo de látex cargado por frotación y una pared de yeso - se encuentra una mejoría en la respuesta de la estudiante 54 sobre el concepto de polarización. La tabla 26 ubicada a continuación ilustra esta mejoría.

Respuesta de la estudiante 54 en la Actividad 1	Respuesta de la estudiante 54 en la Actividad 4
<p data-bbox="224 783 776 846">“...como los papelitos estaban neutros, <u>se acercan al tubo porque se atraen</u>”</p>  <p data-bbox="573 1224 673 1255">(E54,A1)</p>	<p data-bbox="813 783 1242 846">“...<u>se reordenan las cargas de la pared</u> (polarización)”</p>  <p data-bbox="1187 1224 1287 1255">(E54,A4)</p>

**Tabla 26** Ejemplo de mejora de respuesta para la polarización tras ninguna discusión ni explicación relacionada

Entre las actividades 1 y 4, sólo se trabajan las ideas de carga por frotación y contacto. Posiblemente la mejora en las explicaciones de los estudiantes para la polarización se debe a que los estudiantes dejan de confundir los procesos de transferencia y de reordenamiento.

Del total de las respuestas recopiladas, un 14% baja de nivel. A continuación, se presenta un ejemplo para esta situación, que corresponde a las respuestas del estudiante 30 en el paso de la actividad 15 a la 19. En la actividad 15 los estudiantes tenían que explicar la interacción a distancia entre un generador VDG y una pelota de poliestireno (plumavit). La respuesta del estudiante en este caso fue que “la pelota se mueve hacia el VDG debido a una fuerza de atracción, debido a al campo eléctrico que se produce alrededor del VDG, esto produce un reordenamiento de cargas....la fuerza de atracción será mayor cuanto más

*cerca esté la pelota.*”(E30,A15). Luego, en la actividad 19, donde los estudiantes debían explicar la interacción a distancia entre un electrodo en una cubeta y pequeños pedazos de hilo flotando en aceite, responde que *“el electrodo al estar en contacto con los hilos hace que en un extremo quede positivo y en el otro negativo por lo que se alinean”* (E30,A19). Inicialmente, en la actividad 15, el estudiante solo reconoce la presencia de una fuerza en el proceso; posteriormente, en la actividad 19, no reconoce la influencia del campo eléctrico producido por los electrodos en las cargas de los hilos y le atribuye la alineación a una carga por contacto.

Un 22,1% del total de las respuestas baja también, pero esta vez al nivel de las descripciones. A continuación, se presenta el ejemplo de las respuestas del estudiante 12 para las actividades 13 y 16. En la actividad 13, donde los estudiantes tenían que explicar la interacción entre un generador VDG, dos cables (un dieléctrico y un conductor) y un electroscopio, el estudiante respondió que: *“al ser material dieléctrico (hilo), el fenómeno que se observa es gracias a la inducción, que produce una redistribución de carga. Si acercamos el electroscopio al VDG, la aguja describirá un ángulo mayor, ya que la fuerza de repulsión que experimenta la aguja es mayor...”*(E12,A13). Luego, en la actividad 16, donde la tarea era explicar la interacción a distancia entre un generador VDG, un electroscopio y una jaula de Faraday, su respuesta fue que: *“(sin jaula) el electroscopio hay inducción. Al ponerle la jaula, disminuye la inducción que percibe el electroscopio”* (E12,A16). En la explicación para la actividad 13 el estudiante reconoce que la redistribución de cargas y el movimiento de la aguja en el electroscopio se debe a la inducción, pero luego, en la respuesta de la actividad 16, menciona nuevamente la inducción y a la vez le asigna una característica protectora a la jaula, resultando en una explicación poco coherente.

La mayoría de las respuestas recopiladas en este contexto se mantuvieron en su nivel (33,1%). De ese porcentaje la mayoría (14,6%, correspondiente a 49 respuestas) se mantuvo en un nivel alto y una minoría (0,3%, equivalente a 1 respuesta) se mantuvo en un nivel bajo. A continuación, se presentan a modo de ejemplo las respuestas del estudiante 14 para las actividades 4 y 5, que se mantienen en un nivel alto. En la actividad 4, donde la tarea era explicar la interacción a distancia entre un globo de látex (cargado por frotación) y

una pared de yeso, la respuesta del estudiante fue la siguiente: *“el globo es un material dieléctrico el cual al ser frotado hay una transferencia de cargas.... estas cargas son agrupadas en un sector del globo donde fue frotado...”*(E14,A4). Posteriormente, en la actividad 5, donde los estudiantes debían explicar la interacción a distancia entre las cargas de un tubo (cargado por frotación) y pequeños pedazos de papel, respondió que *“el peine es un material dieléctrico que al ser frotado (con otro material) transfiere sus cargas en sectores específicos, es decir donde se frotó quedando cargado en esa zona...”*(E14,A5). La explicación del estudiante en ambas actividades se apega al modelo de distribución e interacción de cargas ya que abarcan la transferencia y el tipo de material del montaje.

Finalmente, se encontró un 22,1% de respuestas que fueron ubicadas en la categoría de “no trazables”. Entre ellas se encuentran aquellas preguntas donde no hubo explicaciones por que los estudiantes no las completaron, o no asistieron a la sesión, o las dejaron en blanco pensando en que ya había alcanzado el nivel máximo de adecuación en sus explicaciones anteriores. De este 22,1%, un 3,0%, correspondiente a 10 respuestas, fue dejado en blanco por los estudiantes porque ya se había alcanzado el nivel alto en la actividad anterior.

### 5.3.2 Análisis de la evolución de las respuestas de los estudiantes según el tipo de experiencia

En esta sección, se analizará la influencia del tipo de experiencia con el que se trabajó en cada momento de la SEA, en los cambios del nivel de las respuestas de los estudiantes.

Cambio de nivel/ tipo de experiencia	Experiencia real	Experiencia hipotética	Experiencia previa real	Experiencia previa hipotética	No hay experiencia relacionada
Suben de nivel	0 (0,0%)	107 (39,9%)	435 (46,4%)	26 (12,9%)	34 (8,5%)
Bajan de nivel	68 (50,7%)	10 (3,7%)	20 (2,1%)	34 (16,9%)	73 (18,2%)
Bajan a nivel descriptivo	4 (3,0%)	60 (22,4%)	16 (1,7%)	3 (1,5%)	80 (19,9%)
Mantiene el nivel	2 (1,5%)	50 (18,7%)	310 (33,0%)	97 (48,3%)	121 (30,1%)
No trazable	60 (44,8%)	41 (15,3%)	157 (16,7%)	41 (20,4%)	94 (23,4%)
Total	134 (100,0%)	268 (100,0%)	938 (100,0%)	201 (100,0%)	402 (100,0%)

**Tabla 27** Recuento de respuestas por cada nivel donde se observa el contexto de la discusión. Se remarcan los valores más altos

Al igual que en la dimensión anterior, los valores presentados en la tabla 27 fueron sometidos a la prueba estadística de  $\chi^2$  (chi cuadrado). El resultado de esta prueba determinó que los valores obtenidos no fueron aleatorios, sino que responden a los cambios en las características de la SEA ( $p$  value = 0). Por lo tanto, se puede afirmar que existen diferencias significativas en la calidad de las explicaciones de los estudiantes según el tipo de experiencia con el que se trabajó en cada actividad.

A nivel general, se encontró que el tipo de experiencia que más favorece las respuestas de los estudiantes fue la experiencia previa real, que consiguió que un 46,4% de las explicaciones subieran de nivel y solo un 3,8% bajara. Este resultado posiblemente se deba a que en la experiencia previa real se pueden observar los detalles de la experimentación, lo que permite que los estudiantes puedan recolectar sus propios datos, ver el proceso completo (desde el estado inicial hasta el final) e interactuar con el montaje (ajustarlo, probar el experimento de distintas formas, etc.). Además, el tiempo que transcurre entre que los estudiantes realizan el experimento y tienen que redactar su explicación permite la

interpretación de los datos y la maduración del conocimiento, especialmente considerando que entre ambas instancias ha habido discusiones y revisiones de la teoría que favorecen la comprensión del fenómeno.

En segundo lugar, se encuentra la experiencia hipotética, tras la cual un 39,9% de las explicaciones mejoraron y un 26,1% bajaron en algún grado. A diferencia de la experiencia real, en este caso los estudiantes no pueden interactuar con el montaje, sino que tienen que imaginarlo y seguir las instrucciones que se plantean para generar un consenso de una actividad que no existe en la realidad. Por lo tanto, si el estudiante imaginó algo de manera distinta a cómo fue planteado, es altamente probable que su razonamiento no responda a lo esperado por el profesor.

En tercer lugar, se ubica la experiencia previa hipotética. Este tipo de experiencia permitió que un 12,9% de las respuestas subieran de nivel, y que un 18,4% disminuyera su nivel. En este caso, además de las dificultades que presenta el trabajar con un montaje hipotético, se suma la importancia de que los estudiantes recuerden un escenario planteado anteriormente de forma hipotética. Existe la posibilidad de que algunos estudiantes no lo recuerden a cabalidad, o no hayan puesto suficiente atención la primera vez que se presentó, lo que impactaría en cualquier actividad que vuelva a recurrir al montaje que deben imaginar.

En cuarto lugar, se encuentran aquellos momentos de la SEA donde no hay una experiencia vinculada a las actividades. Estas instancias permitieron que un 8,5% de las respuestas mejoraran y que un 38,1% bajara de nivel. En este caso, es poco probable que los estudiantes mantengan el nivel exacto de desempeño si no ha habido algún estímulo que apunte a reforzar la idea que se está trabajando.

Finalmente, en el último lugar se ubica la experiencia real, que no facilitó la mejora de ninguna explicación, pero sí favoreció que un 53,7% de ellas disminuyera su nivel. Este resultado probablemente se debe a que el foco de los estudiantes puede estar en múltiples cosas, como en la materialidad, los movimientos, el funcionamiento del aparato, etc., y no necesariamente en el fenómeno que se espera que expliquen. Por lo tanto, la dificultad de explicar un experimento en el mismo momento en que está ocurriendo es mayor. Este resultado, sumado al éxito de la experiencia previa real ya mencionado, es evidencia de que



es necesario dar tiempo a los estudiantes para que maduren sus respuestas, ya que el solo observar un fenómeno no significa que se haya comprendido, el aprendizaje no es instantáneo, si lo fuera no tendríamos que pensar en diferentes estrategias para favorecer el aprendizaje de distintos estudiantes.

### 5.3.2.1 Experiencia real

Como se menciona en el párrafo anterior, este tipo de experiencia no favoreció la mejora de las explicaciones de los estudiantes, probablemente por los motivos ya mencionados. Del 53,7% de las respuestas que bajaron de nivel en algún grado, un 50,7% bajó dentro de los distintos niveles de adecuación al modelo y un 3% bajó al nivel descriptivo. También se encontró que un 1,5% de las respuestas mantuvieron su nivel y que un 44,8% de ellas fue clasificado como no trazable.

Primero, se presenta un ejemplo de respuesta que se encuentra en el 50,7% de respuestas que bajaron de nivel. Este corresponde a las actividades 8, donde los estudiantes tienen que explicar la interacción entre las cargas de un PVC cargado y las de un electroscopio, y 12, donde deben explicar la interacción entre un generador VDG y un electroscopio, estando ambos unidos con dos cables (uno dieléctrico y uno conductor). En la actividad 8, el estudiante 55 respondió que *“debido a la inducción que se produce en estos conductores las cargas negativas del electroscopio neutro se desplazan hasta la parte baja lo que genera el movimiento...la fuerza entre éstas”* (E55,A8). Esta respuesta fue categorizada en el nivel alto/consistente, ya que reconoce el reordenamiento como consecuencia del movimiento de los electrones repelidos por el cuerpo externo. Luego, en el caso de la actividad 12, el mismo estudiante responde que *“el electroscopio no tendrá una unión directa con el VDG por lo que se mantendrá neutro”* (E55,A12). En este caso, la respuesta del estudiante se categorizó en el nivel alternativo/inconsistente, debido a que no reconoce la inducción, solo alude a en una carga por contacto y, por lo tanto, tampoco menciona el reordenamiento de cargas.

Una posible explicación para el descenso del nivel de la respuesta es que el montaje de la actividad 12 era muy complejo, en relación con la actividad 8, por lo tanto, es posible que la atención de los estudiantes se haya desviado a otra parte del fenómeno, que no permite explicar lo solicitado por el docente. Además, como ya se mencionó en el punto anterior, el

hecho de que la experiencia esté ocurriendo simultáneamente a la explicación también puede ser un obstáculo para que los estudiantes se focalicen en lo relevante de la experiencia, y no brinda el tiempo necesario para la maduración del razonamiento, previo a la redacción de las respuestas.

De las respuestas recolectadas, un 3% bajó al nivel de descripción ante una experiencia real. El siguiente ejemplo ilustra esta situación que ocurre nuevamente entre las actividades 8 y 12. La respuesta del estudiante 18 para la actividad 8 es que *“a medida que se acerca la barra cargada negativamente, en la parte superior del electroscopio las cargas positivas aparecen arriba y las negativas hacia abajo ya que estas se mueven. El exceso en la parte de abajo (más negativas) por lo que hay una mayor fuerza de repulsión”*(E18,A8). Esta respuesta fue categorizada en el nivel alto/consistente, debido a que menciona el reordenamiento que se produce debido al desplazamiento de los electrones. Luego, en la actividad 12, el estudiante responde que *“al estar en contacto con el VDG con el hilo, la barra se moverá poco debido a que hay un tipo de electrización por inducción”*(E18,A12). Esta respuesta corresponde al nivel de descripciones, porque no hay especificación del reordenamiento de las cargas debido a la inducción, solo una descripción de lo que el estudiante cree que observará. Este descenso al nivel de la descripción puede responder a una tendencia observada en los estudiantes de este estudio, que se caracteriza por responder de manera más global, en vez de especificar los detalles de cómo se produce el fenómeno observado.

Del total de respuestas, un 1,5% se mantienen en el mismo nivel en el contexto de una experiencia real, correspondiendo a dos respuestas. El siguiente ejemplo ilustra este movimiento, para las mismas actividades 8 y 12 mencionadas en los párrafos anteriores. El estudiante 58 señala en la actividad 8 que *“el electroscopio mantiene (su) carga neta igual a 0. La distancia entre el cuerpo y el conductor afecta a la inducción, específicamente el desplazamiento de las cargas (por ser conductor) es inversamente proporcional a la distancia. Las cargas se distribuyen”*(E58,A8). Esta respuesta fue categorizada en el nivel medio/algunas inconsistencias, ya que si bien se menciona la redistribución de cargas y se reconoce la importancia del tipo de material, falta referirse a que las cargas negativas son las que se desplazan y hay errores en la manera de expresar la idea de cómo afecta la distancia en este tipo de fenómeno, pero sí se apunta a las bases de lo que se espera de la

explicación de una inducción. Lo mismo sucede en la actividad 12, donde el estudiante escribe que *“también ocurrirá movimiento...es la inducción, ya que el VDG al poseer carga positiva, reordena las cargas del conductor (electroscopio) y (hay una) dependencia con la distancia”* (E58,A12). Por lo tanto, el estudiante se mantiene en el mismo nivel de adecuación en ambas actividades.

Finalmente, hay un 44,8% de las respuestas que fueron clasificadas como “no trazables”. De este 44,8%, solo 1 respuesta fue dejada en blanco por el/la estudiante porque ya se había alcanzado el nivel alto/consistente en la actividad anterior.

### **5.3.2.2 Experiencia hipotética**

La experiencia hipotética facilitó que un 39,9% de las respuestas subieran de nivel y que solo un 3,7% bajara. También se encontró que, en este tipo de experiencia, un 22,4% de las explicaciones bajaron al nivel descriptivo, un 18,7% mantuvo su nivel y un 15,3% fueron clasificadas como no trazables.

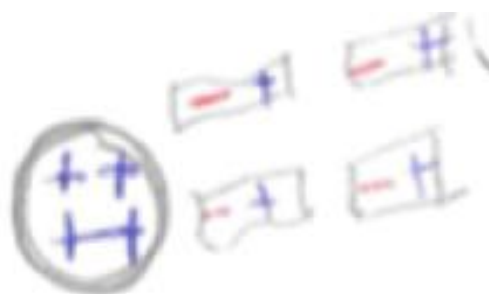
A continuación, se presentan ejemplos de respuestas en el contexto de la experiencia hipotética para cada una de las tendencias.

Primero, se presenta un ejemplo que pertenece al 39,9% de las respuestas que subieron de nivel. Este ejemplo corresponde a las actividades 15, donde los estudiantes tienen que explicar la interacción entre un generador VDG cargado, y las cargas de una pelota de poliestireno; y 19, donde los estudiantes deben explicar la interacción entre un electrodo y las cargas de pequeños hilos flotando en aceite. Ambas actividades se analizan desde el punto de vista del campo eléctrico y de la polarización. El siguiente ejemplo se interpreta desde el punto de vista del campo eléctrico.

Para la actividad 15, la respuesta del estudiante 36 es que *“los dipolos se reorganizan y la distancia de las cargas positivas es menor por tanto se atraen”*(E36,A15). Esta respuesta fue categorizada en el nivel medio/algunas inconsistencias porque presenta una mirada de acción a distancia y no contempla la idea de campo eléctrico. Posteriormente, para la actividad 19, el estudiante responde que *“el electrodo genera un campo eléctrico, los dipolos de los hilos se alinean por esa fuerza, de tal manera que haya (se produzca) la fuerza de atracción entre ellos (dipolos)”*(E36,A19). Esta respuesta fue categorizada en el

nivel alto/consistente, porque reconoce la existencia del campo eléctrico, que es quién ejerce la fuerza sobre los dipolos. Podemos especular que el mejoramiento de la explicación en torno a la temática de campo eléctrico se debe a que esa era la idea que se estaba trabajando en ese momento de la SEA.

A continuación, presentamos un ejemplo perteneciente al 3,7% del total de las respuestas, que demuestra una baja en su nivel de adecuación al modelo. En este caso, se presentan las respuestas del estudiante 17 para las mismas actividades desarrolladas en el párrafo anterior: 15 y 19. En la actividad 15, el estudiante explica que *“más cerca la fuerza aumenta y más lejos la fuerza disminuye. La fuerza de atracción será mayor, puesto que cada vez el VDG será más positivo”* (E17,A15). Esta respuesta fue categorizada en el nivel medio/algunas inconsistencias ya que hace referencia a una acción a distancia y a la ley de Coulomb. Más adelante, en la actividad 19, el estudiante plantea que *“cada hilo se polariza debido a la distribución de cargas”* (E17,A19).



(E17,A19)

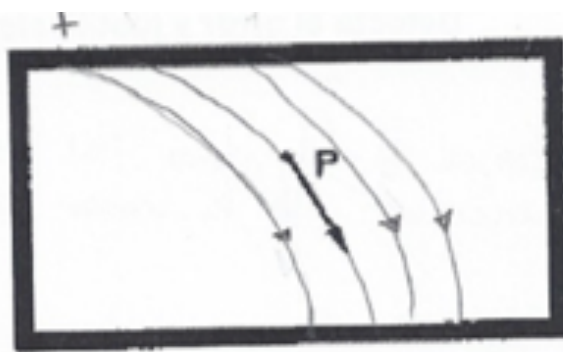
**Figura 79** Dibujo que acompaña la respuesta del estudiante 17 en la actividad 19

Esta segunda respuesta fue categorizada en el nivel alternativo/inconsistente, porque se mantiene la misma mirada de acción a distancia, pero no se involucra la idea de campo eléctrico y desaparece la Ley de Coulomb. Además, se presenta una idea alternativa que plantea que la distribución de cargas genera la polarización, y no las fuerzas que ejerce el campo eléctrico sobre las cargas.

El ejemplo que se presenta en las siguientes líneas pertenece al 22,4% de las respuestas que bajaron al nivel de las descripciones. En este caso, las respuestas corresponden a la actividad 21, en que los estudiantes deben dibujar líneas de campo eléctrico y explicar qué representan; y la actividad 22, donde deben identificar qué líneas de campo corresponden y cuáles no en un dibujo. Para la actividad 21, el estudiante 4 responde que *“Las líneas de campo eléctrico representan la dirección y sentido que tomaran las fuerzas que ejerce cada”*

electrodo a la carga (de prueba) en un punto. Los hilos siguen la dirección y sentido de un campo generado por los electrodos, lo que guía a una representación...”(E4,A21). Esta explicación fue categorizada en el nivel medio/algunas inconsistencias. Para la actividad 22, la respuesta del estudiante 4 fue que “...no sería una línea de campo, ya que el sentido que tiene el campo eléctrico es de una carga positiva a la negativa y esta sería inversa” (E4,A22). Esta respuesta fue categorizada en el nivel de descripción porque solo se refiere a las convenciones de signo para la representación de las líneas de campo eléctrico.

Finalmente, se presenta un ejemplo que pertenece al 18,7% de la totalidad de las respuestas, que mantuvieron su nivel. De este porcentaje, un 4,9%, equivalente a 13 respuestas se mantuvo en el nivel alto/consistente, y un 8,6%, es decir 23 respuestas, se mantienen en el nivel medio/algunas inconsistencias. El ejemplo seleccionado es el del estudiante 29 en las actividades 22, explicada en el párrafo anterior; y 23, donde los estudiantes tienen que dibujar fuerza sobre una carga en un punto y la trayectoria posible de una carga eléctrica ubicada en un punto de un campo eléctrico, en diferentes configuraciones de campo eléctrico. En la actividad 22, la respuesta del estudiante fue que “si ponemos una carga de prueba positiva, el vector resultante no seguiría la dirección de la línea de campo dibujada” (E29,A22). Esta respuesta fue categorizada en el nivel medio/algunas inconsistencias porque su razonamiento hace referencia a que la fuerza sobre la carga corresponde al sentido de la línea, en vez de señalar que es tangencial a la línea. En la siguiente actividad, la 23, el estudiante dibuja la siguiente respuesta:



(E29,A23)

**Figura 80** Dibujo que corresponde a la respuesta del estudiante 29 en la actividad 23

Esta respuesta se mantiene en el nivel medio/algunas inconsistencias porque lo enunciado en la respuesta de la actividad 22 se evidencia en el dibujo de la actividad 23.

Finalmente, del 15,3% de las respuestas que fueron categorizadas como no trazables, un 0,4%, es decir una respuesta se encontraba en el nivel alto/consistente, y un 2,2%, equivalente a 6 respuestas, se encontraba en el nivel medio/algunas inconsistencias.

### 5.3.2.3 Experiencia previa real

Como ya fue mencionado, la experiencia previa real fue la que permitió la mejora de una mayor cantidad de respuestas, específicamente un 46,4%. Además, tras ella solo se registró un 2,1% de respuestas que bajaron de nivel, y un 1,7% que bajaron al nivel de las descripciones. Un 33% mantuvo su nivel y un 16,7% fue identificado como no trazable.

El primer ejemplo para presentar corresponde al 46,4% del total de estudiantes que mejoró su nivel explicativo en el contexto de una experiencia previa real. Este ejemplo se recolectó entre las actividades 24, donde los estudiantes deben explicar la interacción por contacto entre un VDG y un conductor asimétrico; y 27, donde tienen que proveer una explicación mejorada para el mismo fenómeno. El ejemplo por analizar corresponde a lo escrito por el estudiante 26 en la actividad 24, donde señala que *“induce más por el menor radio”*(E26,A24). Esta respuesta fue codificada en el nivel de descripción, ya que hace referencia al material, pero sin dar una explicación de qué ocurre en el fenómeno. En la actividad 27, el estudiante respondió que *“se moverá más porque es más densa (la parte de menor radio) que el resto del conductor”*(E26,A27). La segunda respuesta del estudiante mejoró considerablemente y fue categorizada en el nivel alto/consistente, ya que hace referencia a que hay más inducción debido a que hay mayor densidad de cargas en la sección de menor radio del conductor. Además, en su explicación involucra las expresiones matemáticas que permiten interpretar el fenómeno.

Del total de respuestas recolectadas, un 2,1% corresponde a aquellas que bajaron de nivel en el contexto de una experiencia previa real. Este movimiento se puede observar en la respuesta del estudiante 30 para las actividades 6, y 7, donde los estudiantes deben explicar la interacción a distancia entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio. El dibujo que el estudiante realizó para la actividad 6 se categorizó en el nivel medio/algunas inconsistencias porque representa un reordenamiento coherente pero no del todo correcto porque mueve las cargas positivas de lugar.

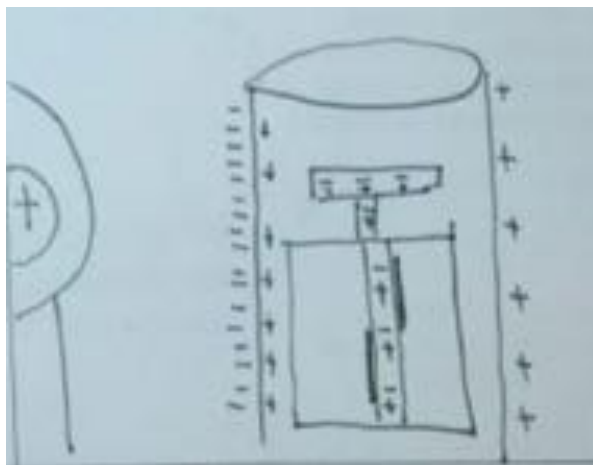


(E30,A6)

**Figura 81** Dibujo que corresponde a la respuesta del estudiante 30 en la actividad 6

Luego, en la actividad 7, el estudiante escribe: *“por lo que al acércame más se mueve más la barita. Esto debido a que hay una gran cantidad de electrones pasando al electroscopio”*(E30,A7). Esta respuesta fue categorizada en el nivel bajo/inconsistente, ya que atribuye el movimiento a la transferencia de cargas, en vez de a la inducción.

Un ejemplo del 1,7% de las respuestas que bajaron al nivel de descripciones se puede encontrar en la respuesta del estudiante 62 para las actividades 17, donde los estudiantes explican la interacción a distancia entre un VDG y un electroscopio que está dentro de una jaula de Faraday, y 18, que es la explicación mejorada del mismo fenómeno. En la actividad 17, el estudiante responde que *“el VDG induce las cargas de la jaula de modo que estas se redistribuyen quedando las negativas más cerca posible del VDG. Esta distribución neutraliza el interior de la jaula, por lo que el electroscopio no es afectado”* (E62,A17). Además, ilustra la situación de la siguiente manera:



(E62,A17)

**Figura 82** Dibujo que es parte de la respuesta del estudiante 62 en la actividad 17

Esta respuesta fue categorizada en el nivel medio/algunas inconsistencias ya que no explica la nula inducción interna, pero sí se acerca al modelo y se toman en cuenta las cargas. Luego, en la actividad 18, el estudiante responde que *“independiente de la posición, la jaula genera un espacio neutro mientras este hecha de un material conductor, como el metal, por lo que la inducción magnética afectará solamente a la jaula y no a su interior”*(E62,A18). Esta respuesta se clasifica en el nivel de descripción porque concluye a partir de lo que observa sin utilizar las ideas del modelo y además confunde la interacción eléctrica con la magnética (Maloney, 1985).

Del 33% de las respuestas que mantuvieron su nivel, el 16,3% permaneció en el nivel alto/consistente, y un 13,0% se mantuvo en el nivel medio/algunas inconsistencias. El ejemplo que se presenta a continuación corresponde a las respuestas del estudiante 40 para las actividades 6, donde se requiere explicar la interacción a distancia entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio y 7, donde deben proveer una explicación mejorada del mismo fenómeno. La siguiente imagen muestra la respuesta del estudiante 40 para la actividad 6. Esta explicación fue categorizada en el nivel alto/consistente porque ilustra un reordenamiento coherente con el modelo. Luego, en la actividad 7 el estudiante repitió los mismos dibujos, por lo tanto, su respuesta se mantuvo en el nivel alto/consistente.



(E40, A6 y A7)

**Figura 83** Respuesta del estudiante 40 para las actividades 6 y 7

Finalmente, del 16,7% de respuestas no trazables, un 3,5% se encontraban en el nivel alto, y un 1,3% en el nivel medio/algunas inconsistencias.

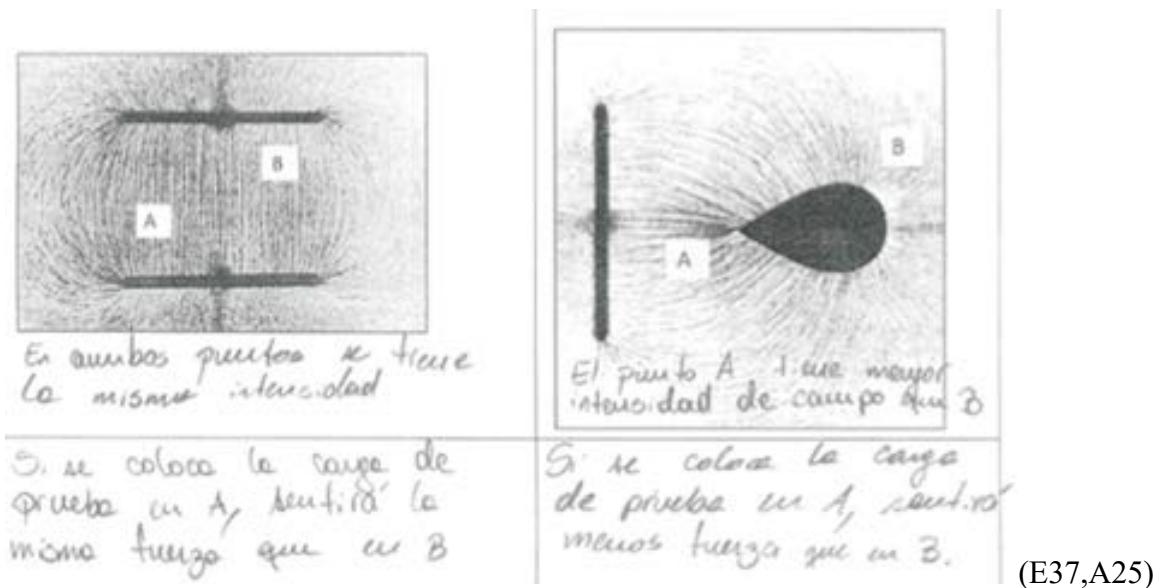


#### 5.3.2.4 Experiencia previa hipotética

Tras este tipo de experiencia se identificó que un 12,9% de las explicaciones mejoraron, mientras que un 16,9% de ellas disminuyeron su nivel. Sólo un 1,5% disminuyó al nivel descriptivo. Por otro lado, la mayoría de las respuestas recolectadas tras este tipo de experiencia mantuvieron su nivel (48,3%) y un 20,4% fue categorizado como no trazable. A continuación, presentaremos un ejemplo de respuestas que representan cada uno de estos movimientos.

Un ejemplo que representa al 12,9% de las respuestas que mejoraron en el contexto de experiencia previa hipotética corresponde a la respuesta del estudiante 52 para las actividades 19, donde los estudiantes tienen que explicar la interacción entre un electrodo y las cargas de pequeños hilos flotando en aceite, y 20, donde deben presentar su explicación mejorada del mismo fenómeno. En la actividad 19, el estudiante escribió que *“los hilos se alinean por ser que la fuerza de repulsión que se genera donde las cargas del hilo son positivas y las del VDG también”*(E52,A19). Esta respuesta fue categorizada en el nivel de descripción, porque hace referencia a la idea de que las cargas del mismo signo se repelen, pero no reconoce que los hilos están neutros y que para que se produzca el alineamiento debe haber una polarización, lo que involucra el reordenamiento de las cargas. Luego, en la actividad 20 el estudiante explica que *“Lo que existe es una polarización en cada hilo lo que significa que se reorientan las cargas”* (E52,A20). Esta respuesta fue categorizada en el nivel medio/alguna inconsistencia ya que en esta ocasión el estudiante reconoce la polarización, pero no habla de las fuerzas eléctricas involucradas.

El siguiente ejemplo corresponde al 16,9% de las respuestas que bajaron de nivel en el contexto de la experiencia previa hipotética, y corresponde a la respuesta del estudiante 37 para las actividades 25 y 26. En la actividad 25, los estudiantes tienen que explicar la interacción entre dos electrodos de diferentes geometrías e hilos flotando en aceite, y en la 26 tienen que identificar, a partir de una ilustración, las zonas de mayor y menor intensidad de campo. La respuesta del estudiante 37 en la actividad 25 se presenta a continuación:



Esta respuesta fue categorizada en el nivel alto/consistente debido a que el estudiante reconoce las fuerzas que actúan en el fenómeno de manera coherente con el modelo. Más adelante, en la actividad 26, el estudiante responde de la siguiente manera:

*“aquella zona que no está entre las cargas (refiriéndose a la imagen de la izquierda), es decir, en la izquierda, arriba y abajo... y en la otra imagen entre las cargas (refiriéndose a la imagen de la derecha)”*(E37,A26)

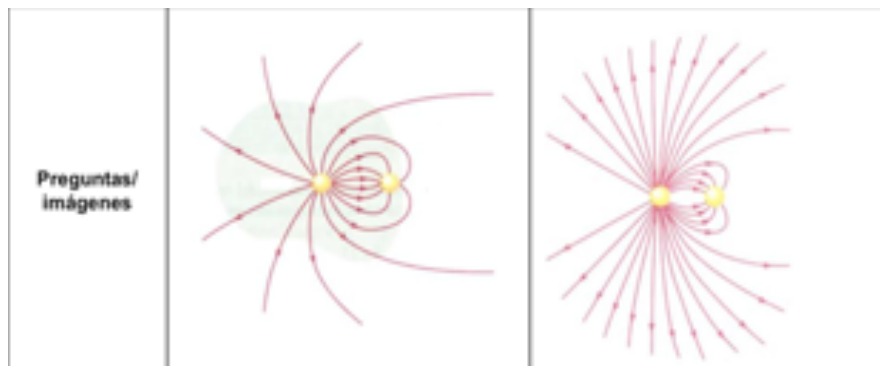


Figura 84 Imagen de la actividad 26 del dossier de los estudiantes

Esta respuesta fue categorizada en el nivel bajo/inconsistente porque asocian el campo eléctrico con las líneas, por lo tanto, asumen que donde hay pocas líneas la intensidad es menor. Sin embargo, no mencionan aquellos lugares donde no hay líneas dibujadas como zonas de baja intensidad. Este ejemplo demuestra la importancia que tienen las representaciones con que se presentan las situaciones hipotéticas a los estudiantes, ya que, aparentemente, en base a los resultados, la imagen seleccionada no sería adecuada para

trabajar el concepto de densidad de líneas de campo eléctrico y su relación con la intensidad de campo eléctrico.

Un ejemplo del 1,5% de las respuestas que bajaron al nivel descriptivo es la del estudiante 59 en las actividades 19 y 20, ya explicadas en párrafos anteriores de este apartado. En la actividad 19, el estudiante respondió que *“se alinean porque el material se polariza y se tensiona debido al efecto de las fuerzas entre las cargas del material y la del generador (electrodo)”*(E59,A19). Esta respuesta fue codificada en el nivel alto/consistente, porque menciona que la polarización se debe al efecto de las fuerzas entre cargas. Sin embargo, en la actividad 20 el estudiante responde que *“los hilo se queda en dirección radial”* (E59,A20). Esta segunda respuesta fue categorizada en el nivel de descripción, ya que solo destaca lo observable del fenómeno.

El último ejemplo del contexto de experiencia previa hipotética corresponde al 48,3% del total de respuestas, que son aquellas que mantuvieron su nivel. De ellas, la mayoría, específicamente un 42,3% se mantuvieron en el nivel alto. Las citas que se presentan corresponden al estudiante 1 en las actividades 19 y 20, presentadas en el párrafo anterior, enfocándonos en las ideas del modelo de campo. En la actividad 19 el estudiante respondió que *“el campo eléctrico generado por el electrodo puntual..... genera que los hilos se muevan...ya que se van a reorganizar las cargas de los hilos, se polariza el dieléctrico”* (E1,A19). Esta respuesta fue categorizada en el nivel alto/consistente debido a que muestra una sucesión de eventos coherentes: que el campo eléctrico se crea y que luego influye en el reordenamiento de las cargas de los hilos. En la actividad 20 su respuesta fue que *“los hilos se orientan sus dipolos debido a la fuerza que ejerce el campo eléctrico generado por el electrodo”*(E1,A20), explicación que también fue categorizada en el nivel alto/consistente.

Finalmente, del 20,4% de respuestas categorizadas como no trazables, un 7,5% ya se encontraba en el nivel alto/consistente.

### 5.3.2.5 No hay experiencia relacionada

Finalmente, tras las instancias de la SEA en que no hubo ningún tipo de experiencia asociada, se encontró que un 8,5% de las explicaciones subió de nivel, un 18,2% bajó de nivel, y un 19,9% bajó al nivel descriptivo. La mayoría de las respuestas se mantuvieron en este caso (30,1%) y hubo un 23,4% de las respuestas que fueron clasificadas como no trazables.

El primer ejemplo que presentamos pertenece al 8,5% del total de respuestas que subieron de nivel. Este corresponde a las respuestas del estudiante 34 en las actividades 3 y 9. La actividad 3 requiere que los estudiantes expliquen la interacción por contacto entre un tubo cargado, una barra de metal y una bola de metal, mientras que la 9 consiste en explicar la interacción por contacto entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio. A continuación, se presenta la respuesta del estudiante para la actividad 3.

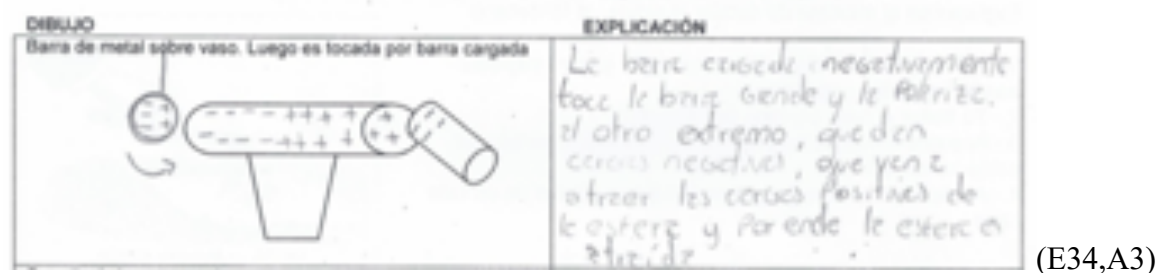


Figura 85 Respuesta del estudiante 34 en la actividad 3

Esta respuesta fue categorizada en el nivel alternativo/inconsistente, ya que menciona que la barra se polariza, en vez de señalar que se carga en exceso. Más, adelante, en la actividad 9, el estudiante escribe que “...al tocar cede electrones al electroscopio y este queda cargado negativamente (más cargas negativas) de forma homogénea”(E34,A9). Esta respuesta corresponde al nivel alto/consistente porque menciona que en una carga por contacto se produce una transferencia de electrones, obteniéndose así una carga en exceso en el electroscopio distribuida de manera uniforme.

El segundo ejemplo corresponde al 18,2% del total de las respuestas, que bajó de nivel cuando no había experiencias relacionadas. Este ejemplo se encontró entre la actividad 15, donde los estudiantes explican la interacción a distancia entre un generador VDG y una pelota de poliestireno y 19, donde explican la interacción a distancia entre un electrodo en una cubeta y pequeños hilos flotando en aceite. El ejemplo corresponde a las respuestas del

estudiante 61. En la actividad 15, la explicación del estudiante fue: *“hay una redistribución de los electrones (en la pelota) hacia el polo que está en dirección de VDG lo que produce la atracción hacia el VDG por la diferencia de fuerzas”*(E61,A15), respuesta que fue categorizada en el nivel alto/consistente. Luego, en la actividad 19, escribió que *“la carga positiva crea un campo eléctrico en la región...el campo induce (a las cargas) cargas haciendo que se alineen, por reordenamiento”* (E61,A19). Esta respuesta fue categorizada en el nivel medio/algunas inconsistencias ya que en ella no se habla de el detalle del reordenamiento.

Un 19,9% de las respuestas bajó al nivel descriptivo en este contexto. Un ejemplo de esta situación corresponde a las respuestas del estudiante 64 en las actividades 1 y 4. En la actividad 1, donde los estudiantes deben explicar la interacción entre un tubo de plástico cargado por frotación y la posterior atracción de pequeños papeles, la respuesta del estudiante es que *“la barra al quedar cargada produce en los papelitos un reordenamiento en las cargas”*. Esta respuesta fue categorizada en el nivel medio/consistente. Luego, en la actividad 4, donde deben explicar la interacción entre un globo cargado por frotación y una pared, el estudiante señala que *“la pared comienza a atraer al globo”*. Esta respuesta fue categorizada en el nivel de descripción ya que no explica el reordenamiento de las cargas, sino que describe el fenómeno observable.

Del 30,1% de respuestas que se mantienen en el nivel, un 13,7% se encontraba en el nivel alto/consistente, y un 4,5% en el nivel medio/algunas inconsistencias. El siguiente ejemplo corresponde a las respuestas del estudiante 15 en las actividades 1 y 4, ya explicadas en el párrafo anterior. En la actividad 1 el estudiante afirma que *“al frotar el tubo con un paño se carga eléctricamente”* y más adelante, en la actividad 4, escribe la siguiente frase: *“al cargar el globo por frotación...”*. Ambas respuestas fueron codificadas en el nivel de descripción ya que no hacen referencia a la transferencia de electrones, solo señalan la consecuencia del fenómeno.

Finalmente, del 23,4% de las respuestas no trazables, un 3,32% ya se encontraba en el nivel alto/consistente, y un 2,2% en el nivel medio/algunas inconsistencias.

### 5.3.3 Análisis de la evolución de las respuestas de los estudiantes según el tipo de dispositivo experimental

En esta sección, se analizará la influencia del tipo de dispositivo experimental de cada momento de la SEA, en los cambios del nivel de las respuestas de los estudiantes.

Cambio de nivel/Dispositivo experimental	Igual dispositivo experimental	Distinto dispositivo experimental
Suben de nivel	467 (38,7%)	135 (18,3%)
Bajan de nivel	40 (3,3%)	165 (22,4%)
Bajan a nivel descriptivo	76 (6,3%)	87 (11,8%)
Mantiene el nivel	424 (35,2%)	156 (21,2%)
No trazable	199 (16,5%)	194 (26,3%)
Total	1206 (100,0%)	737 (100,0%)

**Tabla 28** Recuento de las respuestas por cada nivel donde se observa el tipo de dispositivo experimental. Se remarcan los valores más altos

Las respuestas se codificaron en la categoría “Igual” cuando pertenecen a actividades distintas en que se usa el mismo montaje para trabajar el mismo tipo de explicación. Por ejemplo, en las actividades 14 y 15 los elementos utilizados fueron un generador Van der Graaff y una pelota de plumavit. Por el contrario, las respuestas codificadas en la categoría “distinto” se refieren a aquellas pertenecientes a actividades distintas donde se utilizaron montajes diferentes para trabajar un mismo tipo de explicación. Por ejemplo, en las actividades 2 y 3 para la carga por contacto, donde se usó una vara y una esfera metálica, y la actividad 9, donde se usó un tubo de PVC y un electroscopio.

Al igual que en las dos dimensiones anteriores, los datos de la tabla fueron sometidos a la prueba de  $\chi^2$  (chi cuadrado), donde se comprobó que los resultados no son aleatorios ( $p$  value = 0), sino influenciados por la variable del tipo de dispositivo.

A nivel general, se encontró que el uso del mismo dispositivo experimental fue más beneficioso para la evolución de las explicaciones que el cambio de dispositivo. Una posible explicación para esto es que al cambiar el montaje es necesaria la transferencia de conocimientos, para poder identificar los conceptos y procesos en el nuevo montaje, lo que

requiere que estos hayan tenido un tiempo para madurar. Además, es posible que en las instancias en que se trabajaba un concepto por primera o segunda vez, la SEA no haya favorecido esta transferencia, ya que para que se transfiera el conocimiento es necesario acompañar a los estudiantes mientras trabajan el fenómeno en distintos contextos (Billing, 2007), lo que no había ocurrido aún ya que cada fenómeno se mostró de manera aislada.

### **5.3.3.1 Igual dispositivo experimental**

Después de trabajar con el mismo dispositivo experimental en diferentes actividades, se encontró que un 38,7% de las respuestas suben de nivel, un 3,3% baja de nivel y un 6,3% baja al nivel descriptivo. También, se identificó que un 35,2% de las respuestas se mantuvieron en el nivel y un 16,5% no fue trazable.

En este contexto, el dispositivo experimental que provocó el mayor aumento en el nivel explicativo de los estudiantes (54 respuestas que subieron de nivel) es el de las actividades 12 y 13 para la inducción. Además, en este contexto también se mantuvieron 3 respuestas, 0 bajaron de nivel y 2 bajaron al nivel descriptivo). Este dispositivo corresponde a la interacción entre un generador de VDG, dos cables (un dieléctrico y un conductor), y un electroscopio.

Creemos que esto responde a que, al solicitar a los estudiantes que explicaran el fenómeno por primera vez (como predicción, sin haber visto el resultado del experimento aún) su atención se enfocó en los cables y en que el experimento se trataba de transferencia de cargas. Por lo tanto, los estudiantes se concentraron en la carga por contacto y olvidaron la interacción a distancia entre el generador VDG y el electroscopio. Luego, al observar que el electroscopio conectado al cable dieléctrico se movía, se dieron cuenta de que no habían considerado una de las ideas del modelo. Por lo tanto, al solicitar la segunda explicación, muchos de ellos incorporaron la noción de inducción.

Por otro lado, al analizar las respuestas desde la noción de contacto, encontramos que 22 respuestas subieron en algún grado de nivel y 37 se mantuvieron en el nivel medio/algunas inconsistencias. Nuevamente, se observa que cuando se trabajan dos ideas del mismo fenómeno, las explicaciones tienden a ser más detalladas para una de las ideas, por sobre la otra. La misma situación se observa en las actividades 4 y 5 para la frotación y la polarización, siendo esta última en la que los estudiantes mejoran su nivel explicativo.

Con respecto al 35,2% del total de las respuestas que se mantienen, la mayoría de ellas se encuentra entre las actividades 7 y 8 para inducción, y 19 y 20 para campo eléctrico. En ambas instancias, 47 respuestas se mantuvieron en el contexto del mismo dispositivo experimental, siendo casi todas categorizadas en el nivel alto/consistente (47 para las actividades 7 y 8, 46 para las actividades 19 y 20). El montaje de las actividades 7 y 8 corresponde a la interacción a distancia entre un tubo de PVC y un electroscopio, mientras que el montaje de las actividades 19 y 20 consta de la interacción a distancia entre un electrodo y unos hilos flotando en aceite.

En el caso de las actividades 7 y 8, creemos que hay dos variables que podrían explicar los buenos resultados de los estudiantes. La primera es que en este dispositivo se trabaja solo con una idea (carga por inducción), lo que permitiría que los estudiantes se focalicen en ella. La segunda variable es que la actividad 7 corresponde a la segunda explicación del fenómeno, posterior a la experimentación y una discusión con el profesor. Luego, en la actividad 8, se pide a los estudiantes que provean una explicación final tras la explicación del profesor. Por lo tanto, los distintos elementos del contexto, tales como el tiempo para madurar la idea, y la explicación y discusión del profesor deberían haber ayudado a consolidar la idea de inducción. En el caso de las actividades 19 y 20, la situación es diferente, ya que en ellas se trabajan dos ideas de modelos distintos. Sin embargo, una de ellas – campo eléctrico – le da sustento a la otra idea – reordenamiento de cargas. Pensamos que además hay otras dos variables que contribuyeron a los buenos resultados en estas actividades. Una de ellas es la ilustración utilizada, que ayuda a los estudiantes a imaginar un campo eléctrico, porque muestra que toda la región está perturbada. La otra variable que puede haber influido es que durante la sesión 3, donde se llevaron a cabo las actividades, se trabajó reiteradamente sobre la idea de campo eléctrico, por lo tanto, los estudiantes ya llevaban un tiempo pensando en dicho fenómeno en la misma clase, antes de completar las actividades.



### 5.3.3.2 Distinto dispositivo experimental

Después de trabajar con distintos dispositivos experimentales, un 18,3% de las respuestas sube de nivel, un 22,4% baja de nivel, y un 11,8% baja al nivel de la descripción. Además, se encontró que un 21,2% de las respuestas se mantiene en el mismo nivel y un 26,3% fue clasificado como no trazable.

Las actividades en que más respuestas subieron de nivel al trabajar con distintos dispositivos experimentales son las actividades 15 y 19, y 22 y 23. En la actividad 15 el montaje corresponde a un generador VDG que atrae a una pelota de plumavit, el de la actividad 19 es el mismo mencionado en el apartado anterior, un electrodo que interactúa a distancia con unos hilos flotando el aceite. En el caso de este par de actividades, 45 respuestas subieron de nivel. Por otro lado, el dispositivo de la actividad 22 corresponde a una ilustración de tres cuerpos, dos cargados y uno neutro, donde los estudiantes deben explicar qué líneas corresponden al campo eléctrico dada esa distribución de cargas. En la actividad 23 el dispositivo corresponde a dibujos de diferentes configuraciones de campo eléctrico, donde los estudiantes deben indicar la fuerza sobre una carga de prueba y su posible trayectoria. En este caso, 44 respuestas subieron de nivel.

En el caso de las actividades 15 y 19, creemos que la mejora en el nivel explicativo de los estudiantes puede responder a que, tal como mencionamos en el apartado anterior, la idea de campo eléctrico fue trabajada reiteradamente en la sesión 3, especialmente entre dichas actividades, lo que podría ayudarles a consolidar las ideas. Por otro lado, en las actividades 22 y 23, pensamos que la mejora se debe a las diferentes demandas de cada actividad. En la actividad 22, los estudiantes se enfocaron en las convenciones de signos para dibujar las líneas de campo para cargas positivas y negativas. Por lo tanto, muchas de sus respuestas fueron categorizadas en el nivel de descripciones, ya que no explicaban la representación. Luego, en la actividad 23, se pedía a los estudiantes aplicar las ideas, lo que permitió observar más profundidad en la comprensión de lo que representan las líneas de campo.

Con respecto a las respuestas que bajaron de nivel en el contexto de distintos dispositivos experimentales, el mayor número se concentra en las actividades 8 y 12, donde 51 respuestas descendieron. La actividad 8 consiste en explicar la interacción a distancia entre un tubo de PVC cargado y un electroscopio; y la 12 en explicar la interacción entre un

generador VDG, dos cables (uno dieléctrico y uno conductor) y un electroscopio. Nuestra interpretación ante el alto número de respuestas que disminuyeron en este contexto es que, por un lado, en la actividad 8 los estudiantes debían proveer una explicación final tras dos explicaciones previas que les permitieron mejorar su respuesta, y por el otro, como ya se mencionó anteriormente en este apartado, en la actividad 12 los estudiantes se enfocaron excesivamente en la transferencia de cargas, a expensas de la inducción.

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, LIMITACIONES E IMPLICACIONES**

**En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir del cruce entre los resultados de la investigación y la literatura existente en el ámbito de la didáctica de la física. También se detallan las limitaciones de este trabajo, posibles líneas de investigación asociadas y las implicaciones que tiene para la docencia.**

**Profesores en formación explicando a estudiantes de una escuela algunos fenómenos electrostáticos**



## **6.1 Conclusiones de los resultados de la investigación**

### **6.1.1 Conclusiones referidas a la primera pregunta de investigación:**

#### **Sobre la tipología y variedad de explicaciones identificadas**

Hemos dividido las conclusiones que nos permiten responder a la primera pregunta de investigación en 4 apartados que se presentan a continuación.

##### **6.1.1.1 En electrostática todos los fenómenos aparentemente simples requieren explicaciones complejas**

Durante la realización de esta investigación, pudimos identificar que, tanto en los libros de texto de física, como en los programas de enseñanza escolar – y el mismo programa del curso de electrostática original de la Pedagogía en Física y Matemática, instancia en que se implementó el presente estudio – se desarrolla con poca profundidad la enseñanza del modelo de distribución e interacción de cargas. Como ya se señaló en la revisión bibliográfica (Guisasola, 1996; Mulhall et al., 2001; Guisasola, 2014), más bien se aborda como algo superficial y fácil de explicar. Los resultados de esta investigación sugieren que es necesario enseñar este modelo con mayor profundidad, como también sugiere recientemente Kaldaras et al. (2021). Aquellos fenómenos que aparentemente podrían resultar más simples de explicar (como la atracción de pequeños papeles o entre globos) requieren de un conocimiento de la electrostática que no es para nada básico, ya que se compone de las ideas clave del modelo de distribución e interacción de cargas (como la conservación de la carga, la fuerza eléctrica, y el tipo de material, entre otros factores).

Sin nos centramos en el caso del experimento de la atracción de papeles pequeños, que es uno de los más simples pero también uno de los paradigmáticos (Izquierdo, 2005), la explicación que se hemos visto frecuentemente es que al frotar un cuerpo este se carga y se vuelve capaz de atraer otros cuerpos, como también sugieren Petridou et al. (2009) o Kaldaras et al. (2021). Sin embargo, consideramos que este fenómeno requiere de una explicación mucho más profunda para futuros profesores de física, como la que proponemos a continuación: Lo que ocurre al frotar dos dieléctricos es que se transfieren electrones de un cuerpo al otro en la zona frotada quedando estas con mayor cantidad de electrones en un cuerpo y menor cantidad en el otro. Uno de estos cuerpos se acerca a un

montón de papeles pequeños que son dieléctricos, y comienzan a interactuar las cargas en exceso del cuerpo que se acerca con las cargas eléctricas de los papeles. Al ser el papel dieléctrico, no permite el movimiento de sus electrones por la superficie, solamente permite una leve torsión, girando cada átomo y sacándolo de su posición original. A raíz de esta nueva disposición se puede producir un desequilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión sobre el cuerpo. Si el cuerpo cargado externo se acercó lo suficiente, la fuerza de atracción será mayor que la fuerza de repulsión, dando como resultado una fuerza neta distinta de cero en el sentido del cuerpo externo, produciéndose la atracción de los papeles hacia el cuerpo externo.

Otro ejemplo de un fenómeno simple en el que una descripción más profunda podría ayudar a su comprensión es la carga de un conductor aislado mediante el contacto, que también fue abordado en Furió y Guisasola (1993) y Guruswamy et al. (1997). La explicación tradicional que solemos encontrar es que el conductor se carga y queda con el signo de quien lo carga. No obstante, sería conveniente a la hora de abordar este fenómeno poner énfasis que, al entrar en contacto un cuerpo cargado con un conductor neutro aislado, se produce una transferencia de electrones debido a las fuerzas eléctricas entre cargas. El conductor queda cargado en exceso y, dada la característica del material – que es conductor – las cargas pueden moverse por su superficie distribuyéndose de forma uniforme debido a la acción de fuerzas de atracción y repulsión entre ellas.

Además, desde una perspectiva más amplia hay que tener en cuenta que estos dos ejemplos pueden ser explicados desde el punto de vista de la energía, utilizando el concepto de potencial eléctrico, perspectiva que no se abordó en la secuencia utilizada en esta investigación.

#### **6.1.1.2 Cada fenómeno electrostático conlleva una amplia variedad de explicaciones identificadas**

Como se presentó en el capítulo anterior, se identificó una amplia variedad de explicaciones para cada experiencia de aula. Por ejemplo, en el caso de los experimentos asociados al modelo de distribución e interacción de cargas, se encontraron entre 4 y 5 tipos de explicaciones. En el caso de las actividades del modelo de campo eléctrico, se encontraron

entre 2 y 3 tipos distintos de explicaciones. Finalmente, para las situaciones de aula del modelo híbrido, se encontraron 3 tipos de explicaciones diferentes.

En algunos casos, los distintos tipos de explicaciones coinciden con lo reportado por la literatura. Por ejemplo, la creación de cargas y el comportamiento de aislantes y conductores frente a los fenómenos eléctricos (Guisasola, 1996), la confusión entre la trayectoria de cargas y las líneas de campo eléctrico (Guth, 1995), el reduccionismo al aplicar la ley de Coulomb en el caso de la Jaula de Faraday (Furió y Guisasola, 1998b), y la asignación de una entidad física a las líneas de campo eléctrico (Törnkvist, et al., 1993).

A su vez, como se ha discutido en el capítulo anterior, los diferentes tipos de explicaciones pueden estar influenciados por distintos factores, tales como:

- errores que provienen del aprendizaje de la mecánica y que fueron transferidos a este contexto (Galili, 1995);
- reducción funcional, es decir, la tendencia a no considerar todas las variables que participan en un problema concreto (Viennot, 1988);
- razonamientos lineales causales, es decir, que se tiende a pensar en una relación causal directa entre una condición y su resultado, sin tener en cuenta que una causa podría generar distintas consecuencias, y que cada consecuencia puede provenir de distintas causas (Pintó et al., 1996).
- la persistencia de ideas alternativas que no coinciden con el modelo científico vigente (Viennot, 2001) pero que, a pesar de las explicaciones del docente no han sido modificadas ;
- y paralelismos históricos, es decir, la aplicación de razonamientos empleados por científicos en el pasado que hoy son considerados incompletos (Furió et al., 2004).

También encontramos que algunas representaciones gráficas del campo eléctrico dificultan la comprensión del concepto por parte de los estudiantes. Esto se observó, por ejemplo, al pedirles que determinaran en qué zona de un dibujo el campo era más intenso. Dependiendo de la imagen, la atención de los estudiantes se enfocaba en zonas particulares del dibujo, que no necesariamente tenían relación con el fenómeno que querían interpretar. Podemos concluir entonces que hay imágenes más adecuadas para modelar el fenómeno

matemáticamente (Karam, 2014) y otras más apropiadas para visualizar el fenómeno. Es decir, no hay representaciones mejores que otras de por sí, sino que depende de la demanda del docente y de la idea del modelo que se quiera construir, cuál resultará más beneficiosa.

En el caso de fenómenos más complejos, como el efecto punta, consideramos que fue beneficioso haber realizado una experimentación previa con el mismo montaje, antes de pedirle a los estudiantes que explicaran el fenómeno. Para explicar el efecto punta los estudiantes requieren comprender la idea de potencial eléctrico (superficie equipotencial), que, de acuerdo con la literatura, es difícil de entender, de asignarle una utilidad (Guisasola et al., 2008b; Velazco y Salinas, 2001; Mulhall et al., 2001; Furió y Guisasola, 1998c) y de representar mediante las líneas equipotenciales (Bollen et al., 2017). Como se explicó en el apartado 4.2.3.4, la sesión N° 4 comienza con una experimentación para generar en los estudiantes la necesidad de involucrar el concepto de potencial eléctrico en sus explicaciones. La combinación entre la experimentación, con su correspondiente registro de datos, y la matematización de las variables participantes, permitió abordar de manera exitosa el modelo híbrido. La consideramos exitosa porque llevó a que desaparecieran las descripciones y las explicaciones de nivel alternativo/inconsistente, a que disminuyeran las respuestas de tipo medio/algunas inconsistencias, y a que aumentaran las respuestas del nivel alto/consistente.

Con respecto a la elaboración de explicaciones de parte de los futuros docentes, encontramos que hay una tendencia importante a reducir la explicación de fenómenos complejos encapsulándolos en un solo concepto que lo resume todo pero que en realidad dice poco, algo muy común en los razonamientos simples que suelen dar los estudiantes de física (Viennot, 2001). Por ejemplo, al señalar que un cuerpo “se frota y se carga” o que “se atrae por inducción”. En las últimas actividades de cada sesión dedicada a una misma temática pudimos encontrar algunas explicaciones más sofisticadas y detalladas. Para explicar la mejora influida por las características de la SEA, le atribuimos la evolución de las explicaciones a dos factores: primero, el constante esfuerzo por intencionar un modelo explicativo dividido en pasos en la etapa de discusión con el profesor, cuando los estudiantes compartían sus respuestas de manera oral (pidiéndoles explícitamente que desarrollaran más sus ideas en lo escrito) y, segundo: al formato de las guías de trabajo, que

contemplaban distintos espacios para que los estudiantes fueran mejorando progresivamente sus explicaciones.

A pesar de la gran diversidad de tipos de explicaciones encontradas, pudimos ordenarlas siguiendo una gradación de las menos apegadas al modelo a las más, inspirándonos en las progresiones de aprendizaje empíricas existentes en la literatura (Neumann et al., 2013; Hernández et al., 2015). Esta distribución tiene una potencial aplicación para de tipo didáctico ya que nos permite identificar la brecha que existe entre lo que el estudiante reporta y la respuesta que se espera que alcance. Por lo tanto, el docente que cuenta con esta información ya sabe qué ideas debe trabajar con el estudiante para alcanzar el nivel esperado. Esto nos acerca a la elaboración de una progresión de aprendizaje de la electrostática, que seguiremos desarrollando en futuros trabajos.

### **6.1.1.3 ¿Reordenamiento o transferencia? La clave de la comprensión del Modelos de Distribución e Interacción de cargas**

Durante la elaboración de la SEA encontramos que las ideas del modelo de distribución e interacción de cargas se pueden explicar mediante dos procesos base: la transferencia y el reordenamiento de cargas. Si bien en ambos casos, la explicación detallada dependerá de las condiciones del fenómeno estudiado, como por ejemplo, el tipo de material y las condiciones iniciales de carga, el efecto final siempre será uno de los dos. Sin embargo, encontramos que los estudiantes tienden a confundir ambas ideas, es decir, para un fenómeno de transferencia (frotación y contacto) utilizan ideas de reordenamiento, y para un fenómeno de reordenamiento (polarización e inducción) utilizan ideas de transferencia. Este hallazgo es muy importante ya que señala la necesidad de focalizar la enseñanza en estas dos ideas, que son los fundamentos del modelo de distribución e interacción de cargas, antes de problematizar de manera parcializada cada uno de los métodos de electrificación. Hasta ahora, en la literatura se han identificado las dificultades que enfrentan los estudiantes al trabajar estas ideas (Guisasola, 1996; Mulhall, et al., 2001; Park, 2001; Guisasola, 2014) y se ha presentado evidencia empírica de que su grado de comprensión evoluciona tras la instrucción (Merino et al., 2019; Kaldaras et al., 2021). Sin embargo, durante nuestra investigación no encontramos autores que destacaran la importancia de enfocarse en los procesos de transferencia y reordenamiento para estructurar la enseñanza



del Modelo de Distribución e Interacción de Cargas. Consideramos que esta es una contribución relevante de este trabajo a la enseñanza de la física.

#### **6.1.1.4 Los experimentos en electrostática: el reto de pasar de pensar en propiedades a pensar en interacciones**

En el caso de fenómenos más complejos como la Jaula de Faraday y el Efecto Punta, encontramos que la presencia de montajes aparatosos y específicos impacta en las explicaciones de los estudiantes. De entre los 9 tipos de explicaciones de la SEA, solo en estos fenómenos fue donde se encontraron ideas relacionadas con la materialidad del montaje. Con materialidad nos referimos, no al tipo de material, sino a la conformación estructural del montaje. En estas experiencias de aula los estudiantes le atribuían importancia en sus explicaciones a las distancias, medidas y otras características particulares del montaje, en vez de atribuir los fenómenos a la interacción de cargas y el tipo de materiales. En sus explicaciones, los estudiantes dejan entrever sus creencias de que el fenómeno solo se presenta en las condiciones específicas en que lo está mostrando el profesor (López y Pintó, 2013). El desafío entonces es lograr que los estudiantes pasen de pensar en propiedades, a pensar en interacciones para explicar los fenómenos. Cabe destacar también que en las respuestas para estos montajes no se encontraron descripciones. Creemos que esto puede responder a distintos motivos: la mayor cantidad de herramientas que poseen para elaborar sus explicaciones, adquiridas en sesiones previas de la SEA, la curiosidad que despiertan los montajes, y las herramientas matemáticas con las que cuentan para sustentar estas explicaciones.

## **6.1.2 Conclusiones referidas a la segunda y tercera pregunta de investigación: sobre la evolución de las ideas y la influencia de las características didácticas**

Hemos dividido las conclusiones que nos permiten responder a la segunda y tercera pregunta de investigación en 4 apartados que se presentan a continuación.

### **6.1.2.1 Existe convergencia en la progresión de las ideas, pero no siempre es lineal**

Tras analizar las respuestas de los estudiantes a lo largo de la SEA encontramos que existe una tendencia hacia la convergencia de las respuestas en el nivel más apegado al modelo científico. Los estudiantes parten demostrando diversas ideas en sus respuestas iniciales, sin embargo, a medida que avanzan en la SEA existe menos diversidad de respuestas, las que en general son o se acercan a las respuestas esperadas.

Este avance en las respuestas de los estudiantes es progresivo (Hernández et al., 2015). Esto se puede observar especialmente en aquellas explicaciones relacionadas con el modelo de distribución e interacción de cargas. Por ejemplo, de 27 estudiantes que comenzaron señalando que "un cuerpo cargado puede atraer otros objetos", 15, es decir el 56% avanzó en algún punto de la SEA a la idea de que "la diferencia entre la magnitud de la fuerza de atracción y repulsión conduce a una reorganización de los cargos de un cuerpo neutro, causando su atracción o su reorientación". En el caso del modelo de campo eléctrico, esta progresión fue menos paulatina, pero existió de todos modos. Por ejemplo, de 23 estudiantes que comenzaron explicando que la fuerza eléctrica se ejerce a distancia entre cargas, 21, es decir el 91,3% comenzó a señalar que la fuerza eléctrica la ejerce el campo eléctrico en algún punto de la SEA.

La evolución de las ideas de los estudiantes, a pesar de ser progresiva, no puede entenderse como un proceso lineal (Garrido, 2016). En esta investigación, hemos identificado una fuerte influencia de distintos factores que se presentan a continuación.

### **6.1.2.2 Los fenómenos, y no solo las ideas, influyen en las explicaciones**

A partir de los resultados presentados en el capítulo anterior, podemos señalar que cuando una respuesta requiere que los estudiantes expliquen un fenómeno que está compuesto por dos tipos de explicaciones, una de estas dos explicaciones es desarrollada en menor grado o simplemente no aparece. Esto solo ocurre en el caso de aquellas explicaciones que pertenecen al mismo modelo, por lo tanto, no se presenta en aquellas actividades en que los estudiantes deben aludir al campo eléctrico y la polarización al mismo tiempo. Este fenómeno puede responder a distintos factores, ya comentados en la sección 5.2.1.1. En el caso de las actividades que abarcaban la frotación y la polarización, este resultado puede deberse al orden en que se presentan los contenidos, ya que aquella idea que se desarrolla por sobre la otra es además la que se presentó justo antes de pedir a los estudiantes que escriban sus explicaciones en las actividades de la SEA. Otro posible motivo para esta tendencia es que quizás los estudiantes creen que la primera parte del proceso es obvia y que sólo se les está preguntando por lo que causa el movimiento evidente. De ser este el caso, sería necesario explicitar con mayor detalle lo requerido en la instrucción.

En el caso de las actividades donde se trabajaban los conceptos de inducción y contacto, la tendencia a privilegiar una explicación por sobre la otra puede responder a la complejidad del montaje, que podría significar un aumento en la dificultad de la tarea (Sección 5.2.2.3). En el caso de ambos grupos de actividades, la tendencia puede deberse también a que, en los dos casos en que se presentan (frotación-polarización, contacto- inducción) el segundo tipo de explicación es el que aborda el movimiento evidente (mirada macroscópica) que los estudiantes observan (por ejemplo: la atracción de pequeños papeles), mientras que la primera es la responsable de iniciar el movimiento del fenómeno (mirada microscópica). Por lo tanto, los estudiantes hacen una explicación detallada de lo que genera dicho movimiento. En este caso, podría ser beneficioso dividir la tarea en más pasos para que los estudiantes consideraran el fenómeno desde que inicia.

Otro elemento relevante de mencionar es que existe un descenso en el nivel explicativo que se presenta cuando los estudiantes deben transferir (Neumann et al., 2013) sus razonamientos desde un contexto a otro nuevo. En este sentido, los resultados de nuestra

investigación coinciden con Billing (2007), quien ya había reportado este problema como un desafío pendiente para la enseñanza de las ciencias.

### **6.1.2.3 El diseño didáctico como andamiaje para el aprendizaje**

Los datos recolectados sugieren que el tipo de representación influye en el tipo de explicaciones obtenidas. Encontramos que en las instancias de la SEA en que se utilizó una imagen, que corresponde a una representación abstracta del campo eléctrico, hay mayor dispersión en los tipos de explicaciones. Por el contrario, en el caso de aquellas actividades en que se utilizó un montaje experimental que permitió interpretar que la región completa se encontraba perturbada hubo menor diversidad de tipos de explicaciones y una mayor cantidad de respuestas apegadas al modelo científico. Por lo tanto, es posible concluir que el tipo de representación utilizado para presentar los fenómenos a los estudiantes sí tiene relevancia en la calidad de sus explicaciones (López y Pintó, 2011).

Asociado a esto, podemos concluir tras esta investigación que, ante fenómenos complejos como la Jaula de Faraday y el Efecto Punta, la conversación de los estudiantes con el profesor es fundamental para guiarlos hacia el uso de los elementos de los modelos en su elaboración de explicaciones. Al enfocarse los estudiantes más en la materialidad del montaje, es necesario que el docente recuerde ciertas ideas a sus alumnos para que los conceptos que no están siendo considerados salgan a la luz y los estudiantes los agreguen a la explicación. De esta manera, el docente los ayuda a abstraerse de la materialidad y a mirar el fenómeno completo en su lugar. En esta etapa el uso de herramientas matemáticas también fue un aporte a la hora de robustecer la comprensión de los fenómenos complejos y también de la polarización. Es importante destacar que en estos casos, ni la matemática ni la explicación cualitativa fueron suficientes por sí solas, sino que ambas juntas fueron fundamentales para la elaboración de explicaciones que abarcaran toda la complejidad de los fenómenos.

En este trabajo, encontramos que las instancias de discusión ayudaron a que las respuestas de los estudiantes subieran de nivel, probablemente debido a que la discusión les permite negociar significados incorporando las ideas de los demás (Mortimer y Scott, 2003), para así reformular sus explicaciones incluyendo toda la información con la que cuentan. También encontramos que trabajar con experiencias previas reales y con experiencias

hipotéticas permitió que el nivel de las explicaciones de los estudiantes mejorara. En el caso de la experiencia previa real, creemos que esto se debe a que, la primera vez que los estudiantes observan un experimento tienden a enfocarse en las propiedades del montaje, pero luego, cuando han tenido tiempo para intercambiar ideas, logran elaborar explicaciones que abarquen las distintas partes del fenómeno estudiado. En el caso de la experiencia hipotética, pensamos que al pedirle a los estudiantes que imaginen un experimento, es probable que estos piensen en conceptos, no en sus características físicas, por lo tanto, pueden concentrarse en el fenómeno deseado, sin distracciones. Por lo tanto, podemos concluir que, a la hora de diseñar una clase, es beneficioso incluir experiencias hipotéticas y reales. En el caso de las reales, es recomendable presentar primero un experimento real, luego generar instancias de discusiones y finalmente solicitar las explicaciones de los estudiantes. Consideramos que esta es otra contribución importante de este trabajo a la didáctica de la física.

A la hora de diseñar secuencias de enseñanza y aprendizaje, es necesario reflexionar y seleccionar experiencias que permitan analizar fenómenos microscópicos, para que emerjan los modelos electrostáticos (García, 2017; Merino et al., 2019). Para sostener las explicaciones y consolidar los modelos eléctricos se deben utilizar diferentes representaciones (reales y simuladas), como lo reportan Petridou et al. (2009), Barbas y Psillos (2002), y Taramopoulos y Psillos (2017). Cuando las experiencias que permiten analizar los distintos fenómenos a estudiar se estructuran en una secuencia coherente de clases, se puede conocer el grado de evolución de la apropiación de las explicaciones causales de los estudiantes desde un punto de vista macroscópico hacia uno microscópico, profundo y adecuado (Barbas y Psillos, 2002). Esta metodología de trabajo puede facilitar el enlace que permita pasar de lo micro (campo eléctrico, diferencia de potencial, polarización, etc.) a lo macro (atracción y repulsión, corriente eléctrica, voltaje de una batería, etc.) (Guisasola, 2014). Por lo tanto, sería una buena estrategia para acompañar a los estudiantes en su tránsito desde la electrostática al análisis de circuitos eléctricos (Leniz et al., 2015; Preyer, 2000; Leniz et al., 2017; Eylon y Ganiel, 1990; Ganiel, 2000; Closset, 1989).

## **6.2 Limitaciones de la investigación**

A continuación, se presentarán algunas de las limitaciones identificadas por el autor de este trabajo.

### **6.2.1 Respeto al rol del investigador**

En este trabajo, el investigador estuvo además a cargo de diseñar la SEA y de implementarla en el curso. Este triple rol tiene ventajas y desventajas para el ejercicio pedagógico y la realización de este estudio.

Por un lado, una de las ventajas identificadas es que, siendo el mismo docente quien implementó la SEA, comprende a cabalidad los fundamentos de la estructura propuesta. Por lo tanto, es probable que respete cada paso de la secuencia ya que entiende por qué cada parte que la compone es relevante. Esto podría no ocurrir en casos donde el docente no haya elaborado las actividades y decida modificar u eliminar algunos pasos por no considerarlos útiles o relevantes. Desde el rol de investigador, también es una ventaja tener toda la información del proceso completo, lo que permite elaborar conclusiones con mayor propiedad. Otro beneficio que trae este triple rol, y la investigación-acción en general es la posibilidad de aprender más sobre el propio contexto y las propias prácticas docentes.

Por otro lado, una posible desventaja que acarrea el triple rol mencionado es que, para no alterar los resultados del estudio, el docente debe ceñirse al diseño de la investigación, lo que en ocasiones puede limitar su rol pedagógico. Por ejemplo, a partir de la segunda vez que se implementó la SEA, el docente ya contaba con información que podría haber incorporado a las clases – como errores anticipados de los estudiantes – sin embargo, haber modificado la forma de presentar los fenómenos en ese momento no habría permitido analizar los resultados de todas las cohortes conjuntamente.

### **6.2.2 Respeto a la muestra y población**

Con respecto a las limitaciones de la muestra seleccionada, es importante explicitar que esta no responde a criterios de muestreo que le permitan ser completamente extrapolable a la población total de estudiantes de la Pedagogía en Física y Matemática de la USACH. Como se menciona en el capítulo de metodología de este trabajo, los estudiantes corresponden a cohortes completas que cursaron la asignatura de Electromagnetismo durante el período en el que se desarrolló esta investigación. Por lo tanto, al ser una muestra por conveniencia no representa estrictamente todas las características de la totalidad de estudiantes que conforman la población. Sin embargo, debido al diseño de la investigación – de investigación acción – no era nuestra intención extrapolar los resultados a otros grupos, sino mejorar las prácticas pedagógicas del docente/investigador en base a datos concretos provenientes de sus estudiantes.

### **6.2.3 Respeto al diseño de la investigación**

Con respecto a las características propias del diseño de esta investigación, una posible limitación podría ser el poco tiempo que se pudo asignar al desarrollo de la SEA. Esto responde al contexto en el que se desarrolló la investigación, que corresponde a la unidad de Electrostática del curso de Electromagnetismo, donde el docente debe cubrir otras temáticas, además de las que abarca la SEA.

Existe también una limitación relacionada con las explicaciones de los estudiantes. Al estar acostumbrados a cursos con un enfoque más matemático, los estudiantes esperaban que este también lo fuera. Esto podría explicar que los estudiantes escribieran explicaciones breves, ya sea por que no les gusta escribir más, o porque no están acostumbrados a hacerlo. A su vez, al contar con explicaciones breves, en algunas ocasiones fue necesario interpretar lo que los participantes escribían, lo que también se podría considerar una limitante de la investigación.

Finalmente, reconocemos también que, si bien los resultados recopilados muestran tendencias que permiten elaborar conclusiones pertinentes para el aprendizaje y la enseñanza de la electrostática, en ocasiones hay datos que escapan a esas tendencias pero no conocemos porqué se comportan así. Lamentablemente, el diseño de la investigación no

permitió indagar más en esos fenómenos, por lo que consideramos que son temas interesantes de abordar en futuros estudios del área de la didáctica de la ciencia. Un ejemplo de esto sería la idea de carga por contacto en la actividad 13, donde no se logró que la mayoría de los estudiantes alcanzaran el nivel alto/consistente.

#### **6.2.4 Respetto de los instrumentos de recogida y análisis de datos**

Con respecto a los instrumentos utilizados para recoger datos – guías de trabajo de la SEA – podemos identificar ventajas y desventajas. Por un lado, contar con datos escritos es una ventaja ya que permite volver a revisar los datos de manera rápida y sencilla cuántas veces sea necesario. Solicitarles que dibujaran también fue una ventaja para poder comprender explicaciones escritas que en ocasiones no eran tan claras. Por otro lado, la recolección de datos escritos depende de las habilidades comunicativas escritas de los estudiantes y no permite contra preguntar cuando algo que han escrito o dibujado no es lo suficientemente claro. Por lo tanto, en ocasiones se hace necesario interpretar lo que los estudiantes intentaron comunicar, tarea que sin duda es compleja.



## **6.3 Implicaciones para la investigación y para la docencia**

### **6.3.1 Futuras líneas de investigación**

Consideramos que sería muy interesante expandir el alcance de esta investigación mediante un estudio de carácter longitudinal que analice cómo algunos de los estudiantes participantes se apropiaron de las estrategias didácticas incorporadas en la SEA durante las distintas etapas de su profesión docente. Para ello, consideraríamos dos etapas además de la que describe este estudio: una intermedia que buscaría conocer los diseños didácticos que los docentes elaboran tras haber vivido esta experiencia para enseñar a un curso ficticio durante su etapa de formación profesional, y otra final donde analizaríamos cómo implementan las estrategias didácticas en sus prácticas docentes en un contexto laboral real, una vez insertos en el mundo laboral. De este modo, podríamos tener mayor evidencia para comprender el impacto que tienen las prácticas usadas durante la formación de docentes en su desempeño profesional futuro.

Otra posible línea de investigación sería repetir la metodología de este trabajo, pero esta vez sobre el aprendizaje y la enseñanza del magnetismo, y del electromagnetismo. Esto nos permitiría recolectar información relevante para poder promover mejor la enseñanza de estas temáticas tan relevantes para una sociedad hiper tecnologizada. En este caso, se podría crear una SEA en torno a tecnologías cotidianas como el Wifi, bluetooth y otras ondas electromagnéticas.

También consideramos que sería muy valioso llevar a cabo un estudio de caso en base a un estudiante de este curso, haciendo un seguimiento cualitativo detallado para observar cómo se desarrolla su grado de comprensión conceptual a lo largo del tiempo. Esto nos permitiría retroalimentar aún más la SEA, que ya ha sido modificada en base a los resultados de este estudio (por ejemplo: las representaciones de campo eléctrico, que fueron modificadas; y el aumento de instancias de discusión con el profesor, por sobre aquellas de explicación).

Finalmente, otra manera de expandir esta investigación sería llevándola a cabo durante más tiempo y con más estudiantes, siguiendo una metodología cuantitativa. Esto sería de utilidad para medir el impacto de las estrategias didácticas a gran escala. Por ejemplo, se

podría aplicar en la Universidad de Santiago de Chile a una cohorte completa de alguna carrera de ingeniería, debido al alto número de estudiantes que poseen.

### **6.3.2 Implicaciones didácticas para la docencia**

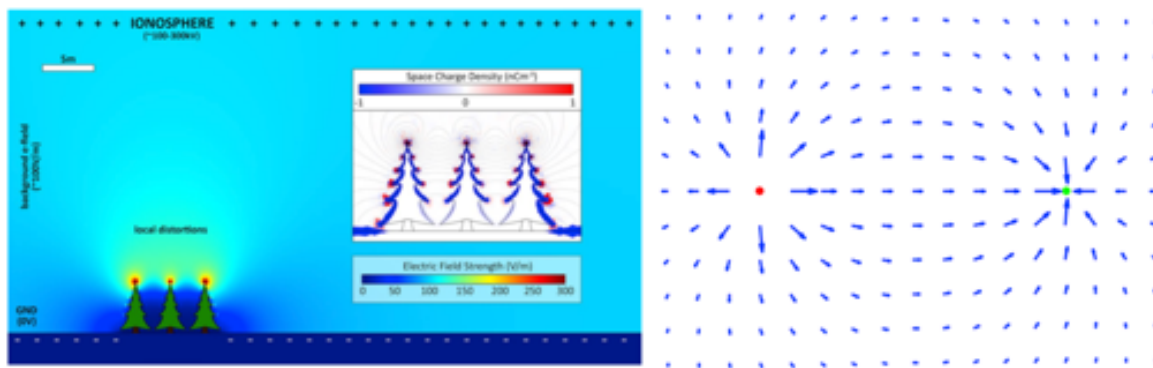
Con este estudio esperamos contribuir con estrategias concretas que puedan ser beneficiosas para el futuro desempeño profesional de los estudiantes de Pedagogía en Física y Matemática. Buscamos que la experiencia de aprendizaje los ayude a enriquecer sus conocimientos para que puedan explicar los fenómenos electrostáticos con soltura, usando los modelos como referencia, y siendo capaces de realizar una correcta transposición didáctica para sus estudiantes, obteniendo como potencial resultado a largo plazo una disminución en las dificultades de aprendizaje que la literatura en didáctica de la física reporta.

Al trabajar con una SEA diseñada en base a la evidencia que aporta la didáctica de las ciencias se espera que los futuros docentes puedan generar explicaciones con claridad y precisión conceptual. De esta manera, se espera cumplir con las exigencias del curriculum nacional chileno, que menciona que los profesores deben lograr que sus estudiantes sean capaces de elaborar explicaciones sobre fenómenos naturales sobre la base de principios y evidencia científica (Mineduc, 2016).

Nuestra investigación pone en evidencia la relevancia de generar espacios para que los estudiantes aprendan y practiquen la elaboración de explicaciones. La estructura instruccional de la SEA utilizada en este trabajo permite develar el paso a paso de la construcción de las explicaciones de los estudiantes, habilidad que habitualmente no es parte del diseño de prácticas científicas llevadas al aula. Escribir explicaciones en el aula es beneficioso para los estudiantes ya que favorece su desarrollo del lenguaje y les sirve también de apoyo cognitivo en el proceso racional (Tang, 2016). Con este tipo de secuencias se pretende ayudar a pensar sobre el razonamiento lógico para la elaboración de una explicación, en vez de acumular conceptos y hechos aislados. Por lo tanto, es importante que los docentes de ciencias incorporen estas nociones en su diseño de clases y materiales.

Otro hallazgo importante para el aula es que no todas las representaciones utilizadas para presentar fenómenos a los estudiantes los ayudan a comprenderlos. Por ejemplo, en vez de

utilizar representaciones abstractas de un campo eléctrico mediante líneas de fuerza, podría resultar beneficioso reemplazarlo por una serie de representaciones acordes al concepto que se esté trabajando. Por ejemplo, en la figura 86, se muestran dos opciones que se pueden usar de forma complementaria.



**Figura 86** Ambas imágenes son representaciones de la intensidad del campo eléctrico. La imagen de la izquierda lo hace por color (Clarke et al., 2007) y la imagen de la derecha lo hace por el tamaño de los vectores.

A partir de este trabajo, se elaboró un producto concreto para la enseñanza de fenómenos electrostáticos. Este producto es la SEA, que propone una serie de actividades específicas diseñadas para evidenciar y mejorar las ideas de los estudiantes en torno a diferentes fenómenos electrostáticos, que pueden ser adaptados para su uso con diferentes grupos de estudiantes.

Finalmente, es interesante mencionar el impacto que este trabajo ha tenido en su contexto. La implementación de nuestra investigación tuvo un impacto positivo en una de las consecuencias identificadas en la sección 2.1 al presentar el problema de la investigación. En dicha sección explicamos que, producto del nivel insatisfactorio de conocimiento de los estudiantes en el área de la electrostática, prácticamente no proponían seminarios de grado en el tema. Tras la implementación de este estudio ya han surgido 5 proyectos de seminario de grado en la temática. Esto nos indica que los estudiantes se sienten más preparados para trabajar en profundidad en torno a los fenómenos electrostáticos, lo que a su vez gatilla su motivación por seguir aprendiendo del tema en mayor detalle. Además, la metodología de investigación-acción llegó para quedarse a la carrera de Pedagogía en Física y Matemática de la Universidad de Santiago de Chile tras la realización de este trabajo. Los académicos de la carrera han observado lo importante y útil que es contar con evidencias concretas de los resultados de aprendizaje de los estudiantes y han decidido implementar la metodología

a distintas asignaturas a lo largo del programa de estudios. Por lo tanto, se ha diseñado un sistema de trabajo por líneas temáticas, donde se han identificado asignaturas que apuntan a desarrollar las mismas competencias, de las declaradas en el perfil de egreso y en los estándares para Profesores de Ciencia (Mineduc, 2012). El programa de formación completo ha sido dividido en dos ciclos, dentro de los cuáles se han elegido las asignaturas que desarrollan más competencias para recolectar información concreta sobre los resultados de los estudiantes. El objetivo de esta metodología de trabajo es conocer los niveles de desempeño de los alumnos en estas competencias para poder tomar acciones a tiempo en caso de que algunos estudiantes se encuentren en niveles más descendidos. En este sentido, resulta un buen insumo para la retroalimentación del plan de estudios. Esta metodología se adoptó a nivel de carrera tras ver lo valiosa que fue para la unidad de Electrostática, y ya se implementó una versión en las asignaturas de la Línea de Formación Práctica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achinstein, P. (1983). *The nature of explanation*. Oxford University Press.
- Adúriz-Bravo, A., y Izquierdo-Aymerich, M. I. (2009). Un modelo de modelo científico para la enseñanza de las ciencias naturales. *Revista electrónica de investigación en educación en ciencias*, 4(3), 40-49.
- Agencia de calidad de la educación. (2019). *PISA 2018: Entrega de resultados. Competencia Lectora, Matemática y Científica en estudiantes de 15 años en Chile*. Biblioteca digital Mineduc. <https://bibliotecadigital.mineduc.cl/handle/20.500.12365/9286>
- Aguilar, S., y Barroso, J. (2015). La triangulación de datos como estrategia en investigación educativa. *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*, 47, 73-88. <http://dx.doi.org/1012795/pixelbit.2015.i47.05>
- Archer, L., Moote, J., Macleod, E., Francis, B., y DeWitt, J. (2020). *ASPIRES 2: Young people's science and career aspirations, age 10–19*. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10092041/>
- Bar, V., y Zinn, B. (1998). Similar frameworks of action-at-a-distance: Early scientists' and pupils' ideas. *Science & Education*, 7(5), 471-491. <https://doi.org/10.1023/A:1008687204309>
- Barbas, A., y Psillos, D. (2002). Evolution of students' reasoning about microscopic processes in electrostatics under the influence of interactive simulations. In *Teaching and learning in the science laboratory* (pp. 243-254). Springer.
- Benseghir, A. y Closset, J. (1996). The electrostatics-electrokinetics transition: historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, 18(2), 179-191. <https://doi.org/10.1080/0950069960180204>
- Billing, D. (2007). Teaching for transfer of core/key skills in higher education: Cognitive skills. *Higher education*, 53(4), 483-516. <https://doi.org/10.1007/s10734-005-5628-5>
- Bollen, L., van Kampen, P., Baily, C., Kelly, M., y De Cock, M. (2017). Student difficulties regarding symbolic and graphical representations of vector fields. *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020109>
- Borghini, L., De Ambrosis, A., y Mascheretti, P. (2007). Microscopic models for bridging electrostatics and currents. *Physics education*, 42(2), 146.
- Boyer, E. (1990). *Scholarship reconsidered: Priorities of the professoriate*. Princeton University Press. <https://eric.ed.gov/?id=ED326149>
- Braaten, M., y Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. *Science education*, 95(4), 639-669. <https://doi.org/10.1002/sce.20449>
- Bybee, R. (2011). Scientific and engineering practices in K-12 classrooms. *Science Teacher*, 78(9), 34-40.

- Cabello, V., y Topping, K. (2014). Aprender a explicar conceptos científicos en la formación inicial docente: un estudio de las explicaciones conceptuales de profesores en formación, su modificabilidad y su transferencia. *Pensamiento Educativo, Revista de Investigación Latinoamericana (PEL)*, 51(2), 86-97. <https://doi.org/10.7764/PEL.51.2.2014.7>
- Cardoso, P., y Justi, R. (2013). The relationships between modelling and argumentation from the perspective of the model of modelling diagram. *International Journal of Science Education*, 35(14), 2407-2434. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.811615>
- Carey, S. (1986). Cognitive science and science education. *American psychologist*, 41(10), 1123.
- Carrascosa, J. (2005). El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (parte I). Análisis sobre las causas que la originan y/o mantienen. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2(2), 183-208.
- Chabay, R., y Sherwood, B. (2006). Restructuring the introductory electricity and magnetism course. *American Journal of Physics*, 74(2006), 329. <http://doi.org/10.1119/1.2165249>
- Clarke, D., Morley, E., y Robert, D. (2017). The bee, the flower, and the electric field: electric ecology and aerial electroreception. *Journal of Comparative Physiology A*, 203(9), 737-748. 10.1007/s00359-017-1176-6
- Closset, J. L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 931-948.
- Cohen, R., Eylon, B., y Ganiel, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51(5), 407-412.
- Colmenares E, A. M. (2012). Investigación-acción participativa: una metodología integradora del conocimiento y la acción. Voces y Silencios. *Revista Latinoamericana de Educación*, 3(1), 102-115.
- Couso, D. (2014). De la moda de “aprender indagando” a la indagación para modelizar: una reflexión crítica. Conferència Inaugural. 26 Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Huelva (España). Accesible en: [http://uhu.es/26edce/actas/docs/conferencias/pdf/26ENCUENTRO\\_DCE-ConferenciaPlenariaInaugural.pdf](http://uhu.es/26edce/actas/docs/conferencias/pdf/26ENCUENTRO_DCE-ConferenciaPlenariaInaugural.pdf)
- Couso, D. (2017). Per a què estem a STEM? Un intent de definir l'alfabetització STEM per a tothom i amb valors. *Ciències: revista del professorat de ciències de Primària i Secundària*, (34), 22-28. <https://doi.org/10.5565/rev/ciencies.403>
- Couso, D., Jimenez-Liso, R., Refojo, C. y Sacristán, J. (Coords.) (2020). *Enseñando Ciencia con Ciencia*. FECYT y Fundacion Lilly. Penguin Random House.
- Couso, D., y Simarro, C. (2020). STEM education through the epistemological lens: Unveiling the challenge of STEM transdisciplinarity. In *Handbook of Research on STEM Education* (pp. 17-28). Routledge.

- Custodio, E., Márquez, C., y Sanmartí, N. (2015). Learning to justify scientifically by studying the origin of living beings. Aprender a justificar científicamente a partir del estudio del origen de los seres vivos. *Enseñanza de las Ciencias*, 33, 133-155. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1316>
- del Valle, S., del Valle, M., Leguizamón, G., Humana, T., y Juárez, G. (2021). Enfoque intercultural a través de una experiencia en física. *South Florida Journal of Development*, 2(2), 1656-1669. <https://doi.org/10.46932/sfjdv2n2-042>
- diSessa, A. (1988). Knowledge in pieces. In G. Forman and P. Pufall (Eds.), *Constructivism in the Computer Age* (pp.49-70). Lawrence Erlbaum Associates.
- Domènech-Casal, J. (2017). Aprendizaje Basado en Proyectos y Competencia Científica. Experiencias y propuestas para el método de Estudios de Caso. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, (Extra), 5177-5184. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/337691>
- Domènech-Casal, J. (2018a). Comprender, Decidir y Actuar: una propuesta-marco de Competencia Científica para la Ciudadanía. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*, 15(1), 110501-110512.
- Domènech-Casal, J. (2018b). Aprendizaje Basado en Proyectos en el marco STEM. Componentes didácticas para la Competencia Científica. *Ápice*, 2(2), 29-42. <https://www.doi.org/10.17979/arec.2018.2.2.4524>
- Driver, R. (1985). *Children's ideas in science*. McGraw-Hill Education (UK)
- Driver, R. (1986). Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 3-15.
- Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International journal of science education*, 11(5), 481-490.
- Driver, R. y Easley, J. (1978): Pupils and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education* 5, 61-84.
- Duit, R., y Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International journal of science education*, 25(6), 671-688. <https://doi.org/10.1080/09500690305016>
- Duschl, R., y Gitomer, D. (1991). Epistemological perspectives on conceptual change: Implications for educational practice. *Journal of research in science teaching*, 28(9), 839-858.
- 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. <https://doi.org/10.1080/03057267.2011.604476>
- Duschl, R., Schweingruber, H., y Shouse, A. (Eds.). (2007). *Taking science to school: Learning and teaching science in grades K-8*. National Academies Press.

- Edwards, D., y Mercer, N. (1987). *El conocimiento compartido: El desarrollo de la comprensión en el aula*. Paidós.
- Elliott, J. (1993). *El cambio educativo desde la investigación-acción*. Ediciones Morata.
- Erickson, G. L. (1979): Children's conceptions of heat and temperature. *Science Education*, 63 (2), 221-230.
- EURYDICE, European Unit. (2002). *Key competencies: A developing concept in general compulsory education*. Eurydice.
- Eylon, B. y Ganiel, U. (1990). Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, 12, (1), 79-94. <https://doi.org/10.1080/0950069900120107>
- Furió, C., y Domínguez, C. (2007). Problemas históricos y dificultades de los estudiantes en la conceptualización de sustancia compuesto químico. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 241-258.
- Furió, C. y Guisasola, J. (1993). ¿Puede ayudar la historia de la ciencia a entender por qué los estudiantes no comprenden los conceptos de carga y potencial eléctrico? *Revista Española de Física*, 7(3), 46-50
- Furió, C., y Guisasola, J. (1998a). Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y de campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 131-146.
- Furió, C. y Guisasola, J. (1998b). Difficulties on learning the concept of electric field. *Science Education*, 82(4).
- Furió, C. y Guisasola, J. (1998c). Construcción del concepto de potencial eléctrico mediante el aprendizaje por investigación. *Revista de Enseñanza de la Física*, 11(1), 25-37
- Furió, C. y Guisasola, J. (1999). Concepciones alternativas y dificultades de aprendizaje en electrostática. Selección de cuestiones elaboradas para su detección y tratamiento. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(3), 441-452.
- Furió, C. y Guisasola, J. (2001). La enseñanza del concepto de campo eléctrico basada en un modelo de aprendizaje como investigación orientada. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 319-334.
- Furió, C., Guisasola, J. y Almudí, J.M. (2004). Elementary electrostatic phenomena: Historical hindrances and students' difficulties. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education* 4(3), 291-313. <https://doi.org/10.1080/14926150409556616>
- Furió, C., Guisasola, J., y Zubimendi, J. L. (2016). Problemas históricos y dificultades de aprendizaje en la interpretación newtoniana de fenómenos electrostáticos considerados elementales. *Investigações em ensino de Ciências*, 3(3), 165-188.



- Galili, I. (1995). Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism. *International journal of science education*, 17(3), 371-387.
- Ganiel, U. (2000). Linking electrostatics to electrodynamics, macro to micro: Student understanding of electric circuits. In *Proceedings of the '99 International conference of physics teachers and educators*, Guangxi Normal University Press, Guilin (pp. 69-76).
- García, S. P. (2017). Construcción de modelos científicos escolares sobre fenómenos electrostáticos con estudiantes de secundaria. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, (Extra), 4343-4350.
- Garrido, A. (2016). *Modelització i models en la formació inicial de mestres de primària des de la perspectiva de la pràctica científica* (Tesis doctoral). Universitat Autònoma de Barcelona.  
<http://hdl.handle.net/10803/399837>
- Garrido, A., y Couso, D. (2017). La modelización en la formación inicial de maestros: ¿qué mecanismos o estrategias la promueven? *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, (Extra), 137-144.
- Geelan, D. (2012). Teacher explanations. In B. J. Fraser (Ed.), *Second international handbook of science education* (pp. 987-999). Springer.
- Gentner, D., y Stevens, A. L. (Eds.). (1983). *Mental models*. Hillsdale, N.J.: LEA
- Giannetto, E., Tarsitani, C., y Missoni, M. (1992). The relations between epistemology, history of science and science teaching from the point of view of the research on mental representations. *The History and Philosophy of Science in Science Education*, 1, 359-374.
- Gilbert, J. K. (2004). Models and modelling: Routes to more authentic science education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 2(2), 115-130.
- Gilbert, J. K., y Boutler, C. J. (1998). Learning science through models and modeling. In B. J. Fraser & K. Tobin (Eds.), *International handbook of science education* (pp. 53-66). Kluwer Academic Publishers.
- Gilbert, J. K., Osborne, R. J. y Fensham, P. J. (1982): Children's science and its consequences for teaching. *Science Education*, 66(4), 623-63
- Gire, E., y Price, E. (2014). Arrows as anchors: An analysis of the material features of electric field vector arrows. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 10(2), 020112.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.020112>
- Giroux, H. (2002). Educando para el futuro: rompiendo la influencia del neoliberalismo. *Revista de educación*, 1, 25-37.

- Grimalt-Álvaro, C., y Couso, D. (2019). “No va amb mi” La influència del disseny d’activitats STEM sobre el posicionament de l’alumnat en aquest àmbit. *Universitas Tarraconensis. Revista de Ciències de l'Educació*, 1(2), 133-144. <https://doi.org/10.17345/ute.2019.2.2658>
- Guesne, E. (1984). Children's ideas about light. *New Trends in Physics Teaching*. Vol. IV (UNESCO, Paris).
- Guisasola, J. (1996). *Análisis crítico de la enseñanza de la electrostática en el bachillerato y propuesta alternativa de orientación constructivista*. (Tesis doctoral). Departamento de Física Aplicada I de la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, vol 104.
- Guisasola, J. (2014). Teaching and learning electricity: The relations between macroscopic level observations and microscopic level theories. In *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 129-156). Springer, Dordrecht. 10.1007/978-94-007-7654-8\_5
- Guisasola, J., Almudí, J. M., Salinas, J., Zuza, K., y Ceberio, M. (2008a). The Gauss and Ampere laws: different laws but similar difficulties for student learning. *European Journal of Physics*, 29(5), 1005.
- Guisasola, J., Almudi, J. M., y Zubimendi, J. L. (2004). Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university. *Science Education*, 88(3), 443-464.
- Guisasola, J., Ametller, J., y Zuza, K. (2021). Investigación basada en el diseño de Secuencias de Enseñanza-Aprendizaje: una línea de investigación emergente en Enseñanza de las Ciencias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(1), 1801-1801  
[https://doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2021.v18.i1.1801](https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1801)
- Guisasola, J., Zubimendi, J., Almudi, J. y Ceberio, M. (2008b). Dificultades persistentes en el aprendizaje de la Electricidad; Estrategias de razonamiento de los estudiantes al explicar fenómenos de carga eléctrica. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 26(2), 177-192
- Guruswamy, CH., Somers, M.D. y Hussey, R.G. (1997). Students’ understanding of the transfer of charge between conductors. *Physics Education*, 32(2), pp. 91-96.
- Guth, J. (1995). An in-depth study of two individual students' understanding of electric and magnetic fields. *Research in Science Education*, 25(4), 479-490.
- Gutiérrez, R. (2004). La modelización y los procesos de enseñanza / aprendizaje. *Alambique Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 42, pp.8-18.
- Harlen, W. (Ed.). (2010). *Principles and big ideas of science education*. Association for Science Education.
- Helaakoski, J., y Viiri, J. (2014). 6. Content and Content Structure of Physics Lessons and Students’ Learning Gains: Comparing Finland, Germany and Switzerland. In H. Fischer, P. Labudde, K. Neumann y J. Viiri (Eds.) *Quality of Instruction in Physics: Comparing Finland, Switzerland and Germany*, (pp. 93-110). Waxmann Verlag.

- Helm, H. (1978). Misconceptions about physical concepts among South African pupils studying physical science. *South African Journal of Science* 74, 285-2
- Hennessy, S., Deaney, R., Ruthven, K., y Winterbottom, M. (2007). Pedagogical strategies for using the interactive whiteboard to foster learner participation in school science. *Learning, Media and Technology*, 32(3), 283–301. <https://doi.org/10.1080/17439880701511131>
- Hernández, M. I., Couso, D., y Pintó, R. (2015). Analyzing students' learning progressions throughout a teaching sequence on acoustic properties of materials with a model-based inquiry approach. *Journal of Science Education and Technology*, 24(2-3), 356-377. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9503-y>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014) *Metodología de la investigación*. (6ed). Mc Graw Hill Education.
- Herrmann, F. (1991). Teaching the magnetostatic field: Problems to avoid. *American Journal of Physics*, 59(5), 447-452.
- Izquierdo Aymerich, M. (2017). Atando cabos entre contexto, competencias y modelización¿ Es posible enseñar ciencias a todas las personas?. *Modelling in Science Education and Learning*, 10(1), 309-326. [10.4995/msel.2017.6637](https://doi.org/10.4995/msel.2017.6637).
- Izquierdo, M. (2005). Hacia una teoría de los contenidos escolares. *Enseñanza de las Ciencias*, 23(1), 111-122.
- Izquierdo Aymerich, M., y Aduriz-Bravo, A. (2003). Epistemological foundations of school science. *Science & Education*, 12, 27-43. <https://doi.org/10.1023/A:1022698205904>
- Izquierdo, M. y Rivera, L. (1997). La estructura y la comprensión de los textos de ciencias. *Alambique*, 11, 24-33.
- Jaipal, K. (2010). Meaning making through multiple modalities in a biology classroom: A multimodal semiotics discourse analysis. *Science Education*, 94(1), 48-72.
- Jiménez-Aleixandre, M. P., y Erduran, S. (2007). Argumentation in science education: An overview. *Argumentation in science education*, 3-27. [10.1007/978-1-4020-6670-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6670-2_1)
- Jiménez, R. (2012). Ayer, hoy y mañana de la investigación en la enseñanza de las ciencias. *Ponencia a los XXV Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 21-45. Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.
- Jonassen, N. (2013). *Electrostatics*. Springer Science & Business Media.
- Jorba, J., Gómez, I. y Prat, A. (coords.) (1998). *Parlar i escriure per aprendre*. Barcelona: ICE/UAB. Versión española: Hablar y escribir para aprender. Rosa Sensat.
- Justi, R. (2006). La enseñanza de ciencias basada en la elaboración de modelos. *Enseñanza de las ciencias*, 24(2), 173–184

- Justi, R., y Gilbert, J. (1999). A cause of ahistorical science teaching: use of hybrid models. *Science Education*, 83(2), 163-177.
- Kaldaras, L., Akaeze, H., y Krajcik, J. (2021). Developing and validating Next Generation Science Standards-aligned learning progression to track three-dimensional learning of electrical interactions in high school physical science. *Journal of Research in Science Teaching*, 58(4), 589-618.
- Karam, R. (2014). Framing the structural role of mathematics in physics lectures: A case study on electromagnetism. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 10(1), 010119. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.010119>
- Klein, P.D y Kirkpatrick, L.C. (2010). Multimodal Literacies in Science: Currency, Coherence and Focus. *Research in Science Education*, 40, 87-92. <https://doi.org/10.1007/s11165-009-9159-4>
- Kolb, D. A. (1984). *Experience as the source of learning and development*. Upper Sadle River: Prentice Hall.
- Kress, G., Ogborn, J., y Martins, I. (1998). A satellite view of language: Some lessons from science classrooms. *Language awareness*, 7(2-3), 69-89.
- Latorre, A. (2007). *La investigación- acción. Conocer y cambiar la práctica educativa*. Grao.
- Lederman N.G. (2006) Syntax Of Nature Of Science Within Inquiry And Science Instruction. In: Flick L.B., Lederman N.G. (eds) *Scientific Inquiry and Nature of Science*. Science & Technology Education Library, vol 25. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5814-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5814-1_14)
- Lederman, N. G., y Abell, S. K. (Eds.). (2014). *Handbook of research on science education* (Vol. 2). Routledge.
- Lemke, J. L. (1997). *Aprender a hablar ciencia. Lenguaje, aprendizaje y valores*. Paidós.
- Leniz, A., Zusa, K., y Guisasola, J. (2015). University students use of explanatory models for explaining electric current in transitory situations. *Universal J. Phys. Appl.*, 9, 258-262. 10.13189/ujpa.2015.090604
- Leniz, A., Zusa, K., y Guisasola, J. (2017). Students' reasoning when tackling electric field and potential in explanation of dc resistive circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010128. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010128>
- Linder, C. J. (1993). A challenge to conceptual change. *Science Education* 77(3), 293-300
- López, V., y Pintó, R. (2011). Per què les imatges científiques poden ser problemàtiques per a l'ensenyament de les ciències?. *Ciències. La revista del professorat de Ciències d'Infantil, Primària i Secundària.*, 22-26.
- López, V., y Pintó, R. (2013). Identificación de las dificultades de los estudiantes de secundaria en la lectura de imágenes interactivas y digitales. *Enseñanza de las Ciencias.*, Extra 2013, 1984-1991. <https://ddd.uab.cat/record/175389>

- López, V., y Pintó, R. (2017). Identifying secondary-school students' difficulties when reading visual representations displayed in physics simulations. *International Journal of Science Education*, 39(10), 1353-1380.
- Maloney, D. P. (1985). Charged poles? *Physics Education*, 20, 310-316
- Marzabal, A., y Delgado, V. (2018). Trayectorias de aprendizaje en la planificación de secuencias didácticas: promoviendo la enseñanza orientada a la modelización en la formación inicial de profesores de Química. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (Extraordin). Recuperado a partir de <https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/TED/article/view/8890>
- Martínez, M.; López, L., y Jiménez, M. (2014) ¿Es posible diseñar un programa formativo para enseñar ciencias por Indagación basada en Modelos en la formación inicial de maestros? Fundamentos, exigencias y aplicación. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*; 28, 153-173.
- McMillan III, C., y Swadener, M. (1991). Novice use of qualitative versus quantitative problem solving in electrostatics. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(8), 661-670. <https://doi.org/10.1002/tea.3660280804>
- Méheut, M. y Psillos, D. (2004) Teaching–learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, 26(5), 515-535, DOI: 10.1080/09500690310001614762
- Mercer, N. (1995). *The guided construction of knowledge: Talk amongst teachers and learners*. Multilingual matters.
- Mercer, N. (2008). Talk and the development of reasoning and understanding. *Human development*, 51(1), 90-100. <https://doi.org/10.1159/000113158>
- Mercer, N. (2010). The analysis of classroom talk: Methods and methodologies. *British journal of educational psychology*, 80(1), 1-1. <https://doi.org/10.1348/000709909X479853>
- Mercer, N., Dawes, L., Wegerif, R., y Sams, C. (2004). Reasoning as a scientist: Ways of helping children to use language to learn science. *British educational research journal*, 30(3), 359-377. <https://doi.org/10.1080/01411920410001689689>
- Merino, C., Pino, S., Meyer, E., Garrido, J. M., y Gallardo, F. (2015). Realidad aumentada para el diseño de secuencias de enseñanza-aprendizaje en química. *Educación química*, 26(2), 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.04.004>
- Merino, C., Moreira, P., y Marzábal Blancafort, A. (2019). Análisis sistémico de la evolución de los componentes del modelo eléctrico de los estudiantes: Control, estructuras y procesos. *Didacticae: Revista de Investigación en Didácticas Específicas*, 5, 26-42. 10.1344/did.2019.5.26-42
- Millar, R. y Osborne, J. (1998). *Beyond 2000: Science education for the future*. King's. College.

- Ministerio de Educación de Chile [Mineduc]. (2012) *Estándares orientadores para carreras de pedagogía en educación media*. [https://www.cpeip.cl/wp-content/uploads/2018/09/Est%C3%A1ndares\\_Media.pdf](https://www.cpeip.cl/wp-content/uploads/2018/09/Est%C3%A1ndares_Media.pdf)
- Ministerio de Educación de Chile [Mineduc]. (2016). *Bases curriculares 7° básico a 2° medio 2015*. [https://www.curriculumnacional.cl/614/articles-37136\\_bases.pdf](https://www.curriculumnacional.cl/614/articles-37136_bases.pdf)
- Ministerio de Educación de Chile [Mineduc]. (2019) *Bases Curriculares 3° y 4° medio*. [https://www.curriculumnacional.cl/614/articles-91414\\_bases.pdf](https://www.curriculumnacional.cl/614/articles-91414_bases.pdf)
- Ministerio de Educación de Chile [Mineduc]. (2020). *Resultado del instrumento de evaluación de conocimientos específicos y pedagógicos*.
- Minner, D.D., Levy, A.J. y Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction-what is it and does it matter? Results from a research synthesis years 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(4), pp.474–496. <https://doi.org/10.1002/tea.20347>
- Moreira, M. A. (1996). Modelos mentais. *Investigações em ensino de ciências*, 1 (3), 193-232.
- Mortimer, E., y Scott, P. (2003). *Meaning Making in Secondary Science Classrooms*. Biddles Limited.
- Mulhall, P., McKittrick, B. y Gunstone, R. (2001). A perspective on the resolution of confusions in the teaching of electricity. *Research in Science Education*, 31, 575-587. <https://doi.org/10.1023/A:1013154125379>
- Muñoz-Campos V, Franco-Mariscal A.J. y Blanco-Lopez A. (2020) Integración de prácticas científicas de argumentación, indagación y modelización en un contexto de la vida diaria. Valoraciones de estudiantes de secundaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 17(3), 3201. doi: 10.25267/Rev\_Eureka\_ensen\_divulg\_cienc.2020.v17.i3.3201
- National Research Council. (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, Crosscutting Concepts, and Core Ideas*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., y Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of research in science teaching*, 50(2), 162-188. <https://doi.org/10.1002/tea.21061>
- Novak, J. (1977). *A theory of education*. Cornell University Press.
- Osborne, J y Archer, L. (Co-chairs). Couso, D., Erduran, S., Green, J., Holman, J., Lemos, M., Maples, B., Nardelli, E., Orpwood, G., Perlmutter, S., Schmidt, B. (Expert Group members). (2020). *PISA 2024 Strategic Vision and Direction for Science. Report from the Strategic Visioning Expert Group*. OCDE. <https://www.oecd.org/pisa/publications/PISA-2024-Science-Strategic-Vision-Proposal.pdf>
- Osborne, J. (2014). Teaching Scientific Practices: Meeting the Challenge of Change. *Journal of Science Teacher Education*, 25, 177–196. <https://doi.org/10.1007/s10972-014-9384-1>
- Pacheco, V. (2003) La inteligencia y el pensamiento creativo: aportes históricos en la educación. *Revista Educación*, 27(1), 17-26.

- Park, J. (2001). Analysis of students' processes of confirmation and falsification of their prior ideas about electrostatics. *International Journal of Science Education*, 23(12), 1219–1236.  
doi:10.1080/09500690110049097
- Perales, F. y Cañal, P. (2000). *Didáctica de las ciencias experimentales. Teoría y Práctica de la enseñanza de las ciencias*. Marfil.
- Petridou, E., Psillos, D., Hatzikraniotis, E., y Viiri, J. (2009). Design and development of a microscopic model for polarization. *Physics education*, 44(6), 589.
- Pintó, R., Aliberas, J., y Gómez, R. (1996). Tres enfoques de la investigación sobre concepciones alternativas. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(2), 0221-232.
- Pozo, J. I. (1996). Las ideas del alumnado sobre la ciencia: de dónde vienen, a dónde van... y mientras tanto qué hacemos con ellas. *Alambique: Didáctica de las ciencias experimentales*, 7, 1-5.
- Preyer, N. W. (2000). Surface charges and fields of simple circuits. *American Journal of Physics*, 68(11), 1002-1006. <https://doi.org/10.1119/1.1286115>
- Psillos, S. (2011). An explorer upon untrodden ground: Peirce on abduction. In *Handbook of the History of Logic* (Vol. 10, pp. 117-151). North-Holland.
- Putnam, R. T., y Borko, H. (2000). What do new views of knowledge and thinking have to say about research on teacher learning?. *Educational researcher*, 29(1), 4-15.
- Rainson, S., Tranströmer, G., y Viennot, L. (1994). Students' understanding of superposition of electric fields. *American Journal of Physics*, 62(11), 1026-1032.
- Reiner, M. (1997). A learning environment for mental visualization in electromagnetism. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 2(2), 125-154.
- Ritchie S.M. y Newlands J.B. (2017) Emotional Events in Learning Science. In: Bellocchi A., Quigley C., Otrell-Cass K. (eds) *Exploring Emotions, Aesthetics and Wellbeing in Science Education Research*. Cultural Studies of Science Education, vol 13. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43353-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43353-0_6)
- Ronfeldt, M., Loeb, S., y Wyckoff, J. (2013). How teacher turnover harms student achievement. *American educational research journal*, 50(1), 4-36. <https://doi.org/10.3102/0002831212463813>
- Rodríguez, G., Gil, J., y Garcia, E. (1996). Proceso y fases de la investigación cualitativa. *Metodología de la investigación cualitativa*, 62-78.
- Sáez, M., Pintó, R., y Garcia, P. (2005). Interconnecting concepts and dealing with graphs to study motion. In *Proceedings of the Fifth International ESERA Conference on Contributions of Research to Enhancing Students' interest in Learning Science*, 1229-1232.

- Sanmartí, N. (2002). Necesidades de formación del profesorado en función de las finalidades de la enseñanza de las ciencias. *Pensamiento Educativo, Revista De Investigación Latinoamericana (PEL)*, 30(1), 35-60. <http://revistaaisthesis.uc.cl/index.php/pel/article/view/26373>
- Sanmartí, N. (2010) *Avaluar per aprendre. L'avaluació per millorar els aprenentatges de l'alumnat en el marc del currículum per competencies*, Dept. d'Educació, Generalitat de Catalunya, Barcelona. [http://xtec.gencat.cat/web/.content/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/0024/fc53024f-626e-423b-877a-932148c56075/avaluar\\_per\\_aprendre.pdf](http://xtec.gencat.cat/web/.content/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/0024/fc53024f-626e-423b-877a-932148c56075/avaluar_per_aprendre.pdf)
- Schön, D. A. (1992). *La formación de profesionales reflexivos: hacia un nuevo diseño de la enseñanza y el aprendizaje en los profesores*. Paidós.
- Schwandt, T. A. (2000). Three epistemological stances for qualitative inquiry: Interpretivism, hermeneutics, and social constructionism. In *Handbook of qualitative research* (pp. 189-213). Sage Publications Inc.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., ... y Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Schwarz, B. B., Neumann, Y., Gil, J. e Ilya, M. (2003). Construction of collective and individual knowledge in argumentative activity. *The Journal of the Learning Sciences*, 12(2), 219-256. [http://dx.doi.org/10.1207/S15327809JLS1202\\_3](http://dx.doi.org/10.1207/S15327809JLS1202_3)
- Serway, R. A., Vuille, C. y Faughn, J. S. (2010). *Fundamentos de física*, (Vol 2). Octava edición. Cengage Learning.
- Sokoloff, D. R., y Thornton, R. K. (2004). *Interactive lecture demonstrations*. Wiley-VCH.
- Suciatmoko, P. M., Suparmi, A., y Sukarmin, S. (2018). An analysis of students' conceptual understanding: How do students understand some electricity concepts?. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2014, No. 1, p. 020154). AIP Publishing LLC.
- Tang, K. S. (2016). Constructing scientific explanations through premise–reasoning–outcome (PRO): an exploratory study to scaffold students in structuring written explanations. *International Journal of Science Education*, 38(9), 1415–1440. <http://doi.org/10.1080/09500693.2016.1192309>
- Tang, K. S., Tan, S. C., y Yeo, J. (2011). Students' multimodal construction of the work–energy concept. *International Journal of Science Education*, 33(13), 1775-1804.
- Taramopoulos, A., y Psillos, D. (2017). Complex phenomena understanding in electricity through dynamically linked concrete and abstract representations. *Journal of Computer Assisted Learning*, 33(2), 151-163. <https://doi.org/10.1111/jcal.12174>



- Tiberghien, A. (2008). Foreword. In Erduran, S. y Jiménez-Aleixandre, M. P. (eds.): *Argumentation in Science Education: Perspectives from Classroom-Based Research* (pp. 9-15). Springer.
- Tipler, P., y Mosca, G. (2010). *Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y magnetismo*. (Vol. 2). Sexta edición. Reverté.
- Törnkvist, S., Pettersson, K. A., y Tranströmer, G. (1993). Confusion by representation: On student's comprehension of the electric field concept. *American Journal of physics*, 61(4), 335-338.
- Tracy, S. J. (2010). Qualitative quality: Eight "big-tent" criteria for excellent qualitative research. *Qualitative inquiry*, 16(10), 837-851.
- Treagust, D. F., Jacobowitz, R., Gallagher, J. L., y Parker, J. (2001). Using assessment as a guide in teaching for understanding: A case study of a middle school science class learning about sound. *Science Education*, 85(2), 137-157. [https://doi.org/10.1002/1098-237X\(200103\)85:2<137::AID-SCE30>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1098-237X(200103)85:2<137::AID-SCE30>3.0.CO;2-B)
- Vaillant, D. (2018). *Resultados de la primera convocatoria sobre innovaciones prometedoras en formación docente*. CAF. Retrieved from <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1425>
- Velazco, S., y Salinas, J. (2001). Comprensión de los conceptos de campo, energía y potencial eléctricos y magnéticos en estudiantes universitarios. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 23, 308-318. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172001000300009>
- Vergara, C., López, V., y Couso, D. (2020). Revisiting the landscape roaming metaphor to understand students' ideas on mammals' and birds' thermal regulation. *Journal of Biological Education*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/00219266.2020.1748894>
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European journal of science education*, 1(2), 205-221.
- Viennot, L. (1988). Tendance 2 la réduction fonctionnelle: obstacle au savoir scientifique et objet de consensus, In *Construction des savoirs, obstacles et conflits*, pp. 84-91. CIRADE, Agence d'Arc inc.
- Viennot, L. (2001). *Reasoning in physics: The part of common sense*. Springer Science & Business Media.
- Viennot, L., y Ranson, S. (1992). Students' reasoning about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, 14(4), 475-487.
- Windschitl, M., Thompson, J., y Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science education*, 92(5), 941-967. <https://doi.org/10.1002/sce.20259>
- Zangori, L., y Forbes, C. T. (2013). Preservice elementary teachers and explanation construction: Knowledge-for-practice and knowledge-in-practice. *Science Education*, 97(2), 310-330. <https://doi.org/10.1002/sce.21052>