

COMPRENSIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE LOS SÓLIDOS A PARTIR DE UN CONOCIMIENTO BÁSICO SOBRE LA MATERIA. UN ESTUDIO EXPLORATORIO CON ALUMNOS DE SECUNDARIA

Antonio García-Carmona

Departamento de Didáctica de las Ciencias. Universidad de Sevilla

garcia-carmona@us.es

[Recibido en Noviembre de 2009, aceptado en Enero de 2010]

RESUMEN

Se argumenta la posibilidad de enseñar nociones de electricidad partiendo de un conocimiento básico sobre la materia. Con ello se intenta favorecer una visión globalizada de las ciencias físico-químicas, estableciendo una interrelación explícita entre ambos tópicos científicos. Para ello, se fundamenta una propuesta didáctica innovadora, orientada a enseñar el comportamiento eléctrico de materiales sólidos en 3º de ESO [edad 14-15]. A fin de evaluar la propuesta se realiza un estudio de caso exploratorio con 60 alumnos, en el que se analizan sus niveles de comprensión y principales dificultades de aprendizaje. En general, los alumnos adquieren niveles de comprensión moderados, aunque llegan a integrar conceptos relativos a la materia y la electricidad en sus razonamientos. Se concluye que es posible el planteamiento didáctico propuesto, si bien es necesario profundizar con nuevas investigaciones, que ayuden a superar las dificultades de aprendizaje observadas.

Palabras clave: Electricidad; Materia; Educación Secundaria; Niveles de comprensión; Obstáculos de aprendizaje.

INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DE LA CUESTIÓN

La electricidad ha dado origen a numerosos trabajos de investigación didáctica en las últimas décadas. Estos se han dedicado, principalmente, a las dificultades de aprendizaje sobre: (i) el campo eléctrico (p.e. Furió et al. 2003; Viennot y Rainsón 1992), (ii) los circuitos eléctricos (p.e. Bridget 2009; Duit y Rhöneck 1998; Metioui et al. 1996; Millar y King 1993) y (iii) los fenómenos de electrización (p.e. Criado y Cañal 2002, 2003; Furió y Guisasola 1999). Sin embargo, aun cuando existen razones didácticas para enseñar fenómenos eléctricos desde un conocimiento básico sobre la estructura y composición de la materia (De Posada 1997; García-Carmona 2006a,b, 2008), son escasas las investigaciones al respecto.

Ello se refleja en los contenidos dedicados a la *materia* y la *electricidad*, que suelen ser secuenciados de forma inconexa en el currículo de física y química de Educación Secundaria Obligatoria (ESO). Se presentan como temas independientes, uno en el

campo de la química y otro en el de la física, sin que apenas se establezcan vínculos entre ambos. Lo más que sugiere el currículo es hacer alusión a la contribución del estudio de la electricidad al conocimiento sobre la materia, pero no a la inversa.

Consecuentemente, nos propusimos diseñar y evaluar una unidad didáctica innovadora sobre el comportamiento eléctrico de los sólidos, partiendo de un conocimiento básico sobre la naturaleza y propiedades de la materia. Entendemos que el estudio de estos materiales ya permite poner en juego una cantidad importante de conceptos tanto de electricidad como de la materia. La extensión de la propuesta a otros materiales será objeto de análisis posteriores, una vez que tengamos un primer conocimiento de cuáles son las ventajas u obstáculos de tal planteamiento didáctico.

Con todo, las cuestiones objeto de estudio fueron las siguientes:

1. ¿Qué comprensión del comportamiento eléctrico de materiales sólidos pueden conseguir los alumnos, a partir de un conocimiento básico sobre la materia?
2. ¿Qué conceptos y fenómenos plantean mayores dificultades de aprendizaje a los alumnos?
3. ¿Qué cambios conviene introducir para mejorar la efectividad de la propuesta didáctica, en acciones sucesivas, a la luz de *los resultados obtenidos*?

¿CÓMO ENSEÑAR EL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE MATERIALES SÓLIDOS EN LA ESO?

Pasamos a describir la fundamentación teórica de nuestra propuesta de enseñanza, tomando como base lo sugerido en la literatura y el actual currículo de física y química de ESO.

Debemos matizar que, con objeto de hacer una simplificación en esta propuesta introductoria al tema, consideraremos materiales, principalmente, sólidos formados por una sola sustancia pura.

¿Cuándo un material (sólido) está cargado eléctricamente?

La distinción entre 'tener carga' y 'estar cargado' suele plantear dificultades a alumnos de ESO (Rosado y García-Carmona 2004). Llegan a asumir que un sólido está cargado por el hecho de poseer cargas, sin tener en cuenta si el efecto global es el estado neutro. Esta idea puede evitarse si se comprende la naturaleza eléctrica de la materia, dada por la composición interna de los átomos. De acuerdo con Tsaparlis y Papaphotis (2002), en niveles educativos básicos es suficiente con una descripción clásica basada en el modelo atómico de Rutherford. Con éste, los alumnos pueden comprender que los sólidos, constituidos por átomos, son eléctricamente neutros porque tienen el mismo número de electrones y protones. Y sólo en el caso de que exista un *desequilibrio* entre ambos, el sólido estará cargado eléctricamente.

¿Por qué y cómo se electrizan los materiales (sólidos)?

Rosado y García-Carmona (2004) han encontrado que alumnos de ESO creen que un cuerpo cargado positivamente es aquel que ha ganado protones; y que estos protones pueden generar corrientes eléctricas. Tal idea podría ser superada si los alumnos antes asumen que los protones, al encontrarse en el núcleo, no 'pueden' abandonar el

átomo ni, por tanto, ‘moverse’^[1] por el interior de la materia. Ello, además, puede ayudar a entender que la separación de cargas en la electrización por inducción, se debe, exclusivamente, al movimiento de electrones.

¿Cómo influye la composición química de los sólidos en sus propiedades eléctricas?

La comprensión del comportamiento eléctrico de los materiales sólidos demanda conocer la distribución de los electrones en el interior de los átomos (García-Carmona 2006b; Gao y Sammes 2000), pues ello determina su estructura y composición química, así como el grado de movilidad de sus electrones de valencia. Para ello, recurrimos a la *regla del octeto*, como modelo simple que explica el enlace químico. Éste tiene sus limitaciones, principalmente por las excepciones que presenta, y puede generar ideas inadecuadas en el alumnado (Levy et al. 2007); sin embargo, se trata de un modelo intuitivo, que suele ser bastante útil en una primera introducción al enlace químico (Taber y Coll 2002; cit. en Coll y Treagust 2003, p. 479). Asimismo, optamos por una representación plana de los enlaces químicos, basada en los diagramas de Lewis.

También se hace una primera introducción a la *configuración electrónica* de los elementos representativos^[2], resaltando el papel de los electrones de valencia en la formación de los enlaces químicos, y, consecuentemente, en las propiedades eléctricas de los materiales. De acuerdo con García-Carmona (2004, 2006c), en el nivel de ESO es suficiente con que el alumno sea capaz de obtener la distribución de los electrones en los distintos niveles de energía —sin mencionar los subniveles energéticos—, e identificar el número de electrones de valencia.

Con todo ello, se pretende que el alumno adquiera una primera idea de por qué ciertos materiales sólidos (metales) tienen más electrones libres que otros (covalentes e iónicos^[3]); y, luego, asociar la propiedad de poder ‘conducir la electricidad’ con ‘tener electrones libres’.

¿Qué causa origina corrientes eléctricas en un material?

La diferencia de potencial [ddp], como causa que origina una corriente eléctrica, suele generar dificultades de aprendizaje. Es frecuente que los alumnos crean que la ddp es el efecto de una corriente, en lugar de su causa, o que ésta no puede existir si no hay circulación de corriente (Guisasola et al. 2008; Hierrezuelo y Montero 1991; Silva y Soares 2007; Rosenthal y Henderson 2006). Stocklmayer y Treagust (1994) señalan que tales ideas son, en parte, consecuencia de un tratamiento inadecuado del concepto en su enseñanza, que suele ser casi exclusivamente matemático, y sin incidencia en su significado físico. Fuera del contexto de los circuitos eléctricos, el movimiento de cargas puede introducirse en términos de un desequilibrio eléctrico entre dos puntos: cuando se unen dos cuerpos con cargas opuestas, habrá movimiento de electrones desde el cuerpo negativo al positivo^[4], hasta lograr en ambos la neutralidad. Obviamente, este planteamiento tiene sus limitaciones, entre otras, porque puede inducir a pensar que la ddp es una simple diferencia de cargas. Sin embargo, como primera aproximación al concepto, creemos que puede ser la más intuitiva para los alumnos de ESO^[5], dentro del contexto didáctico que proponemos, si antes han asimilado la tendencia natural de los cuerpos a neutralizarse. Como

señala Dykstra (1992), en la enseñanza de las ciencias a veces es útil construir un 'conocimiento provisional', situado entre el inicial del alumno y el aceptado científicamente, para que éste pueda progresar en su aprendizaje paulatinamente.

METODOLOGÍA

Alumnado participante

La propuesta de enseñanza fue experimentada con dos grupos naturales de tercer curso de ESO [14-15 años]. Una clase estaba formada por 33 alumnos y alumnas, y la otra, por 27. Pertenecían a un colegio de Sevilla, que acoge a una población escolar de clase social media-baja, procedente de las zonas centro y norte de la ciudad. Los dos grupos partían con un bagaje cognoscitivo inicial similar, en relación con la ciencia escolar aprendida hasta ese momento. Esto lo sabíamos por los informes académicos que constaban en el centro. La experiencia se desarrolló en las mismas condiciones con los dos grupos; es decir, con el mismo profesor, mediante la misma unidad didáctica, y en el mismo tramo de curso. Por tanto, en el análisis de datos, ambos grupos fueron considerados como uno solo de 60 alumnos.

Implementación de la propuesta de enseñanza

A partir del marco didáctico anterior, se diseñó una unidad didáctica denominada «*¿Qué comportamiento eléctrico tienen los sólidos que nos rodean?*». La tabla 1 ofrece una visión global de la misma (en García-Carmona (2008) se describe ampliamente). La unidad fue implementada durante el segundo trimestre, en unas 7 sesiones de clase (de 1 hora), después de estudiar la naturaleza y propiedades de la materia.

En el contexto de un estudio de caso exploratorio, de perfil descriptivo, el propósito era evaluar los niveles de comprensión y las principales dificultades mostradas por los alumnos en relación con el tema. Dado que los alumnos participantes no habían recibido previamente enseñanza sobre electricidad [6], y menos aún con el planteamiento didáctico que proponemos aquí, optamos por no hacer ningún test de ideas previas. En su lugar tuvimos en cuenta lo descrito en la fundamentación teórica de la propuesta, donde, entre otros, se recogen algunos resultados de trabajos previos realizados por el autor. No obstante, a fin de motivar al alumnado por el estudio de la unidad, en la primera sesión se les planteó una serie de cuestiones [actividad A.0]. El propósito era que expresaran sus opiniones, interactuando entre ellos y con el profesor, a fin de tener una percepción global de sus intereses y aportaciones sobre el tema. Por tanto, más que resolver cada una de las cuestiones, la intención era provocar en los alumnos una demanda de aprendizaje. Algunas de esas cuestiones fueron:

- En cualquiera de los electrodomésticos que tenéis en casa, ¿seríais capaces de diferenciar los materiales que son conductores y aislantes de la electricidad? ¿En qué os basáis para hacer la distinción?
- ¿Por qué algunas veces, cuando nos bajamos de un coche y tocamos la puerta, sentimos un calambre?
- ¿De qué están hechos los materiales que conducen la electricidad? ¿Y los aislantes?

COMPRENSIÓN DEL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE LOS SÓLIDOS

| Contenido abordado | Nº de sesiones | Contenidos de las actividades | Objetivos de aprendizaje |
|--|----------------|--|--|
| 0. Presentación | 1 | A.0: Motivación hacia el estudio del tema. | 0.1 Reconocer la presencia de fenómenos eléctricos en la vida diaria (relaciones Ciencia-Tecnología-Sociedad). 0.2 Sentir curiosidad por conocer la causa del comportamiento eléctrico de los materiales sólidos que nos rodean. |
| 1. ¿Cuándo un material (sólido) está cargado eléctricamente? | 2 | A.1: Revisión de la estructura del átomo a partir del modelo de Rutherford, y determinación del estado eléctrico de los materiales a partir del concepto de carga neta. | 1.1 Entender que los átomos son eléctricamente neutros porque tienen el mismo número de electrones y protones. 1.2 Entender que el estado eléctrico de un material viene determinado por un balance entre el número de electrones y protones. |
| 2. ¿Cómo se electrizan los materiales sólidos? | 1 | A.2: Realización de experiencias sencillas de electrización, analizando y discutiendo los fenómenos observados. | 2.1 Comprender que la electrización de un material (sólido) se debe, exclusivamente, a la pérdida o ganancia de electrones. 2.2 Comprender que la separación de cargas en la electrización por inducción, se debe al movimiento de electrones por la acción de una carga externa. |
| 3. ¿Cómo influye la estructura y composición química de los sólidos en sus propiedades eléctricas? | 2 | A.3: Revisión de la regla del octeto, analizando el papel de los electrones de valencia en la formación de enlaces químicos, y, por tanto, en las propiedades eléctricas de los materiales. A.4: Determinación del comportamiento eléctrico de una sustancia pura sólida (mono-elemental), a partir de la configuración electrónica de sus átomos. A.5: Identificación, mediante diagramas de Lewis, de la estructura interna de un conductor y un aislante. | 3.1 Entender que la movilidad de los electrones en los materiales sólidos depende de la estructura y composición química de estos. 3.2 Entender que, en los materiales sólidos, los electrones de valencia son los que pueden llegar a formar parte de una corriente eléctrica, cuando son liberados de sus enlaces. 3.3 Relacionar la propiedad de los materiales sólidos de conducir la electricidad con poseer electrones libres. 3.4 Comprender que los sólidos metálicos suelen tener un gran número de electrones libres porque sus átomos tienden a despojarse de sus electrones de valencia cuando forman parte del enlace metálico que los estabiliza. 3.5 Comprender que los sólidos no metálicos apenas tienen electrones libres porque sus átomos tienden a ganar electrones de valencia cuando forman parte de los enlaces químicos (iónicos o covalentes) que los estabilizan; de modo que dichos electrones quedan ligados a los enlaces. |
| 4. ¿Cuál es la causa de que se originen corrientes eléctricas? | 1 | A.6: Experimentación con objetos electrizados, y comprobación del concepto de ddp. | 4.1 Comprender que la generación de una corriente eléctrica es debida a una diferencia de carga entre dos zonas del sólido, cuya finalidad es tratar de equilibrarlas eléctricamente. 4.2 Comprender que para mantener una corriente eléctrica entre dos zonas de un sólido es preciso mantener un desequilibrio eléctrico entre ambas, por ejemplo, mediante una pila. |

Tabla 1.- Visión general de la unidad didáctica “¿Cómo explicar el comportamiento eléctrico de los materiales que nos rodean?”.

Durante la experiencia, los alumnos se organizaron en equipos de trabajo, de tres o cuatro componentes donde interpretaban la información de las actividades, intercambiaban ideas y opiniones, y solicitaban ayuda al profesor ante las dudas u obstáculos que les surgían. Luego, los equipos elaboraban respuestas consensuadas a las cuestiones planteadas.

En las puestas en común, los equipos presentaban sus conclusiones, con el propósito de discutirlas y llegar a la(s) respuesta(s) más adecuada(s). Este proceso era impulsado y moderado por el profesor, quien introducía los matices y orientaciones oportunos en cada caso. Se intentaba poner de relieve las limitaciones explicativas de las ideas equivocadas o imprecisas, y valorar cómo otras permitían una mejor explicación de las situaciones analizadas. Lógicamente, este proceso era más complejo cuanto mayor disenso existía en las primeras conclusiones de los equipos; de hecho, en todos los casos no se lograría el efecto deseado, como veremos en los resultados de la evaluación.

Instrumentos de análisis

El grado de aprendizaje logrado por los alumnos fue evaluado a través del test de evaluación descrito en el Anexo. Hasta llegar a la versión final del test se había seguido un proceso de depuración. Se elaboró una primera versión del test con un número mayor de ítems, todos ellos relativos a los contenidos estudiados. Luego se redujo el número de ítems contando con la opinión de colegas expertos en investigación en didáctica de las ciencias. Sus sugerencias ayudaron a decidir qué ítems había que eliminar o modificar. Asimismo, de esa versión inicial se eliminaron aquellos ítems que no aportaban datos útiles, con vistas a determinar los niveles de comprensión y las principales dificultades de aprendizaje de los alumnos.

En el análisis de las respuestas de los alumnos se establecieron los siguientes niveles:

- Nivel 1: Respuesta en blanco.
- Nivel 2: Respuesta incorrecta o confusa en el sentido de que no se comprende o no se aplica adecuadamente los conceptos manejados.
- Nivel 3: Respuesta en la línea correcta, pero se justifica de manera incompleta o con imprecisiones.
- Nivel 4: Respuesta correcta y justificada adecuadamente.

En aquellos casos en los que se tenía alguna duda para clasificar las respuestas, también se contó con la opinión de algunos de estos colegas, con quienes se consensuó la asignación del nivel correspondiente.

Dado el carácter cualitativo del estudio, era necesario utilizar más de un instrumento de investigación con el fin de poder triangular datos. Es preciso decir, al respecto, que optamos por no hacer grabaciones de audio o vídeo de las sesiones, pues comprobamos que ello alteraba significativamente el desarrollo natural de las clases. En su lugar, empleamos otros instrumentos de investigación cualitativa como el diario del profesor y el cuaderno del alumno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dificultades de los alumnos durante el proceso de aprendizaje

Análisis a partir del diario del profesor

Siguiendo las recomendaciones de Zabalza (2004), sobre el uso del diario como instrumento de investigación en el aula, el profesor anotaba lo más significativo de cada sesión, con especial atención a las dificultades de los equipos durante el desarrollo las actividades, y en la exposición de conclusiones. Tales dificultades las estimó desde una perspectiva general, y para el conjunto de la clase, empleando una escala de valoración cualitativa. La tabla 2 muestra una síntesis de esas valoraciones, obtenidas a partir de las observaciones y reflexiones realizadas en ambos grupos-clase.

Se observaron las mayores dificultades de aprendizaje en relación con: el fenómeno de la electrización [actividad A.2], la relación entre la composición química de los materiales y su comportamiento eléctrico [actividades A.3], y la identificación de un conductor o un aislante a partir de la representación de su estructura [actividad A.5]. El papel de los electrones de valencia en la conducción eléctrica de los sólidos [actividad A.4] y la causa de una corriente eléctrica [actividad A.6] originaron dificultades de aprendizaje moderadas. Mientras que las dificultades más bajas se observaron en relación con el concepto de carga neta [actividad A.1].

| Actividades | Dificultad de comprensión y manipulación de conceptos | Dificultad de exposición de las conclusiones |
|-------------|---|--|
| A.1 | Baja-media | Media |
| A.2 | Media-alta | Media-alta |
| A.3 | Media-alta | Media-alta |
| A.4 | Media | Baja-media |
| A.5 | Media-alta | Media-alta |
| A.6 | Media | Media |

Escala de estimación: Muy baja, baja, media, alta y muy alta

Tabla 2.- Dificultades de los alumnos, estimadas por el profesor, durante la realización de las actividades de la propuesta de enseñanza.

Análisis del cuaderno de los alumnos

Antes de la experiencia, ya habíamos generado en los alumnos el hábito de escribir comentarios reflexivos sobre su aprendizaje (García-Carmona 2005). Primero anotaban su respuesta inicial, a continuación, las correcciones o matizaciones realizadas; y luego, argumentaban qué tipo de causa(s) [reflexión propia, explicación de un compañero, intervención del profesor, puesta en común de la actividad,...] había(n) motivado dichas modificaciones. Los alumnos también hacían una autovaloración de su aprendizaje en cada actividad, usando argumentos como: "después de la puesta en común, he comprendido que....", "aún sigo sin comprender que...", "la discusión con mis compañeros me ayudó a entender que...", etc. Ello

permitió hacer una clasificación del aprendizaje autoestimado por los alumnos, según los niveles siguientes:

- Nivel I: Manifiesta que sigue sin comprender la actividad, después de la puesta en común.
- Nivel II: Corrige sus errores iniciales, y manifiesta que comprende lo tratado en la actividad, después de la puesta en común.
- Nivel III: Dice comprender bien el contenido de la actividad desde el principio y no necesitó corrección.

Los resultados del proceso se recopilan en la tabla 3. Lo más destacable es que, en todas las actividades, el porcentaje de alumnos que manifiesta haber terminado comprendiendo el contenido de las mismas [niveles II y III] es mayoritario. Asimismo, en casi todas las actividades el mayor porcentaje de alumnos se concentra en el nivel II; lo cual pone de relieve la importancia pedagógica de las discusiones y puestas en común de las actividades en clase.

| Contenidos estudiados | Actividades | Niveles de aprendizaje autoestimados | | | | Total |
|---|--------------------|---|-----------------|------------------|-------|--------------|
| | | Nivel I | Nivel II | Nivel III | | |
| 1. ¿Cuándo un material está cargado eléctricamente? | A.1 | 8.3 | 45.0 | 46.7 | 100.0 | |
| 2. ¿Cómo se electrizan los materiales? | A.2 | 22.3 | 54.3 | 23.3 | 100.0 | |
| 3. ¿Cómo influye la estructura y composición química de los materiales en sus propiedades eléctricas? | A.3 | 26.7 | 53.3 | 20.0 | 100.0 | |
| | A.4 | 18.3 | 31.7 | 50.0 | 100.0 | |
| | A.5 | 24.7 | 45.6 | 29.7 | 100.0 | |
| 4. ¿Cuál es la causa de que se originen corrientes eléctricas en un material? | A.6 | 20.3 | 41.3 | 39.3 | 100.0 | |

Tabla 3.- Frecuencias (%) de los niveles de aprendizaje estimados por los alumnos en las actividades de la unidad didáctica.

La autovaloración del alumno sobre su aprendizaje puede estar condicionada por aspectos tales como la autoconfianza y/o la autoexigencia. Pero ello forma parte del complejo proceso de aprendizaje, y pensamos que, por encima de todo, es el alumno quien más pistas puede tener de su propio aprendizaje; sobre todo, si está habituado a hacer una meta-reflexión continuada sobre ello.

Algunos fragmentos de comentarios y reflexiones de los alumnos, clasificados por el profesor según los criterios anteriores, son:

- Nivel I. «[...] En clase, hablando de esta actividad, ha habido alguna vez que no he podido opinar, ya que no sabía qué se comentaba y me encontraba perdida. [...] La verdad es que sigo sin comprender bien la actividad, [...].» [Alumno escribe sobre su aprendizaje en la actividad 5].
- Nivel II. «Esta actividad me ha resultado difícil porque no sabía el porqué; suponía que era por lo del signo de la carga. Mi hipótesis estaba más o menos

bien, al igual que la de Laura. Mi profesor me llamó para que explicara en voz alta mi teoría [...]. Ahora sí la entiendo bien.» [Alumno escribe sobre su aprendizaje en la actividad 2]

- Nivel III: «*No he encontrado ninguna dificultad en esta actividad, ya que hace poco que estudiamos esto y creo que he asimilado bien los conceptos de átomo y de las partículas que lo componen [...].»* [Alumna escribe sobre su aprendizaje en la actividad 1].

Niveles de comprensión y dificultades de aprendizaje tras finalizar el proceso de aprendizaje

La tabla 4 muestra los resultados del test. Según los porcentajes acumulados en los niveles de respuestas más altos [niveles 3 y 4], podemos decir que el grado de comprensión de los alumnos sobre el tema fue, en general, modestamente satisfactorio. Solamente son destacables los resultados más bien favorables del ítem 1, donde las tres cuartas partes del alumnado reconocen a un semimetal, a partir del número de electrones de valencia de sus átomos, y su comportamiento eléctrico intermedio entre conductores y aislantes. En el resto de ítems, los niveles de respuestas más altos fueron logrados por alrededor de las dos terceras partes de los alumnos. Tales ítems estaban orientados a indagar qué compresión habían adquirido sobre: el carácter conductor o aislante de un material según la configuración electrónica de sus elementos [ítem 2], el fenómeno de la electrización por inducción [ítem 3], y la causa de una corriente eléctrica [ítem 4].

Conviene resaltar la coherencia entre las dificultades de los alumnos observadas durante el proceso de aprendizaje [diario del profesor y cuaderno del alumno], y las detectadas al final del mismo [test]. Lo cual pone de manifiesto, de alguna manera, la validez de los tres instrumentos de investigación usados en la triangulación de los datos.

A continuación, describimos las principales ideas y razonamientos usados por los alumnos en cada ítem del test.

| | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 | Nivel 4 | Nivel 3 + Nivel 4 |
|--------|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| Ítem 1 | 6.7 | 18.3 | 48.3 | 26.7 | 75.0 |
| Ítem 2 | 7.4 | 30.0 | 37.6 | 25.0 | 61.6 |
| Ítem 3 | 8.3 | 25.0 | 38.3 | 28.3 | 66.6 |
| Ítem 4 | 6.7 | 28.3 | 26.5 | 38.3 | 64.8 |
| (n=60) | | | | | |

Tabla 4.- Porcentajes de los niveles de respuestas al test, y frecuencias acumuladas en los niveles de respuesta más altos [niveles 3 y 4].

Comportamiento eléctrico de un material, según la configuración electrónica de sus átomos

Dentro del nivel 2, del ítem 1, la idea equivocada más común es que el comportamiento eléctrico intermedio de los semimetales se debe a que son, simultáneamente, conductores y aislantes; o una 'mezcla' de ambos. Ejemplo:

«[...] es un semimetal, por lo cual tiene la mitad de aislante y mitad de conductor, entonces es mejor conductor que los aislantes (no metales) y peor conductor que los conductores (metales).»

Las respuestas de nivel 3 no aportaron datos de especial interés para el estudio, y los niveles de comprensión más altos fueron explicados con respuestas como la siguiente:

«[...] es un semimetal porque tiene sus átomos tienen 4 electrones en su última capa. Como para ser estable le es igual de fácil o difícil perderlos que ganarlos, sus electrones no se mueven con tanta libertad como en los conductores, ni están tan agarrados como en los aislantes.»

Respecto al reconocimiento del carácter conductor o aislante de los materiales [ítem 2], en el nivel 2 se detecta la idea equivocada de asociar el carácter conductor con el hecho de que los átomos del material necesiten ganar o perder —indistintamente— pocos electrones para lograr su estabilidad. Un ejemplo:

«[...] 'A' y 'B' son buenos conductores porque en ambos los átomos tienen muy fácil perder o ganar muy pocos electrones de valencia....»

Otra idea equivocada es la que considera que un buen conductor es aquel material constituido por elementos con muchos electrones de valencia:

«[...] porque al tener más electrones de valencia [los átomos de] la sustancia 'B', es mejor conductora y, por tanto, 'A' será mejor aislante que 'B'.» [Corchete añadido].

El nivel 3 se caracterizó por justificaciones demasiado escuetas. Y las respuestas más satisfactorias [nivel 4] fueron similares a la siguiente:

«[...] 'A' es mejor conductor que 'B' porque sus átomos pierden sus electrones [de valencia] con mayor facilidad y estos tienen mayor libertad de movimiento dentro del material. A es un metal y B un no metal.» [Corchete añadido].

Electrización por inducción

En relación con el fenómeno de inducción eléctrica [ítem 3], lo más destacado del nivel 2 es que algunos alumnos consideran que los protones pueden moverse en los materiales, del mismo modo que los electrones:

«[...] porque las cargas de signo contrario se atraen, y las del mismo signo se repelen, entonces al acercar la varilla que está cargada positivamente, los electrones que se encuentran en la bola los atraerá [la varilla] y los protones se irán lo más lejos que puedan, por este motivo se separan las cargas.» [Corchete añadido].

En el nivel 3, lo más significativo es que, si bien las respuestas se orientan en la línea adecuada, no se deja claro si en la redistribución de las cargas hay o no movimiento de protones. Un ejemplo:

«[...] al acercar la varilla cargada positivamente, cargas positivas con cargas positivas se repelen. Y cargas positivas con cargas negativas se atraen, así que las cargas positivas [de la bola] quedan en un lado y las negativas en otro.» [Corchete añadido].

En el nivel más alto [nivel 4], además de explicar adecuadamente en qué consiste el fenómeno de inducción eléctrica, algunos describen, incluso, lo que pasaría si ambos cuerpos llegaran a ponerse en contacto después de la inducción:

«[...] Ya que los protones no se pueden mover y la varilla está cargada positivamente, los electrones (que tienen carga negativa), al ser de diferente signo se desplazan hacia la varilla, debido a la atracción que existe entre ambos cuerpos. Si seguidamente se uniesen la bola y la varilla, habría un intercambio de cargas que intentaría estabilizar la varilla.»

Causa de una corriente eléctrica

La comprensión de la circulación de corriente entre dos puntos fue examinada con el ítem 4. Aunque los alumnos parecen tener claro que la causa de una corriente eléctrica es consecuencia de un desequilibrio eléctrico, aflora la idea equivocada de que los protones también pueden moverse por el material formando parte de una corriente eléctrica [nivel 2]:

«[...] Circularán el mismo número de electrones y de protones de A a B y de B a A. Esto cesará cuando ambos cuerpos estén neutralizados.»

En el nivel 3, los alumnos se limitan, fundamentalmente, a describir lo que ocurrirá, sin explicar la causa del fenómeno:

«[...] Circularán electrones desde el B hacia el A porque son los únicos que circulan.»

El nivel más alto [nivel 4] fue argumentado con respuestas como la siguiente:

«[...] Las cargas que circularán son los electrones, pues son los únicos que pasan de unos átomos a otros. Los protones no salen del núcleo del átomo. Así, los electrones circularán desde el 'B' (cargado positivamente) hacia 'A' (cargado negativamente) hasta que ambos consigan ser eléctricamente neutros.»

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES DIDÁCTICAS

Desde una perspectiva global, podemos decir que los alumnos desarrollaron ideas y argumentos en la línea adecuada, aunque –como hemos visto– con ciertas imprecisiones o equivocaciones. Pero, quizás lo más significativo sea que lograran integrar, en un mismo contexto explicativo, conceptos relativos a la materia y la electricidad; la principal finalidad de la experiencia didáctica.

Los niveles de comprensión más altos se lograron en aspectos tales como (1) el reconocimiento del comportamiento intermedio entre conductores y aislantes de los semimetales, según la configuración electrónica de sus elementos; y (2) la asimilación de que la causa de una corriente eléctrica en un material es un desequilibrio eléctrico entre dos puntos. Respecto a esto último, pensamos que tal planteamiento didáctico, además de favorecer un primer acercamiento al concepto de *ddp*, evitó que brotara la idea que considera la *ddp* como una consecuencia de la corriente eléctrica. Asimismo, creemos que así se favorece una posterior introducción más formal del concepto de *ddp*, en términos de energía eléctrica, tal y como se sugiere en otros trabajos revisados (p.e. Rosenthal y Henderson 2006; Silva y Soares 2007).

Por otra parte, los niveles de comprensión más bajos fueron observados en relación con (1') la distinción del mayor o menor carácter conductor de un material, atendiendo a la configuración electrónica de sus elementos; y (2') con el fenómeno de la electrización por inducción. Esto, como veremos a continuación, nos hace replantear algunos aspectos de la propuesta, en aras de mejorar la enseñanza del tema en acciones sucesivas.

Implicaciones para acciones futuras

En relación con el carácter conductor de los sólidos, las principales dificultades de aprendizaje estuvieron ligadas al papel de los electrones de valencia. Así, algunos alumnos creen que un sólido tiene carácter conductor si sus átomos tienen muchos electrones de valencia, sin atender a si estos tienen mayor o menor posibilidad de ser libres. En tal sentido, en acciones futuras insistiremos más en que el carácter conductor de un material viene determinado por su estructura y composición química. El tipo de enlace químico determina cuán ligados están los electrones de valencia en los enlaces y, por tanto, qué posibilidades tienen de ser libres para formar parte de una corriente eléctrica. Para construir esta idea, como hemos sostenido en la fundamentación de la propuesta, nos seguiremos basando en la regla del octeto, al entender que se trata del modelo más simple y apropiado para la etapa de ESO. Con todo, nos proponemos reformular los objetivos de aprendizaje 3.1 y 3.2 [tabla 1] del modo siguiente:

- Comprender, a partir de las características de los enlaces químicos –descritos desde la regla del octeto, y representados mediante diagramas planos–, que el carácter conductor de un material sólido depende de la movilidad que pueden llegar a tener los electrones de valencia por el mismo.
- Comprender, teniendo en cuenta el tipo de enlace químico, que un sólido tiene mayor carácter conductor cuanto más fácil sea liberar sus electrones de valencia. [Aquí convendrá hacer un mayor esfuerzo por representar adecuadamente, mediante diagramas planos, cómo en los sólidos aislantes los electrones de valencia están más ligados a la red que en los conductores].

Respecto a los portadores de carga en un sólido, no fue posible evitar que aflorara una idea equivocada, que ya anticipamos en el marco teórico: que los protones también pueden moverse por el material (Rosado y García-Carmona 2004). En la línea de lo anterior, conviene insistir en que los responsables de la electricidad que circula en los sólidos son los electrones de valencia que han sido liberados de sus enlaces. Para ello, en la ESO creemos oportuno promover la idea –provisional para esta etapa– de que los protones, al encontrarse en el núcleo de los átomos ['mucho más internos' que los electrones], están tan ligados a estos que su 'liberación' requeriría una energía excesivamente grande [como ocurre en los procesos nucleares]. Y que el aporte de tal energía, antes de liberarlos ya habría roto el material. Todo esto nos lleva a reformular los objetivos de aprendizaje 2.2 y 3.3 como sigue:

- Relacionar la propiedad de conducir la electricidad en sólidos con poseer electrones libres, y entender que los protones, al encontrarse en el núcleo, están muy ligados al átomo y no "pueden" abandonarlo ni, por tanto, "moverse" por el material.

- Comprender que la separación de cargas en la electrización por inducción, se debe, exclusivamente, al movimiento de electrones; de manera que una acumulación de carga positiva, en una parte del material, se debe a la migración de electrones al otro extremo del mismo por la acción de una carga externa.

En relación con este último objetivo, entendemos que su consecución puede verse favorecida si el fenómeno de la inducción eléctrica se plantea en términos de la existencia de una *ddp* entre el objeto que se electriza y la carga externa (Guisasola et al. 2008). Si bien, ello lo haríamos manteniendo el nivel de formulación sostenido en nuestro tratamiento didáctico para el concepto de *ddp*.

Lógicamente, la discusión y reformulación de los objetivos de aprendizaje iniciales, implican también hacer una revisión de las actividades de la unidad didáctica, así como de los procesos e instrumentos de evaluación empleados. Igualmente, sería interesante extender la unidad al estudio del comportamiento eléctrico de otros materiales como las disoluciones iónicas. Si bien, todo ello será posiblemente objeto de una futura investigación.

Por último, es preciso decir que, dadas las características del estudio exploratorio descrito, llevado a cabo en un contexto concreto, los resultados obtenidos no son, obviamente, generalizables. Sin embargo, pueden constituir un referente interesante para nuevas investigaciones, tanto en contextos educativos similares como distintos, que proporcionen nuevos datos sobre lo aquí tratado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRIDGET, E. (2009). How Young Children Understand Electric Circuits: Prediction, explanation and exploration. *International Journal of Science Education*, 31(8), 1025 - 1047.
- COLL, R.K. y TREAGUST, D.F. (2003). Investigation of secondary school, undergraduate, and graduate learners' mental models of ionic bonding. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(5), 464-486.
- CRIADO, A.M. y CAÑAL, P. (2002). Obstáculos para aprender conceptos elementales de electrostática y propuestas educativas. *Investigación en la Escuela*, 47, 53-63.
- CRIADO, A.M y CAÑAL, P. (2003). Investigación de algunos indicadores del estatus cognitivo de las concepciones sobre el estado eléctrico. *Enseñanza de las Ciencias*, nº extra, 29-41.
- DE POSADA, J.M. (1997). Conceptions of high school students concerning the internal structure of metals and their electric conduction: structure and evolution. *Science Education*, 81, 445-467.
- DUIT, R. y RHÖNECK, C. (1998). Learning and understanding key concepts of electricity. En A. Tiberghien, E. Leonard y J. Barojas (Eds.), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education* (International

- Commission on Physics Education). Disponible en: <http://www.physics.ohio-state.edu/~jossem/ICPE/C2.html> [Última consulta: 12/06/2008].
- DYKSTRA, D.I. (1992) Studying conceptual change: constructing new understandings. En R. Duit, F. Goldberg y H. Niedderer (Eds.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies* (pp. 40-58). Proceedings of an International Workshop. Kiel: IPN.
- FURIÓ, C. y GUISASOLA, J. (1998). Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y de campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(1), 131-146.
- 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., GUISASOLA, J., ALMUDÍ, J.M. y CEBERIO, M. (2003). Learning the electric field concept as oriented research activity. *Science Education*, 87, 640-662.
- HIERREZUELO, A. y MONTERO, A. (1991). *La ciencia de los alumnos*. Málaga: Elzevir.
- GAO, W. y SAMMES, N.M. (2000). *An introduction to electronic and ionic materials*. Singapore: World Scientific Publishing.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2004). Introducción a la configuración electrónica de los átomos en los niveles básicos de enseñanza. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 40, 25-34.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2005). Un estudio de caso sobre la eficiencia de los procesos de autorregulación en el aprendizaje de la Física. *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*, 7(1), pp. 1-14. Disponible en: http://www.fae.ufmg.br/ensaio/v7_n1/volumeVIInI.htm [Última consulta: 15/04/2009]
- GARCÍA-CARMONA, A. (2006a). Construcción de significados de física de semiconductores en educación secundaria. Fundamentos y resultados de una investigación. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 28(4), 507-519.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2006b). Estructura electrónica de los elementos y su comportamiento eléctrico: niveles de comprensión en alumnos de 14-15 años. Libro de los XXII Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2006c). La estructura electrónica de los átomos en la escuela secundaria: un estudio de los niveles de comprensión. *Educación Química*, 17(4), 414-423.
- GARCÍA-CARMONA, A. (2008). Relacionando los fenómenos eléctricos con la naturaleza y comportamiento de la materia: fundamentos de una propuesta de enseñanza. *Educación Química*, 19(4), 323-331.
- GARCÍA-FRANCO, A. y GARRITZ, A. (2006). Desarrollo de una unidad didáctica: el estudio del enlace químico en bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(1), 111-124.

- GUISASOLA, J., ZUBIMENDI, J.L., ALMUDÍ, J.M. y CEBERIO, M. (2008). Dificultades persistentes en el aprendizaje de la Electricidad: estrategias de razonamiento de los estudiantes al explicar fenómenos de carga eléctrica. *Enseñanza de las Ciencias*, 26(2), 173-188.
- LEVY, T., MAMLOK-NAAMAN, R., HOFSTEIN, A. y KRAJCIK, J. (2007). Developing a new teaching approach for the chemical bonding concept aligned with current scientific and pedagogical knowledge. *Science Education*, 91(4), 579-603.
- MÉTIOUI, A. BRASSARD, C. LEVASSEUR, J. y LAVOIE, M. (1996). The persistence of students' unfounded beliefs about electrical circuits: The case of Ohm's law. *International Journal of Science Education*, 18(2), 193-212.
- MILLAR, R. y KING, T. (1993). Students' understanding of voltage in simple series circuits. *International Journal Science Education*, 15(3), 339-349.
- ROSADO, L. y GARCÍA-CARMONA, A. (2004). Concepciones y dificultades de aprendizaje de estudiantes de Secundaria sobre el comportamiento eléctrico de los semiconductores y otros materiales. Libro de los XXI Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales (273-280). San Sebastián: Universidad del País Vasco.
- ROSENTHAL, A.S. y HENDERSON, C. (2006). Teaching about circuits at the introductory level: An emphasis on potential difference. *American Journal of Physics*, 74(4), 324-328.
- SILVA, A. y SOARES, R. (2007). Voltage versus current, or the problem of the chicken and the egg. *Physics Education*, 42(5), 508-515.
- STOCKLMAYER, S. y TREAGUST, D.F. (1994). A historical analysis of electric current in textbooks: a century of influence on physics education. *Science & Education*, 3, 131-154.
- TSAPARLIS G. y PAPAPHOTIS, G. (2002). Quantum-chemical concepts: are they suitable for secondary students? *Chemistry Education Research and Practice*, 3, 129-144.
- VIENNOT, L. y RAINSON, S. (1992). Students' reasoning about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, 14(4), 475-487.
- ZABALZA, M.A. (2004). *Diarios de clase. Un instrumento de investigación y desarrollo profesional*. Madrid: Narcea.

[1] Estamos obviando el caso de las reacciones nucleares, donde los protones sí entran en juego; si bien, la propuesta didáctica se plantea cuando aún no ha sido abordado el tema de la radiactividad.

[2] En el nivel de ESO aún no suele abordarse el estudio de los metales de transición.

[3] En este contexto, nos referimos a sustancias iónicas en estado sólido, ya que en disolución sí son buenas conductoras de la electricidad.

[4] Englobamos los casos en los que ambos cuerpos tienen el mismo signo de la carga [ya sea positiva, o negativa], pero con diferente magnitud.

[5] La definición de la *ddp* entre dos puntos de un circuito como la energía eléctrica necesaria para trasladar la unidad de carga positiva entre dichos puntos, incita, desde una perspectiva epistemológica y didáctica, tener que introducir antes el concepto de campo eléctrico; el cual, como han revelado algunas investigaciones (p.e. Furió y Guisasola 1998), suele plantear dificultades de aprendizaje significativas a alumnos de Secundaria. En consecuencia, somos partidarios de posponer este nivel de formulación del concepto de *ddp* a partir de Bachillerato (16-18 años).

[6] Tan sólo habían montado algún circuito sencillo en clases de tecnología, sin entrar en el análisis de la física que hay detrás de su funcionamiento.

ANEXO: TEST SOBRE EL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE LOS MATERIALES

1. Cuatro alumnos están discutiendo sobre las propiedades eléctricas de cierto material a temperatura ambiente. El material está compuesto por átomos de un solo elemento, con 4 electrones de valencia. Las afirmaciones de cada uno son:

- a) El primero sostiene que el material es mejor conductor que los metales
- b) El segundo piensa que el material es mejor aislante que los no metales
- c) El tercero dice que es mejor conductor que los no metales, y peor que conductor que los metales
- d) El cuarto cree que es peor conductor que los no metales y peor aislante que los metales

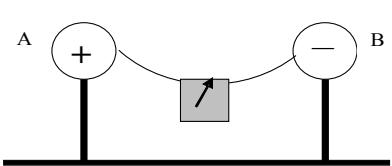
¿Quién de ellos crees que tiene razón? ¿Por qué?

2. El profesor de estos alumnos no queda convencido de que entiendan bien el comportamiento eléctrico de los materiales, según su estructura y composición química. Así que les plantea lo siguiente: "Consideremos dos sustancias puras sólidas, A y B, formadas por átomos de un solo elemento. Sus configuraciones electrónicas son, respectivamente, (2, 8, 1) y (2, 8, 6). A temperatura ambiente, ¿qué comportamiento eléctrico creéis que tendrá cada uno de ellos?". Las respuestas de cada alumno fueron:

- a) El primero dice que A es mejor conductor que B.
- b) El segundo piensa que A y B son buenos aislantes.
- c) El tercero opina que A es mejor aislante que B.
- d) El cuarto cree que A y B son buenos conductores.

Además de las respuestas anteriores, tuvieron que justificarlas. ¿Quién crees que tenía razón? ¿Qué explicación debió dar para justificar su respuesta?

3. Andrés hizo en casa un experimento para comprobar un fenómeno eléctrico estudiado en clase. Cogió una bolita de porexpán y la colgó de un hilo al flexo de su mesa de estudio. Luego, cogió una varilla de vidrio y la frotó con un paño. A continuación, acercó la varilla a la bola, observando que ésta se sentía atraída por la varilla. Basándote en lo que has aprendido sobre los fenómenos de electrización, y sabiendo que la varilla de vidrio quedó cargada positivamente, explica lo que había ocurrido en el experimento de Andrés.



4. En una feria de la ciencia, los divulgadores muestran a unos visitantes la siguiente experiencia (Figura 1): Se toma un cuerpo A, cargado positivamente, y otro cuerpo B, cargado negativamente; a continuación, se unen mediante un hilo conductor, que lleva conectado un amperímetro para observar si hay o no paso de corriente eléctrica. Lo que se observa es que, al conectar los cuerpos con el hilo, el amperímetro indica paso de corriente; pero, al momento, deja de detectar corriente. Los divulgadores plantean a los visitantes las siguientes preguntas:

- a) ¿Qué cargas han circulado por el hilo conductor?
- b) ¿En qué sentido lo han hecho?
- c) ¿Por qué cesa ese movimiento de cargas, es decir, la corriente?

Con lo que has aprendido sobre el tema, ¿qué habrías contestado en cada caso?

UNDERSTANDING THE ELECTRIC BEHAVIOUR OF SOLIDS FROM A BASIC KNOWLEDGE ON MATTER. AN EXPLORATORY STUDY WITH SECONDARY SCHOOL STUDENTS

SUMMARY

Electricity learning from a basic knowledge of matter is argued in this article. It can favour a global vision on physic-chemical sciences because an explicit link between both scientific topics is established. In this sense, a theoretic-practical framework is suggested to teach the electric behaviour of solid materials in Compulsory Secondary Education. In order to evaluate the innovative didactical proposal, an exploratory case study was carried out with 60 students [age 14-15]. Students' understanding levels and their learning difficulties were analysed. In general, students achieved moderately satisfactory levels of understanding, but they had been capable to relate concepts of electricity with concepts of matter when they argued their explanations. It is concluded teaching the topic in the didactical framework is possible to students' learning. However it is necessary to look deeply into the subject through new researches oriented to overcome the detected learning difficulties.

Key-words: Electricity; Learning obstacles; Matter; Secondary Education; Understanding levels.