

Enseñar ciencias

M.P. Jiménez Aleixandre (coord.), A. Caamaño,
A. Oñorbe, E. Pedrinaci, A. de Pro



176

Serie Didáctica de las ciencias experimentales

© María Pilar Jiménez Aleixandre, Aureli Caamaño, Ana Oñorbe, Emilio Pedrinaci,
Antonio de Pro

© de esta edición: Editorial GRAÓ, de IRIF, S.L.
C/ Francesc Tàrraga, 32-34. 08027 Barcelona
www.grao.com

1.ª edición: enero 2003

2.ª edición: enero 2007

ISBN 13: 978-84-7827-285-3

DL:

Diseño de cubierta: Xavier Aguiló

Impresión: Publidisa

Impreso en España

Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios tanto si es eléctrico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización escrita de los titulares del *copyright*.

Índice

Introducción: aprender a pensar científicamente, María Pilar Jiménez Aleixandre | 7

Parte I

- 1. El aprendizaje de las ciencias: construir y usar herramientas, María Pilar Jiménez Aleixandre | 13**
 - El conocimiento situado en su contexto: actividades y problemas auténticos | 14
 - Comunidades de aprendizaje en la clase de ciencias | 18
 - Pensar con conceptos científicos, negociar significados | 22
 - El desarrollo de los procedimientos y el trabajo científico | 27
 - El desarrollo de actitudes y valores | 30
 - Bibliografía comentada | 32
- 2. La construcción del conocimiento científico y los contenidos de ciencias, Antonio de Pro Bueno | 33**
 - El problema de contenidos en la enseñanza de las ciencias | 34
 - ¿Qué no son las ciencias? | 35
 - ¿Creemos que la ciencia es empirista? | 36
 - ¿Creemos que la ciencia es sólo racionalista? | 36
 - ¿Creemos que la ciencia es positivista? | 37
 - ¿Qué son las ciencias? | 38
 - ¿Qué conocimientos aportan las ciencias y cuáles de ellos podemos usar en su enseñanza? | 40
 - ¿Cómo se han construido los conocimientos científicos? | 44
 - ¿Qué consecuencias podemos extraer para la enseñanza de las ciencias? | 51
 - Bibliografía comentada | 53
- 3. Comunicación y lenguaje en la clase de ciencias, María Pilar Jiménez Aleixandre | 55**
 - La comunicación en las clases de ciencias: construcción de significados | 56
 - Explicaciones en las clases de ciencias | 60
 - Comunicación y transformación del discurso | 63
 - Léxico, vocabulario: mecanismos de reformulación | 63
 - Lenguaje figurado: metáforas y analogías | 65
 - El papel de las imágenes en el discurso científico | 66
 - Razonamiento y argumentación: justificar conclusiones con datos | 67
 - Comunidades de pensamiento: hablar ciencias y hacer ciencias | 70
 - Bibliografía comentada | 71
- 4. Resolución de problemas, Ana Oñorbe | 73**
 - ¿Qué es un problema? Objetivos de la resolución de problemas en ciencias | 73
 - Condiciones de existencia de un problema | 76
 - Tipos de problemas | 77
 - Proceso de resolución | 78
 - La enseñanza tradicional de la resolución de problemas | 79

¿Qué propone la didáctica de las ciencias?	81
▪ Estudio de los procesos mentales	82
▪ Comparación entre expertos y no expertos	82
▪ Dificultades en la enseñanza y aprendizaje de la resolución de problemas	83
Algunas propuestas metodológicas	88
Bibliografía comentada	93

5. Los trabajos prácticos en ciencias, Aureli Caamaño | 95

¿Por qué realizar trabajos prácticos?	96
Tipos de trabajos prácticos	96
▪ El aprendizaje de procedimientos y destrezas con relación a los trabajos prácticos	99
Experiencias y experimentos ilustrativos	100
Los ejercicios prácticos: aprendizaje de métodos y técnicas e ilustración de la teoría	103
Las investigaciones: construir conocimiento, comprender los procesos de la ciencia y aprender a investigar	104
La implementación de las investigaciones en el aula	106
▪ ¿A través de qué fases transcurre una investigación?	108
▪ ¿Cómo debe ser el guión de una investigación?	108
▪ ¿Cuántas sesiones son precisas?	112
El grado de apertura de una investigación	112
Factores que inciden en la dificultad de las investigaciones	115
La investigación sobre los trabajos prácticos en la última década	117
Bibliografía comentada	118

Parte II

6. La enseñanza y el aprendizaje de la biología, María Pilar Jiménez Aleixandre | 119

Las grandes preguntas de la biología	121
▪ ¿Qué es la vida? Vitalismo contra materialismo	122
▪ ¿Cuál es el origen de la vida? Creación y generación espontánea	124
▪ ¿Cuál es el origen de las especies? Fijismo y evolucionismo	125
▪ ¿Cómo se transmiten los caracteres de una generación a otra? Herencia continua o discontinua. ¿Cómo se desarrolla un individuo? Epigénesis o preformismo	127
▪ ¿Qué relaciones tienen los seres vivos entre sí y con su ambiente?	128
Métodos de investigación en biología: probabilismo, narración histórica	128
▪ Narración histórica y fenómenos únicos	129
▪ Pluralismo causal	129
▪ Azar y probabilidad	129
▪ El papel de los conceptos	130
El aprendizaje de la biología: desafíos en el aula de secundaria	130
▪ Los seres vivos	132
▪ Ecología y medio ambiente	135
La biología en el bachillerato: la era de Dolly	138
▪ El cambio biológico	138
▪ La manipulación genética	142

- 7. La enseñanza y el aprendizaje de la geología, Emilio Pedrinaci | 147**
- ¿Qué geología debe enseñarse en la educación secundaria? | 149
 - ¿Hacia dónde va la geología? | 149
 - ¿Cuáles son las preguntas clave? | 151
 - ¿Qué métodos de investigación utiliza para generar el conocimiento? | 153
 - ¿Cuáles son las afirmaciones clave que formula en respuesta a las preguntas clave? | 154
 - ¿Qué dificultades de aprendizaje presenta? | 156
 - Una Tierra dinámica | 157
 - Causalidad y cambios en la superficie terrestre | 158
 - El origen de las rocas | 158
 - Diversidad y amplitud de las escalas espaciales | 159
 - El concepto de tiempo geológico | 159
 - El concepto de interacción | 160
 - Secuencia de los contenidos geológicos | 160
 - Una secuencia para la ESO | 161
 - Una secuencia para el bachillerato | 163
 - La propuesta didáctica: algunos ejemplos | 164
 - ESO: el origen de las rocas sedimentarias | 165
 - El descubrimiento de la edad de la Tierra | 170
- 8. La enseñanza y el aprendizaje de la física, Antonio de Pro Bueno | 175**
- ¿Qué física debemos enseñar en la educación secundaria? | 176
 - ¿En qué ha trabajado la física en los últimos tiempos? | 177
 - ¿Qué conocimientos de física necesitan los ciudadanos? | 180
 - ¿Qué dificultades tienen los estudiantes en su aprendizaje de la física? | 181
 - ¿Cómo debemos organizar los contenidos? | 187
 - ¿Cómo podemos trabajar la física en el aula? | 193
 - ¿Cómo podemos trabajar en el aula el tema de los circuitos eléctricos? | 194
- 9. La enseñanza y el aprendizaje de la química, Aureli Caamaño | 203**
- ¿Qué química se ha enseñado en las últimas décadas y qué química convendría enseñar en secundaria? | 204
 - ¿Cuáles son las preguntas y los conceptos clave de la química? | 206
 - ¿Cómo podemos clasificar la diversidad de sistemas y cambios químicos que se presentan en la naturaleza? | 206
 - ¿Cómo está constituida la materia en su interior? | 207
 - ¿Qué relación existe en las propiedades de los materiales y su estructura, es decir, entre sus propiedades macroscópicas y las propiedades de las partículas que los constituyen? | 208
 - ¿Cómo transcurren las reacciones químicas? | 208
 - ¿Por qué ciertas sustancias muestran afinidad por otras? ¿Por qué ciertas reacciones tienen lugar de forma completa y otras se detienen antes de llegar a completarse? ¿Qué criterios rigen la espontaneidad de los cambios químicos? | 209
 - ¿Qué dificultades conceptuales presenta el aprendizaje de la química? | 212
 - Concepciones alternativas y dificultades conceptuales | 212
 - Causas de las concepciones alternativas y de las dificultades de aprendizaje | 215

▪ Dificultades intrínsecas de la química	216
▪ Dificultades relativas al pensamiento y la forma de razonamiento de los estudiantes	218
▪ Dificultades atribuibles al proceso de instrucción	220
▪ Implicaciones didácticas	220
Criterios para secuenciar los contenidos de química	221
Un ejemplo de secuencia didáctica a lo largo de la ESO y el bachillerato: el estudio de las reacciones ácido-base	223
▪ Ácidos y bases en la ESO	223
▪ Ácidos y bases en el primer curso de bachillerato	224
▪ Ácidos y bases en el segundo curso de bachillerato	226
Referencias bibliográficas	229

9

La enseñanza y el aprendizaje de la química

Aureli Caamaño

IES Barcelona-Congrés

S.G. Formación Permanente. Departamento de Educación. Generalitat de Catalunya

El currículo de química, igual que el de otras disciplinas científicas, ha sufrido en las últimas décadas cambios profundos para adecuarse, por un lado, a los nuevos objetivos de la enseñanza secundaria y, por otro, a los resultados de la investigación en didáctica de la química. Al abordar este capítulo dedicado a la enseñanza y el aprendizaje de la química hemos querido resaltar los cambios de orientación que se han venido produciendo en estos últimos años.

A lo largo de este capítulo abordaremos las cuestiones siguientes:

- *¿Qué química se ha enseñado en las últimas décadas y qué química convendría enseñar actualmente en secundaria?*

Se presenta una breve panorámica de la enseñanza de la química en los últimos años y se proponen los cambios que sería necesario introducir en el currículo de química actual.

- *¿Cuáles son las cuestiones y los contenidos clave de la química?*

Se exponen las preguntas fundamentales y los contenidos clave de conceptos, procedimientos y actitudes de la química que responden a estos interrogantes agrupados en varios bloques conceptuales.

- *¿Qué dificultades presenta el aprendizaje de la química?*

Se describen las dificultades de aprendizaje de la química tanto intrínsecas como relativas a las formas de pensamiento de los estudiantes y debidas al proceso de instrucción.

- *¿Qué criterios son útiles para secuenciar los contenidos de química?*

Se exponen algunos criterios generales y específicos adecuados para la secuenciación de los contenidos de química a lo largo de la educación secundaria.

- *¿Cuál puede ser una buena secuencia para el aprendizaje del tema de los ácidos y las bases en la ESO y en el bachillerato?*

Se propone, a título de ejemplo, una secuencia didáctica para el estudio de los ácidos y las bases, basada en la evolución histórica del conocimiento sobre ellos, desde las definiciones de tipo experimental hasta las teorías de Arrhenius y Brönsted y Lowry.

¿Qué química se ha enseñado en las últimas décadas y qué química convendría enseñar en secundaria?

La enseñanza de la química en la educación secundaria ha atravesado, como otras materias científicas, distintas etapas en lo referente a la formulación de sus finalidades, contenidos y métodos didácticos. En los años sesenta se centraba en el conocimiento de los elementos, los compuestos químicos y sus reacciones químicas, desde un punto de vista más descriptivo, y en la obtención y las aplicaciones de estas sustancias.

Los años setenta supusieron un cambio importante en el enfoque de esta enseñanza, al potenciarse los aspectos conceptuales de la química, y poner el énfasis en los principios químicos (estructura atómica y molecular, termoquímica, equilibrio químico, etc.) más que en las propiedades y reacciones concretas y en los procesos que conducen al conocimiento científico. Estos cambios pretendían mejorar la preparación científica de los estudiantes de ciencias para futuros estudios superiores. Desde el punto de vista didáctico implicaron una valoración de los procedimientos de la ciencia y del trabajo experimental, en el marco de una concepción didáctica de descubrimiento orientado, en el que se elaboraron proyectos anglosajones de gran importancia y difusión, como los proyectos estadounidenses Chemical Bond Approach (CBA), traducido con el título Sistemas Químicos (1966), y Chemistry-An experimental Science (CHEM), traducido como Química: una ciencia experimental (1972), y los proyectos ingleses de la fundación Nuffield: Curso Modelo de Química (1969-1973), para la secundaria obligatoria, y Química Avanzada Nuffield (1974-76), para el bachillerato. La difusión de estos proyectos tuvo gran influencia en los enfoques más innovadores para la enseñanza de la química en la década de los ochenta, y se convirtió en fuente de inspiración de proyectos autóctonos, como la Química Faraday (Grup Recerca-Faraday, 1988).

Con pequeños retoques, el sistema educativo español no varió su estructura desde la Ley General de Educación de los setenta hasta finales de la década de los ochenta. La enseñanza de la química mantuvo, en general, los mismos contenidos y orientación en segundo y tercero de BUP, como parte de la asignatura de física y química, y en la química del COU. Esta orientación estaba muy centrada en la preparación para la universidad, lo cual era evidente en la selección de contenidos del segundo de BUP.

El inicio de la reforma del sistema educativo abrió en la década de los noventa un periodo de renovación de los objetivos y contenidos de las ciencias de la naturaleza, y de la química en particular, en la enseñanza secundaria obligatoria (ESO) y el bachillerato. Una mayor atención a los aspectos procedimentales y una disminución de los aspectos más formales de muchos de los contenidos caracterizaron este periodo, juntamente con la elaboración de nuevos materiales y proyectos (*Alambique* 1994).

En los nuevos currículos de ciencias aparecieron bloques de contenidos dedicados a la comprensión de la naturaleza y los procedimientos de la ciencia, y a la introducción de contenidos de ciencia-tecnología-sociedad. En la química de la ESO, los nuevos programas y materiales curriculares incidieron más en los aspectos prácticos y funcionales de la química en la vida cotidiana y propusieron un abanico más amplio de acti-

vidades de aprendizaje. La introducción del estudio de los materiales (metales, cerámica, vidrio, polímeros, combustibles, etc.) es un ejemplo de este enfoque curricular que en determinados contenidos se sitúa en la interfase entre ciencia y tecnología.

En el bachillerato se adaptó y se experimentó uno de los proyectos anglosajones más novedosos para la enseñanza de la química desde una perspectiva CTS (ciencia, tecnología y sociedad), el *Salters Advanced Chemistry* (1994), cuya versión experimental fue publicada como *Química Salters* (Grupo Salters, 1999, 2000). Este proyecto estructura la química del bachillerato a través de una serie de relatos de química aplicada, química del medio ambiente, y química y sociedad, como la obtención de elementos químicos a partir de minerales, el desarrollo de combustibles, la revolución de los polímeros, la química de la atmósfera, la química de la agricultura, la química del acero y la química de los océanos.

La revisión de los currículos de la ESO y del bachillerato en 2001 ha supuesto un retroceso en lo que respecta a la modernización de los contenidos curriculares y a la consolidación de los enfoques CTS en la enseñanza de las ciencias (Pedrinaci y otros, 2002) y de la química en particular (Gómez Crespo, Gutiérrez, Martín-Díaz, 2002). A pesar de ello, su adaptación en algunas comunidades autónomas ha permitido mantener algunos de los avances conseguidos e incluso mejorar algunos aspectos. Sin embargo, el escaso tiempo dedicado a las ciencias y la falta de apoyo para la realización de clases prácticas y experimentales continúan lastrando la posibilidad de cambios más profundos. Por otro lado, la mayor optatividad de la asignatura de química en el bachillerato (sólo es obligatoria para el bachillerato de ciencias de la naturaleza y de la salud), la eliminación de materias optativas relacionadas con la química, y la disminución del número de estudiantes que escogen las asignaturas de física y de química (siguiendo una tendencia similar en toda Europa) están situando estas asignaturas en una situación crítica.

Ante esto la necesidad de replantearse los objetivos, los contenidos y las estrategias didácticas de la química en la ESO y especialmente en el bachillerato adquiere una urgencia evidente (Caamaño, 2001). En nuestra opinión este replanteamiento debe ir en la dirección opuesta a la emprendida en los decretos de 2001, es decir, ha de:

- Intentar consensuar los contenidos de conceptos y procedimientos más importantes, para poder aligerar el peso de los contenidos excesivamente formales de los programas.
- Poner mayor énfasis en la comprensión de los conceptos, en la elaboración de modelos, en la argumentación, en la experimentación y en la comunicación de las ideas por escrito y oralmente.
- Introducir con coherencia los aspectos prácticos, sociales y medioambientales de la química en la estructura de la asignatura.
- Potenciar los trabajos prácticos de carácter investigativo así como la introducción de las nuevas tecnologías en las aulas de química.

Todo ello acompañado de un mayor conocimiento sobre las dificultades de aprendizaje de los contenidos de la química y de un uso más eficaz de las estrategias didácticas y de los recursos disponibles para ayudar a superarlas, para conseguir de este modo una mejor comprensión de los principios básicos de la química, de sus apli-

caciones, y de su relación con otras ciencias y con la sociedad. En definitiva de lo que se trata es de contribuir desde la química a lograr una mejor cultura científica de los futuros ciudadanos.

¿Cuáles son las preguntas y los conceptos clave de la química?

La química es la rama de la ciencia que trata de la materia, de los cambios que experimenta y de las teorías que explican estos cambios. Su objetivo teórico principal es modelizar la estructura de las sustancias y de las reacciones químicas para poder así predecir el comportamiento de los sistemas químicos.

Pero la química también tiene una finalidad práctica, que es la obtención de nuevas sustancias y materiales para cubrir nuestras necesidades. Actualmente, estamos tan acostumbrados a vivir rodeados de tal cantidad de sustancias y materiales sintéticos, que fácilmente olvidamos que estas sustancias y materiales no existirían sin el conocimiento químico que ha hecho posible su obtención. En cierto modo podemos decir que la química trata del conocimiento de los elementos y compuestos químicos, de los materiales naturales y de la obtención de productos y materiales que no han existido antes. Estas nuevas sustancias y materiales, que van desde los plásticos y los detergentes hasta los anticonceptivos y los medicamentos contra el cáncer, tienen un gran impacto en nuestras vidas.

Una ciencia natural siempre busca clasificar el conocimiento sobre las cosas que se observan en la naturaleza y en el universo. Cada rama de la ciencia organiza un sinnúmero de hechos y de respuestas a las preguntas *¿cómo?* y *¿por qué?* ¿Cuáles son las preguntas clave a las que responde la química? A continuación comentaremos algunas de las más importantes, y los contenidos conceptuales a los que han dado lugar.

¿Cómo podemos clasificar la diversidad de sistemas y cambios químicos que se presentan en la naturaleza?

Ante la gran variedad de materiales presentes en la naturaleza, la química ha intentado desde sus inicios buscar criterios que permitieran reducir esta gran diversidad. La primera tarea fue diferenciar entre *mezcla* y *sustancia*. La conceptualización de *sustancia* como un tipo de materia con unas propiedades características determinadas fue posible gracias al perfeccionamiento de los métodos de separación, que tuvieron un gran desarrollo en la época de la alquimia.

Una de las ideas más fructíferas en los inicios de la química fue suponer que la gran diversidad de sustancias que se conocían estaban, de hecho, constituidas por la combinación de unos pocos elementos. La idea de *elemento químico* ha sufrido una evolución continuada a lo largo de la historia de la química desde las primeras definiciones de carácter experimental dadas por Boyle y Lavoisier, que la asociaron a la idea de *sustancia simple* que no puede descomponerse en otras más simples, hasta las ideas de Dalton y Mendeleiev, centradas en el sustrato atómico que permanecía en las reacciones químicas (Fernández, 1999).

Otra cuestión clave que apareció en el desarrollo de la química fue si los elementos químicos, cuando se combinan para formar un *compuesto*, lo podían hacer en cualquier proporción o si, por el contrario, siempre lo hacían en la misma proporción. Los químicos de finales del siglo XVIII, Bertholet y Proust, mantuvieron violentas discusiones acerca de esta cuestión. Proust defendía la composición fija de los compuestos y Bertholet, en cambio, afirmaba que un par de elementos se podían combinar en cualquier proporción. Este último citaba las aleaciones metálicas y la formación de los compuestos de plomo como evidencias de una variación continua en las proporciones de los componentes. Proust refutó los resultados de Bertholet considerando las aleaciones como disoluciones sólidas, y demostrando experimentalmente que la aparente variabilidad en la composición del óxido de plomo se debía a que en realidad se formaban dos óxidos, cada uno de ellos de proporciones constantes.

A medida que fueron descubriéndose nuevos elementos, los intentos de clasificarlos a partir de sus propiedades dieron lugar al establecimiento de la *tabla periódica*, uno de los grandes hitos en la historia de la química, como principio organizador de la diversidad de elementos químicos y de sus propiedades. El conocimiento de la variedad de *reacciones químicas* que presentaban las sustancias llevó también a intentar clasificarlas. La clasificación de las reacciones inorgánicas en reacciones de precipitación, ácido-base, redox y de formación de complejos es una de las más provechosas.

¿Cómo está constituida la materia en su interior?

La cuestión sobre la naturaleza continua o discontinua de la materia es una de las más antiguas de las planteadas en química. Demócrito y los epicúreos ya propusieron en Grecia, alrededor del año 400 a. C., la idea según la cual los cuerpos estaban formados por innumerables partículas indivisibles. A la escuela atomística se opuso la escuela filosófica que sostenía que la materia era continua. El gran sistematizador del saber antiguo, Aristóteles, fue un claro representante de esta escuela, cuya visión constituyó el único modelo aceptado por el pensamiento científico hasta el Renacimiento. En los siglos XVI y XVII se observa una reconsideración de las ideas atómicas y un deseo de explicar la naturaleza sobre bases mecánicas (Gassendi, Boyle, Newton). El establecimiento de una relación entre los conceptos de *elemento químico* y *átomo* está en la base de la teoría atómica enunciada por el químico inglés John Dalton en su tratado *Nuevo sistema de la filosofía química*, publicado en dos partes, en 1808 y 1810. El mérito de Dalton no fue proponer una idea original, sino formular claramente una serie de hipótesis concernientes a la naturaleza de los átomos que señalaban la masa como una de sus propiedades más fundamentales, y probar tales ideas mediante experimentos cuantitativos.

El proceso de modelización de la estructura interna de la materia se inicia en el marco de las ideas atómico-moleculares citadas y prosigue con teorías como la teoría cinético-molecular, la teoría iónica, los primeros modelos atómicos y la teoría cuántica del átomo y del enlace químico. La evolución de la teoría atómico-molecular es un magnífico ejemplo de cómo la química se ha ido planteando cuestiones clave sobre la estructura de la materia y les ha ido dando respuesta con la ayuda de nuevos conceptos modelos y teorías.

En este punto es útil diferenciar dos niveles de conocimiento de la materia (cuadro 1): el *nivel macroscópico* (el de la materia observable y sus cambios) y el *nivel microscópico* (el de las entidades materiales y sus interacciones). Un tercer nivel está constituido por el sistema representacional, es decir, el lenguaje químico que usamos para describir estos dos mundos, que incluye: términos conceptuales macroscópicos y microscópicos, símbolos y fórmulas químicas, ecuaciones químicas, diagramas, etc. Los sucesivos modelos sobre la estructura interior del átomo se sitúan en un subnivel atómico de conocimiento, que permite explicar la naturaleza del enlace químico en términos electrónicos.

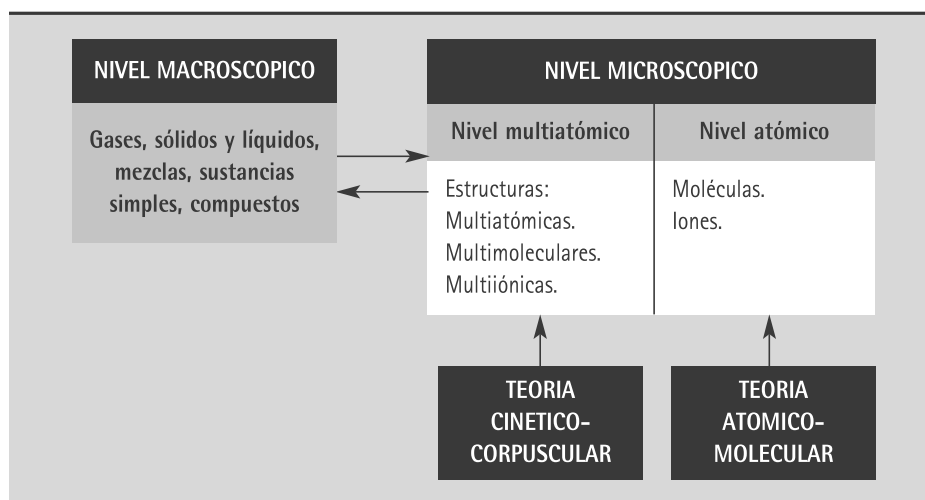
¿Qué relación existe en las propiedades de los materiales y su estructura, es decir, entre sus propiedades macroscópicas y las propiedades de las partículas que los constituyen?

La interpretación de las propiedades físicas de una sustancia requiere emitir hipótesis sobre su estructura en un nivel que podemos denominar *multiatómico*, *multimolecular* o *multiiónico*. Así, por ejemplo, las propiedades de los gases son interpretadas en el marco de la *teoría cinético-molecular*, que supone que están constituidos por un conjunto enorme de moléculas que se encuentran en constante movimiento. Y las propiedades de los sólidos se interpretan en función de la estructura y del tipo de *interacción* (*enlace metálico*, *covalente* o *iónico*, o *fuerza intermolecular*) que se establece entre sus partículas (*átomos*, *moléculas* o *iones*).

¿Cómo transcurren las reacciones químicas?

La comprensión del cambio químico se inicia con la diferenciación entre *sustancia simple* y *compuesto* y el establecimiento de la *ley de conservación de la masa* en las *reacciones químicas* por parte de Lavoisier. De acuerdo con esta visión una reacción química sería un proceso en el cual unas sustancias con determinadas propiedades se transforman en otras de naturaleza y propiedades diferentes. El establecimiento

Cuadro 1. Los niveles de la materia



de la teoría atómica de Dalton permitiría dar una interpretación atómica de las reacciones químicas acorde con la ley de conservación de la masa de Lavoisier y la ley de las proporciones constantes de Proust. De acuerdo con esta teoría, en las reacciones químicas los átomos ni se crean ni se destruyen, solamente cambia su distribución y pasan a formar parte de nuevas moléculas. Estos cambios estructurales implican la rotura de *enlaces* y la formación de nuevos enlaces. La intensidad de estos enlaces se relacionó posteriormente con la *energía de enlace*. Además de la interpretación de los aspectos materiales y energéticos de las reacciones químicas, podemos preguntarnos por el «mecanismo» a través del cual transcurren las reacciones, es decir, la sucesión de reacciones elementales a través de las cuales las moléculas de los reactivos se convierten en las moléculas de los productos. La rama de la química que aporta datos para responder a esta cuestión es la *cinética química*, que se centra en el estudio de la *velocidad* de las reacciones químicas y de las teorías que intentan explicar esta velocidad en términos atómicos: la teoría de colisiones y la teoría del estado de transición.

¿Por qué ciertas sustancias muestran afinidad por otras?

¿Por qué ciertas reacciones tienen lugar de forma completa

y otras se detienen antes de llegar a completarse?

¿Qué criterios rigen la espontaneidad de los cambios químicos?

La cuestión sobre la afinidad química, es decir, qué es lo que hace que ciertas sustancias tuvieran tendencia a reaccionar entre sí y otras no, fue tratada a lo largo de la historia de la química con diferentes enfoques. En un intento de cuantificar esta tendencia se procedió a medir las cantidades de reactivos que reaccionaban entre sí (lo que llevó al concepto de *equivalente químico* y más tarde al de *cantidad de sustancia*). El establecimiento de la ley de acción de masas en el contexto de las reacciones en equilibrio fue otro intento de dar respuesta a esta cuestión.

La teoría de Dalton explicaba de una forma simple la ley de las proporciones constantes de Proust y la ley de las proporciones múltiples. Quedaba por responder la pregunta: ¿por qué los átomos se combinan según relaciones determinadas? Por ejemplo, ¿por qué el cloro se combina con un solo átomo de hidrógeno y no forma, en cambio, moléculas tales como el H_2Cl o el H_3Cl ? Para abordar esta cuestión se introdujo el concepto de *valencia* o capacidad de combinación de los átomos, pero la pregunta no pudo responderse hasta que se desarrolló una teoría de *enlace químico*. Sin embargo, el concepto de *valencia* fue el primer paso hacia esta teoría y constituyó una propiedad decisiva, junto con la masa atómica relativa, para establecer la clasificación periódica de los elementos.

El descubrimiento de la pila de Volta y las experiencias de descomposición electrolítica de diferentes sustancias dieron un gran empuje al descubrimiento de nuevos elementos químicos y al desarrollo de teorías eléctricas sobre el enlace químico, es decir, sobre la naturaleza de las fuerzas que mantenían unidos a los átomos. Por otro lado dio origen al establecimiento del concepto de *ion* para explicar la electrólisis (Faraday). La formación de estos iones en disolución fue propuesta por el químico sueco Arrhenius en su famosa teoría de la disociación iónica, y fue la base de la comprensión de las reacciones iónicas en disolución acuosa: precipitación, ácido-base y redox.

Con la aparición de la *termodinámica* como ciencia en el siglo XIX se intentó un enfoque energético para responder a la cuestión de la afinidad química y de la espon-

taneidad de las reacciones químicas, tomando la *energía* desprendida en las reacciones químicas como una medida de la afinidad química de las sustancias y, por tanto, como un criterio de predicción de las reacciones que tienen lugar. Aunque este criterio no sea siempre válido, puede ser utilizado con una cierta seguridad en el caso de reacciones muy exotérmicas. Con la consolidación de la termodinámica como ciencia y la elaboración de los conceptos de *entropía* y *entalpía libre*, estas magnitudes pasaron a utilizarse como criterio para decidir sobre la espontaneidad de las reacciones químicas.

Por último, el descubrimiento del electrón y los estudios sobre la interacción entre la radiación electromagnética y la materia dieron lugar al establecimiento de la *teoría cuántica* sobre el átomo y el enlace químico, y permitieron volver a la cuestión de la afinidad química desde un punto de vista atómico, es decir, a través de la pregunta: ¿por qué se unen los átomos?

Las respuestas a las cuestiones clave planteadas y a algunas otras a lo largo de la historia han dado lugar a un cuerpo de conocimientos de química, que ha ido variando a lo largo de la historia, pero que se presenta en los currículos escolares como un conjunto de contenidos conceptuales y de procedimientos definitivo. El cuadro 2 recoge los *conceptos* clave de la química estudiados actualmente en secundaria.

Cuadro 2. Conceptos y teorías clave más importantes de la química en la enseñanza secundaria

CONCEPTOS Y TEORIAS CLAVE MAS IMPORTANTES DE LA QUIMICA
La materia desde el punto de vista macroscópico - Propiedades características de las sustancias, estados de agregación, cambios de fase. Mezclas, disoluciones y sustancias puras. Reacción química. Elementos y compuestos. Tabla periódica de los elementos. La materia desde el punto de vista microscópico - Teoría corpuscular de la materia. Átomos, moléculas e iones. Modelos atómicos. Enlace químico. Geometría molecular. Fuerzas intermoleculares. Interacción de la radiación electromagnética con los átomos y las moléculas. Relación entre los niveles macroscópico y microscópico de la materia - Cantidad de sustancia. Concentración. Estructura de gases, líquidos, sólidos y disoluciones. Leyes de los gases. Teoría cinético-molecular de los gases. Propiedades y estructura de sólidos metálicos, iónicos, covalentes y moleculares. Lenguaje químico - Fórmulas. Nomenclatura. Ecuaciones químicas. Diagramas. Reacción química - Características del cambio químico. Cálculos de cantidades en las reacciones. Energía de reacción y energía de enlace. Entropía, entalpía libre y espontaneidad de las reacciones químicas. Equilibrio químico. Velocidad y mecanismo de reacción. Teorías sobre la velocidad. Catálisis. Sustancias y tipos de reacciones químicas - Reacciones ácido-base. Reacciones de precipitación. Reacciones redox. Pilas electroquímicas y electrólisis. Reacciones de formación de complejos. Compuestos del carbono.

Además de los contenidos conceptuales, el currículo de química incluye contenidos de ciencia-tecnología-sociedad (CTS), procedimientos y actitudes. Los *contenidos CTS* del currículo de química responden a las siguientes cuestiones:

- ¿Cuál ha sido la evolución de los conceptos y las teorías más importantes de la química a lo largo de la historia?
- ¿Cuáles son las aplicaciones de la química más importantes en la actualidad?
- ¿Qué relaciones existen entre la química y la sociedad?
- ¿Qué relaciones existen entre la química y otras ciencias?

El cuadro 3 muestra algunos de los contenidos CTS del currículo de química de secundaria en forma de preguntas. Entre los contenidos de *procedimientos* cabe destacar los relativos al aprendizaje del uso de instrumentos de medida y técnicas de laboratorio, a la interpretación de experiencias, gráficos y datos, a la recogida de información, a la modelización de sistemas químicos, al cálculo con cantidades químicas, al diseño y la realización de investigaciones experimentales, y a la extracción y comunicación de conclusiones en la resolución de problemas teóricos y prácticos. Entre las *actitudes* cabe hacer mención a la incorporación de los valores y actitudes propios del trabajo científico y a las valoraciones éticas de la química y sus aplicaciones en la sociedad.

Cuadro 3. Contenidos CTS clave en el currículo de química

La naturaleza de la química ▪ ¿Cuál es la naturaleza de la química como ciencia? ▪ ¿Cuál es la génesis y evolución de los conceptos y teorías más importantes? ▪ ¿Qué papel han desempeñado los experimentos y las técnicas instrumentales en la evolución de la química? Química aplicada ▪ ¿Cuáles son las propiedades y las aplicaciones de los elementos y los compuestos de mayor importancia en la vida cotidiana? ▪ ¿Cómo podemos obtener los elementos químicos a partir de los minerales y otras materias primas? ▪ ¿Cuál es la aplicación de la química de los compuestos del carbono: plásticos, fibras, combustibles, fármacos, etc.? ▪ ¿Cómo se obtienen y qué aplicaciones tienen los materiales cerámicos, los polímeros, los metales y aleaciones, los tintes, las pinturas, etc.? Química y sociedad ▪ ¿Qué beneficios ha aportado la química a la sociedad? ▪ ¿Qué repercusiones medioambientales tiene la obtención de materias primas y la contaminación producida por la industria química? ▪ ¿Cuáles son los costes medioambientales del consumo energético de combustibles fósiles? Química y otras ciencias ▪ ¿Qué procesos químicos han intervenido en la formación y la evolución de la atmósfera, los océanos y la corteza terrestre? ▪ ¿Cuáles son los elementos y las moléculas que constituyen los seres vivos? ▪ ¿En qué consiste la ingeniería genética?

¿Qué dificultades conceptuales presenta el aprendizaje de la química?

Las dificultades en el aprendizaje de los conceptos químicos se ponen de manifiesto en la existencia de un gran número de *concepciones alternativas* de los estudiantes, que han sido ampliamente estudiadas. Los resultados de estas investigaciones se recogen en diferentes trabajos de recopilación: Driver, Guesne y Tiberghien, 1989; Llorens, 1991; Pozo y otros, 1991; Driver y otros, 1994; Garnett y otros, 1995; Gómez Crespo, 1996; Pozo y Gómez Crespo, 1998; Furió, Azcona y Guisasola, 2000.

Concepciones alternativas y dificultades conceptuales

En los cuadros 4, 5, 6 y 7 se resumen algunas de las concepciones alternativas y dificultades conceptuales más importantes investigadas y algunos de los trabajos publicados en nuestro país relativos a estas dificultades y a las estrategias didácticas para superarlas.

Las concepciones descritas se han agrupado atendiendo a su relación con:

- La materia desde el punto de vista macroscópico y microscópico (cuadro 4).
- El lenguaje químico: fórmulas, ecuaciones químicas, etc. (cuadro 5).
- Características de las reacciones químicas: calor de reacción, equilibrio químico y velocidad de reacción (cuadro 6).
- Las reacciones químicas (ácido-base, redox) y los procesos electroquímicos (pilas y células electrolíticas) (cuadro 7).

Cuadro 4. Algunas de las dificultades y concepciones alternativas en química relativas a la materia desde el punto de vista macroscópico y microscópico.

CONCEPCIONES ALTERNATIVAS Y DIFICULTADES CONCEPTUALES: MATERIA	
La materia desde el punto de vista macroscópico	
Sustancias y mezclas ▪ Dificultad para diferenciar mezcla y compuesto. ▪ Dificultad para diferenciar elemento y sustancia pura.	▪ Garnett y otros, 1995
Estados y cambio de fase ▪ Los gases no tienen masa. ▪ Cuando un líquido hierve, las burbujas son del aire que escapa.	▪ Driver y otros, 1989 ▪ Pozo y otros, 1991
Reacción química ▪ Ausencia de distinción entre cambio físico y químico. ▪ Falta de comprensión de la conservación de la masa.	▪ Borsese y Esteban, 1988 ▪ Oñorbe y Sánchez, 1992

La materia desde el punto de vista microscópico	
Teoría corpuscular de la materia ▪ Concepción continua de la materia. ▪ Una partícula es una pequeña porción visible de una sustancia. ▪ Modelos atómicos alternativos. ▪ Atribución de propiedades macroscópicas a las partículas. ▪ Atribución de una estructura molecular a todos los compuestos. ▪ Atribución de una estructura atómica a todos los elementos. ▪ Concepciones alternativas sobre la estructura de los electrolitos.	▪ Grup Recerca, 1981 ▪ Llorens, 1991 ▪ Driver y otros, 1989 ▪ Caamaño y otros, 1983 ▪ Caamaño, 1994 ▪ Gómez Crespo, 1996 ▪ Valcárcel, Sánchez y Ruiz, 2000 ▪ Benarroch, 2001
Enlace químico: covalente, iónico, metálico y fuerzas moleculares ▪ Los átomos se unen para completar a ocho la última capa de electrones (visión finalista). ▪ Ausencia de distinción entre enlace covalente e iónico. ▪ Polaridad del enlace: las cargas parciales de los átomos son cargas iónicas.	▪ Caamaño, 1994 ▪ Posada, 1999 ▪ Posada y Conejo, 2000
Las partículas en los cambios de fases ▪ Las moléculas cambian de volumen en los cambios de fase. ▪ Los enlaces entre los átomos de las moléculas se rompen.	▪ Lloréns, 1991 ▪ Gómez Crespo, 1996 ▪ Garnett y otros, 1995
Relación entre los niveles macroscópico y microscópico	
Cantidad de sustancia ▪ Dificultades para comprender y utilizar el concepto de cantidad de sustancia. ▪ Confusión entre cantidad de sustancia y masa molar (1 mol de C= 12 g).	▪ Grupo Alkali, 1990 ▪ Furió, Azcona y Guisasaola, 1999, 2002 ▪ Garritz y otros, 2002
Estructura de los gases, sólidos y líquidos ▪ Los átomos o moléculas de un sólido no se mueven. ▪ Dificultad en aceptar el espacio vacío entre partículas. ▪ Confusión entre las fuerzas intermoleculares y los enlaces intramoleculares en un sólido. ▪ Visión molecular de una estructura gigante iónica o covalente.	▪ Posada, 1993 ▪ Caamaño, 1994 ▪ Gómez Crespo, 1996 ▪ Pietro y Blanco, 2000 ▪ Prieto, Blanco y González, 2000 ▪ Garnett y otros, 1995 ▪ Benarroch, 2000 y 2001 ▪ Sanmartí y Solsona, 2001

Cuadro 5. Algunas de las dificultades y concepciones alternativas en química relativas al lenguaje químico

CONCEPCIONES ALTERNATIVAS Y DIFICULTADES CONCEPTUALES: LENGUAJE QUIMICO	
Fórmulas químicas - Los subíndices de las fórmulas moleculares de los elementos (O_2) no dan idea de una estructura molecular (O_2 se confunde con 2 átomos de oxígeno, 2O). - Los subíndices de las fórmulas son confundidos con las valencias. Ajuste e interpretación de ecuaciones químicas - Los subíndices de las fórmulas son modificados con objeto de igualar las ecuaciones químicas. - Los coeficientes estequiométricos no son comprendidos como una relación numérica entre las moléculas de las especies que reaccionan.	- Pozo y otros, 1991 - Caamaño, 1994, 1998 - Pozo y otros, 1991 - Garnett y otros, 1995

Cuadro 6. Algunas de las dificultades y concepciones alternativas en química relativas a las características de las reacciones químicas

CONCEPCIONES ALTERNATIVAS Y DIFICULTADES CONCEPTUALES: REACCION QUIMICA	
Interpretación molecular de una reacción química - Falta de comprensión de la conservación de los elementos en las reacciones y de una reacción química a nivel molecular. Calor de reacción - Entalpía de enlace: la formación de los enlaces requiere energía, y la rotura de enlaces supone desprendimiento de energía. - Entalpía de reacción: falta de comprensión de la entalpía de una reacción en función de la energía absorbida y desprendida en la rotura y la formación de enlaces. Equilibrio químico - El equilibrio químico no es un proceso dinámico. - Confusión entre cantidad de sustancia y concentración en la expresión de la constante. - El principio de Le Chatelier es aplicado a equilibrios heterogéneos sin consideración de las fases de los reactivos y productos. - Un catalizador puede afectar de manera diferente las velocidades de reacción en los sentidos directo e inverso y, en consecuencia, modificar el estado de equilibrio. Velocidad de reacción - La reacción en sentido inverso no comienza hasta que ha finalizado la reacción en sentido directo. - Los «mecanismos» de reacción no implican rotura de enlaces.	- Solsona e Izquierdo, 1998 - Martín del Pozo, 1988 - Caamaño, 1994 - Garnett y otros, 1995 - Quílez, 1993 y 1998 - Pozo y otros, 1991 - Garnett y otros, 1995

Cuadro 7. Algunas de las dificultades y concepciones alternativas en química relativas a las reacciones químicas y los procesos electroquímicos

CONCEPCIONES ALTERNATIVAS Y DIFICULTADES CONCEPTUALES TIPOS DE REACCIONES	
Ácidos y bases - Confusión entre los modelos de Arrhenius y de Brönsted y Lowry de ácido y de base. - Las bases no contienen hidrógeno. - El ácido conjugado de una base débil es un ácido fuerte, y viceversa. - Cuando los ácidos y las bases reaccionan siempre dan lugar a una disolución neutra. Oxidación-reducción - El estado de oxidación de un elemento es siempre igual a la carga del ion monoatómico de dicho elemento. - Los procesos de oxidación y reducción pueden ocurrir independientemente. Pilas - El ánodo está cargado positivamente porque pierde electrones; el cátodo es negativo porque gana electrones. - En una pila el puente salino proporciona electrones para completar el circuito. Células electrolíticas - La polaridad de los terminales no tiene efecto en cuál es el ánodo y el cátodo. En la superficie de los electrodos inertes no ocurre ninguna reacción. - No hay relación entre la fem de una pila y la magnitud del voltaje necesario para producir la electrólisis.	- Jiménez y otros, 2002 - Jiménez, Manuel y Salinas, 2002 - Barcenas, Calatayud y Furió, 1997 - Peña y Caamaño, 2002 - Garnett y otros, 1995 - Garnett y otros, 1995 - Garnett y otros, 1995

Causas de las concepciones alternativas y de las dificultades de aprendizaje

Las concepciones alternativas y las dificultades de aprendizaje pueden atribuirse a:

- Dificultades intrínsecas de la propia disciplina.
- El pensamiento y los procesos de razonamiento de los estudiantes.
- El proceso de instrucción recibido.

A continuación analizaremos brevemente cada una de ellas y aportaremos ejemplos procedentes, en su mayor parte, de una investigación sobre las concepciones de los estudiantes en relación la estructura de la materia y el cambio químico y la comprensión de sus formas de representación (Caamaño, 1994).

Dificultades intrínsecas de la química

El cuadro 8 resume algunas causas intrínsecas de las dificultades de aprendizaje de la química, en buena medida también presentes en las demás ciencias.

Existencia de tres niveles de descripción de la materia

Una de las dificultades conceptuales de la química es la existencia de tres niveles de descripción de la materia: macroscópico (observacional), microscópico (atómico-molecular) y representacional (símbolos, fórmulas, ecuaciones). Aún es posible distinguir un nivel intermedio multiatómico, multimolecular o multiiónico, que es el que relaciona el nivel atómico con el macroscópico (Caamaño y Casassas, 1993) y un subnivel atómico, cuando abordamos la estructura interior del átomo. Los estudiantes deben moverse entre estos niveles mediante el uso de un lenguaje que no siempre diferencia de forma explícita el nivel en que nos encontramos.

Carácter evolutivo de los modelos y teorías. Uso de diferentes modelos y teorías en el aprendizaje escolar

Otra dificultad proviene de la necesidad de usar modelos con grados de sofisticación creciente y diferentes teorías para una misma área conceptual en el aprendizaje de la química. Ello conduce a *la necesidad de realizar sucesivos procesos de integración y diferenciación conceptual* a lo largo del aprendizaje escolar.

Algunas de las teorías o modelos que obligan a realizar estos procesos son: la teoría corpuscular, la teoría atómico-molecular, el concepto de estructura gigante, la teoría iónica, la teoría cinético-molecular de los gases, los modelos atómicos, los modelos de enlace, las teorías de ácido y de base, las teorías de oxidación-reducción, y las teorías sobre la velocidad de las reacciones químicas elementales.

Ambigüedad del lenguaje respecto de los niveles descriptivos

Existen términos, como el de *elemento químico*, que tienen un significado diferente según se utilice en el nivel macroscópico o microscópico.

Cuadro 8. Dificultades de aprendizaje intrínsecas de la química

DIFICULTADES DE APRENDIZAJE INTRINSECAS DE LA QUIMICA
▪ Existencia de tres niveles de descripción de la materia. ▪ Carácter evolutivo de los modelos y teorías. ▪ Ambigüedad y limitaciones del lenguaje químico: términos, símbolos, fórmulas y representaciones gráficas. – Ambigüedad del lenguaje químico respecto de los niveles descriptivos. – Ausencia de términos apropiados para un nivel estructural determinado. – Términos y fórmulas químicas con significados múltiples o indeterminados. – Términos cuyo significado varía según el contexto teórico en el que se enmarcan. – Términos con significado diferente en la vida cotidiana y en química. – Limitaciones de los códigos representativos de los diagramas y modelos estructurales.

Imaginemos, por ejemplo, qué significado puede atribuir un estudiante a la frase siguiente: «El agua es un compuesto formado por el elemento hidrógeno y el elemento oxígeno». La frase no es incorrecta, pero su interpretación correcta depende del significado que atribuyamos al término *elemento*: si pensamos en él como sinónimo de 'sustancia simple' (significado utilizado en la mayoría de los libros de texto al tratar de la clasificación de la materia), la frase no sería bien comprendida, equivaldría a suponer que el agua es una mezcla de hidrógeno gas y de oxígeno gas. Por el contrario, si pensamos en *elemento* como sinónimo de 'átomo', la frase puede ser interpretada correctamente: el agua está formada por átomos de oxígeno y de hidrógeno. Lo que no dice, pero debe suponerse para una interpretación totalmente correcta, es que estos átomos se encuentran unidos en la proporción 2:1, formando moléculas de agua. Así pues la comprensión total del significado de la frase requiere una serie de conocimientos previos que no siempre tienen los estudiantes.

Ausencia del término apropiado para un nivel estructural determinado

En otras ocasiones el problema proviene del hecho de que no disponemos de un término adecuado para un nivel estructural determinado. Por ejemplo, hablamos de moléculas de agua, pero, ¿cómo podemos referirnos de forma sintética a la entidad microscópica representada por la fórmula NaCl ? Podemos decir que se trata del par de iones Na^+Cl^- que forman parte de la estructura multiiónica del cloruro de sodio, pero es evidente que es una denominación demasiado larga. El mismo problema terminológico surge frente a la interpretación microscópica de la fórmula SiO_2 . Se ha sugerido el nombre de *unidad-fórmula*, aunque su uso no se encuentra del todo extendido y, por otro lado, este término soslaya la interpretación estructural.

La mayoría de veces el profesorado evita este problema terminológico leyendo literalmente la fórmula o bien refiriéndose a la sustancia en lugar de la entidad microscópica. Por ejemplo, al describir la reacción de formación del cloruro de sodio a nivel atómico $\text{Cl}_2 + \text{Na} \rightarrow \text{NaCl}$ se suele decir: «Una molécula de cloro reacciona con un átomo de sodio para dar NaCl » o «Una molécula de cloro reacciona con un átomo de sodio para dar cloruro de sodio». En el primer caso se elude el nombre de la entidad NaCl ; en el segundo, se realiza un cambio de nivel descriptivo, y se pasa del nivel atómico al nivel macroscópico. Estos cambios de nivel descriptivo en la lectura de ecuaciones químicas son muy habituales y son una de las causas de la tendencia a atribuir carácter molecular a todas las fórmulas.

Términos y fórmulas químicas con significados múltiples o indeterminados

Ya hemos visto el significado ambivalente del término *elemento*. Las fórmulas químicas presentan significados muy diferentes según se trate de fórmulas moleculares de elementos, fórmulas moleculares de compuestos, fórmulas de estructuras gigantes o fórmulas empíricas. Lo mismo ocurre, por ejemplo, con el concepto de *número de oxidación*.

La fórmula de un elemento molecular $-\text{O}_2-$ o de un compuesto molecular, H_2O , nos está indicando el número de átomos de la molécula, mientras que la fórmula de un compuesto con estructura gigante $-\text{NaCl}$, SiO_2- sólo nos indica la proporción en

que se encuentran los átomos. Del mismo modo, la fórmula empírica de un compuesto molecular sólo indica la composición atómica del compuesto (por ejemplo, CH, fórmula empírica del C₆H₆), aunque a veces pueda coincidir con la fórmula molecular (por ejemplo, H₂O).

Términos cuyo significado varía según el contexto teórico en el que se enmarcan

Existe un conjunto de términos cuyo significado varía según el contexto teórico. Por ejemplo, el diferente significado de los términos *ácido* y *base*, según se utilicen con referencia a una definición empírica (propiedades), a la teoría de Arrhenius o a la teoría de Brønsted y Lowry. Estos significados se desarrollan con detalle en el último apartado de este capítulo.

Términos con significado diferente en la vida cotidiana y en química

El término *sustancia*, que en la vida cotidiana se utiliza a veces tanto para designar una sustancia pura como una mezcla o una disolución, tiene en química un significado más restrictivo. Por ejemplo, se dice que el aire o la leche son sustancias, cuando en realidad se trata de una mezcla y de una dispersión, respectivamente, desde el punto de vista químico.

El adjetivo *puro* también es utilizado con diferente significado en el contexto cotidiano y en el científico. Por ejemplo, el término *puro* se usa en el lenguaje corriente con el significado de 'producto de procedencia natural' (un zumo puro), mientras que en química significa 'una única sustancia'.

Limitaciones de los códigos representativos de los diagramas y modelos estructurales

Por último, debemos señalar los problemas de representación en los diagramas y los modelos estructurales, que conllevan dificultades de interpretación. La diversidad de representaciones que se utilizan (círculos o bolas en contacto, círculos unidos por rayas, modelos de bolas con palos, redes cristalinas con varillas de soporte, etc.) también puede crear confusiones.

Dificultades relativas al pensamiento y la forma de razonamiento de los estudiantes

Algunas de las causas de la formación de concepciones alternativas ligadas a las formas de pensamiento y al razonamiento de los estudiantes se muestran en el cuadro 9.

La influencia de la percepción macroscópica en el análisis del mundo microscópico

Dicha influencia explicaría la resistencia a aceptar el carácter corpuscular de la materia y la existencia de espacio vacío entre las partículas por parte de los estudiantes de primeros cursos de secundaria, lo cual entra en contradicción con su percepción continua de la materia.

La tendencia a transferir las propiedades macroscópicas de las sustancias a las propiedades microscópicas de las partículas

Por ejemplo, los estudiantes explican la dilatación térmica de los gases como

Cuadro 9. Dificultades de aprendizaje de la química relativas al pensamiento y forma de razonamiento de los estudiantes

DIFICULTADES DE APRENDIZAJE DE QUÍMICA RELATIVAS AL PENSAMIENTO Y LA FORMA DE RAZONAMIENTO DE LOS ESTUDIANTES
▪ Influencia de la percepción macroscópica en el análisis del mundo microscópico. ▪ Tendencia a transferir las propiedades macroscópicas de las sustancias a las propiedades microscópicas de las partículas. ▪ Tendencia a utilizar explicaciones metafísicas o teleológicas en lugar de explicaciones físicas. ▪ Uso del pensamiento analógico en forma superficial. ▪ Dificultad de transferir un concepto a un contexto distinto de aquél en el que se ha aprendido. ▪ Dificultad de comprensión de procesos que exigen ser pensados a través de una serie de etapas. ▪ Construcción de modelos híbridos alternativos.

consecuencia de la dilatación de las moléculas o bien por el ascenso de las moléculas como consecuencia del aumento de la temperatura. La no fluidez de los sólidos se explica por la inmovilidad total de sus partículas. La dureza del diamante se atribuye a la dureza de sus átomos.

La tendencia a utilizar explicaciones metafísicas de tipo teleológico o finalista en lugar de explicaciones físicas

Por ejemplo, se observan explicaciones de carácter finalista como las siguientes: «Las reacciones tienen lugar *para* que los productos sean más estables o tengan menos energía». «Los átomos reaccionan *para* conseguir que su última capa tenga ocho electrones».

El uso superficial del pensamiento analógico

El pensamiento analógico es una de las formas en que los estudiantes pueden comprender los nuevos conceptos introducidos en las clases de química, sobre todo en los conceptos de los que no se poseen concepciones previas. Sin embargo, también es utilizado a veces por los estudiantes de forma superficial con el resultado de la formación de concepciones alternativas.

Es el caso, por ejemplo, de la idea que el HCl(g) está formado por iones porque la disolución lo está; la idea que la valencia de un elemento molecular (O_2 , P_4) viene indicada por el subíndice como ocurre con los subíndices de los átomos adyacentes en las fórmulas de algunos compuestos (CH_4); o la idea que NaCl y SiO_2 son moléculas porque tienen fórmulas similares al HCl i el H_2O , que representan moléculas.

La dificultad de transferir un concepto a un contexto distinto del contexto en el que se ha aprendido

Hay alumnos que utilizan el concepto de ion sólo en el estudio de los electrolitos, pero no lo relacionan con el enlace iónico en los sólidos. Otros no utilizan espontáneamente el modelo cinético-molecular de los gases para explicar cómo se rompen los enlaces de las moléculas en una reacción entre gases.

La dificultad de comprensión de procesos que exigen ser pensados mediante una serie de etapas

Ante estos procesos muchos estudiantes simplifican la situación dando más importancia a una de las etapas. Por ejemplo, al imaginarse el «mecanismo» de una reacción centran su atención exclusivamente en la formación de nuevos enlaces, sin tener en cuenta la rotura de los enlaces de las moléculas que reaccionan. Lo mismo se observa cuando intentan predecir la energía de una reacción en función de la energía de los enlaces formados y rotos.

La modificación de las características de los modelos frente a hechos que no pueden explicar

Por ejemplo, la facilidad con que se disuelve el cloruro de sodio en agua es interpretado por algunos estudiantes atribuyendo un carácter débil al enlace iónico, sin tener en cuenta las fuerzas de atracción entre los iones y las moléculas de agua, es decir, el proceso de solvatación de los iones que se disocian.

La construcción de modelos híbridos alternativos

A menudo los estudiantes modifican los modelos que se les presentan para hacerlos compatibles con sus ideas previas o, simplemente, como consecuencia del hecho de incorporar características de otros modelos, construyendo modelos híbridos.

Así, por ejemplo, la visión de la estructura de un gas o de un líquido como un medio continuo en el que se encuentran inmersas las moléculas (modelo híbrido continuo-molecular de la materia).

Otros presentan una visión «molecular» de representaciones multiatómicas de NaCl o de SiO₂, como consecuencia de ver «parejas» de átomos dentro de la estructura ininterrumpida de átomos (modelo híbrido de estructura gigante-molecular).

Dificultades atribuibles al proceso de instrucción

El cuadro 10 muestra las dificultades de aprendizaje de la química atribuibles al proceso de instrucción.

Implicaciones didácticas

Comprender la naturaleza y las causas de las concepciones alternativas de los estudiantes de química es un requisito necesario, aunque no suficiente, para conseguir una enseñanza de la química más efectiva y un mejor aprendizaje de los estudiantes.

El otro aspecto importante tiene que ver con adoptar estrategias didácticas que tengan presentes las dificultades de aprendizaje descritas e intenten facilitar la superación de las mismas. Entre ellas pueden citarse:

- Una presentación evolutiva de conceptos, teorías y modelos.
- Una contextualización de los conceptos en relación con el campo experimental en que se construyen y se cuantifican.
- Una adecuada secuenciación de los conceptos (algunos de los criterios para conseguirlo se exponen en el siguiente apartado).

Cuadro 10. Dificultades de aprendizaje de química atribuibles al proceso de instrucción

DIFICULTADES DE APRENDIZAJE DE QUIMICA ATRIBUIBLES AL PROCESO DE INSTRUCCION
▪ Presentación de forma acabada de los conceptos y teorías. ▪ Presentación de teorías híbridas en los libros de texto (por ejemplo, solapamiento de las teorías de colisiones y del estado de transición). ▪ Presentación de los conceptos en un contexto reduccionista de su significado. ▪ No explicitación de los diferentes niveles de formulación de los conceptos. ▪ Atención insuficiente a los aspectos estructurales de la materia, en especial, del nivel multiatómico, multimolecular o multiiónico. Por ejemplo, el enlace iónico es explicado únicamente a nivel atómico (proceso de cesión y captación de un electrón, sin tener en cuenta la atracción entre iones). ▪ Uso inapropiado del lenguaje, sin explicitar sus limitaciones y ambigüedades. ▪ Utilización de ejemplos sesgados que pueden llevar a conclusiones erróneas cuando son generalizados. ▪ Utilización de códigos de representación gráfica con significado ambiguo. ▪ Uso frecuente de actividades basadas en algoritmos que no buscan la comprensión de los conceptos o procesos sino su aplicación mecánica. ▪ Uso de criterios de secuenciación inadecuados.

- Un uso apropiado del lenguaje, que haga explícito el significado de los términos y sus limitaciones.
- Una interpretación correcta de los códigos de representación del lenguaje simbólico y de los diagramas estructurales.

Para ampliar el conocimiento sobre las estrategias didácticas que se han propuesto para superar las concepciones alternativas, pueden consultarse los trabajos de diversos autores publicados en libros o revistas españolas, que se encuentran citados en el inicio de este apartado y en los cuadros 4, 5, 6 y 7, así como diversos monográficos de la revista *Alambique* (1997, 1999, 2000).

Criterios para secuenciar los contenidos de química

Para secuenciar los contenidos hay que realizar previamente una selección adecuada de los mismos, teniendo en cuenta su importancia en la estructura lógica de la disciplina, su potencial explicativo, su nivel de complejidad y su relevancia funcional y social. La importancia de una acertada secuenciación de los contenidos en el aprendizaje de las ciencias ha sido señalada por diversos autores (Pedrinaci y Carmen, 1997; Caamaño, 1997; Martín, Gómez y Gutiérrez, 2000), que han propuesto diversos criterios de secuenciación. En la reforma de 1990 la secuenciación de los contenidos en cada nivel o etapa de la educación secundaria se consideró responsabilidad de los equipos de profesores, lo que originó una diversidad de secuenciaciones en los libros de texto y en los proyectos curriculares. Los nuevos decretos de 2001 han vuel-

to a fijar los contenidos por curso, dejando un margen muy estrecho para la experimentación de secuencias alternativas.

Son criterios generales de secuenciación:

- La elección de un contenido organizador, que pueden ser los conceptos, los procedimientos o los contenidos CTS.
- La definición de las preguntas clave e ideas-eje en torno a las cuales estructurar la secuencia.
- El respeto a la estructura conceptual de la propia disciplina.
- La adecuación a la capacidad cognitiva de los alumnos.
- La consideración de los requisitos, es decir, los conceptos previos necesarios para poder comprender un concepto más complejo.
- La atención a los conocimientos previos (conceptos, procedimientos y actitudes) de los estudiantes.
- El desarrollo continuado y progresivo de las ideas desde lo cualitativo a lo cuantitativo y de lo más simple a lo más complejo.

Además de estos criterios generales, existen otros criterios específicos ligados a la *lógica con que quieren ser expuestos los contenidos*. Se observan dos opciones antagónicas en el desarrollo del currículo: elaborar secuencias que presenten los conceptos ya elaborados, sin relación con los problemas que los suscitaron, o bien decantarse por secuencias que potencien la comprensión del proceso de aparición y elaboración de los conceptos.

En el campo de la química, ambas opciones implican elegir entre iniciar la química con el estudio del mundo microscópico (átomos, configuración electrónica de los átomos, moléculas, enlace químico, etc.) y avanzar desde el nivel microscópico al macroscópico o, por el contrario, dar prioridad al mundo macroscópico e introducir progresivamente el mundo microscópico como consecuencia de las hipótesis y teorías que se construyen para interpretarlo.

Si se escoge la segunda opción, el conocimiento de la evolución histórica de los conceptos puede ser de gran ayuda para establecer el hilo conductor de la secuencia (secuenciación histórico-conceptual). Ésta fue la opción seguida en el proyecto Química Faraday (Grup Recerca-Faraday, 1988). Así pues, una orientación que intenta justificar la razón de ser de los conceptos nos lleva a una secuencia parcialmente análoga a la evolución histórica de conceptos. Esta orientación no ha de suponer un enfoque historicista rígido, puesto que se pretende aprender los conceptos desde una perspectiva evolutiva, no la historia exacta de su evolución. Lo importante es situar los conceptos con relación al problema que dio lugar a su aparición.

Otro criterio importante en la secuenciación es el denominado *principio del currículo en espiral*. De acuerdo con este criterio es conveniente retomar los conceptos básicos de una disciplina a lo largo de los diferentes cursos de cada etapa educativa, de manera que puedan ser revisados por estudiantes con niveles de capacidad cognitiva y de conocimientos cada vez mayores. Por una parte, permite graduar su aprendizaje comenzando con los aspectos más cualitativos y simples, para ir incorporando progresivamente aspectos más formales y cuantitativos. Por otra, permite aumentar el significado de los conceptos al poder relacionarlos con otras ideas y conceptos apren-

didos en la misma u otras materias. Este criterio choca muchas veces en la práctica con la falta de tiempo para desarrollar los programas, por lo que a menudo el profesorado prefiere iniciar y finalizar bloques conceptuales en un único curso.

Por último, debemos destacar que, a pesar de que la secuenciación basada en los conceptos es la más usual, también son posibles otros tipos de secuenciaciones basadas, por ejemplo, en las aplicaciones de la química o en los contenidos CTS (ciencia-tecnología-sociedad) de química. La Química Salters (Grupo Salters, 1999) secuencia los contenidos de química del bachillerato con relación a una serie de relatos que abordan aspectos de química aplicada y de química y sociedad. En este caso el orden con que son aprendidos los conceptos está subordinado a los temas que se abordan en los relatos, aunque siempre tienen en cuenta los conocimientos conceptuales adquiridos por los estudiantes en las unidades anteriores.

Así pues, son posibles distintas formas de secuenciar los contenidos de química: secuenciación de carácter conceptual, de carácter histórico-conceptual, de carácter mixto conceptual-CTS y a través de los contenidos CTS (Caamaño, 1997). Dado el gran número de criterios que hay que tener en cuenta es evidente que la secuenciación es más un arte que una ciencia. Por eso sorprende que las secuenciaciones de los libros de texto no sean más variadas. El peso de la tradición escolar impide muchas veces explorar las ventajas que podrían tener otro tipo de secuenciaciones en los cursos de química.

Un ejemplo de secuencia didáctica a lo largo de la ESO y el bachillerato: el estudio de las reacciones ácido-base

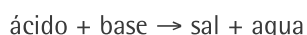
Ácidos y bases en la ESO

El estudio de las sustancias ácidas y bases y de las reacciones de neutralización se inicia en la etapa de la ESO desde un punto de vista básicamente fenomenológico, es decir, como aprendizaje de las *propiedades experimentales* que caracterizan a los ácidos y las bases, entre ellas la propiedad de conducir la corriente en disolución acuosa (son electrólitos) y la capacidad de neutralizarse cuando reaccionan entre ellos en cantidades adecuadas.

Entre las propiedades características de los ácidos se encuentra el sabor ácido, la reacción con algunos metales –desprendiendo hidrógeno–, la reacción con los carbonatos –desprendiendo dióxido de carbono–, y la coloración comunicada a sustancias de origen vegetal que se denominan *indicadores*. Entre las propiedades características de las bases se encuentra el sabor amargo, el tacto resbaladizo, el poder de corrosión, y la capacidad de colorear los indicadores con un color diferente al de los ácidos. Varios trabajos que han investigado sobre el conocimiento de los estudiantes de estas edades sobre las propiedades de los ácidos y de las bases, destacan que las propiedades de los ácidos son más conocidas que las de las bases.

El término *álcali* es más antiguo que el término *base* y significa 'base soluble'. Así pues, no todas las bases son álcalis, pero todos los álcalis son bases. En la secuenciación de estos conceptos parece lógico comenzar por el concepto de álcali (ya que corresponde a las bases solubles, que son las que se pueden caracterizar más fácilmente con un indicador), para ampliarlo posteriormente al de base.

La *reacción de los ácidos y de las bases* conduce a la formación de sales, de acuerdo con el siguiente esquema de reacción:



Una *sal* se define entonces como una sustancia obtenida en la reacción de un ácido con una base. El cloruro de sodio es una sal, pero también lo es el carbonato de sodio o de calcio.

Observamos, en consecuencia, que estas definiciones de base y de sal no son del todo excluyentes, puesto que los carbonatos son a la vez sales y bases.

Por otro lado, en la ESO también se acostumbra a introducir el concepto de *pH* como una escala numérica, unida a una escala de colores del indicador universal, que nos permite cuantificar el grado de acidez de una disolución.

La reacción entre un ácido y una base, aunque sea en proporciones estequiométricas, no conduce siempre a una disolución neutra, como ocurre, por ejemplo, cuando reaccionan el ácido acético y el hidróxido de sodio. La disolución de acetato de sodio que se obtiene es ligeramente básica. Es importante destacar este hecho para evitar la confusión que puede crear la utilización generalizada del término *reacción de neutralización* para describir cualquier tipo de reacción ácido-base.

Otro objetivo que se debería alcanzar en la ESO es el conocimiento del carácter ácido o básico de las sustancias o disoluciones de uso cotidiano más utilizadas, así como sus aplicaciones. Por ejemplo, conocer el carácter ácido del vinagre, del sulfamán y de la aspirina; y el carácter básico de la sal de frutas, de los antiácidos y de los limpiadores de hornos. Estudios recientes (Bárcenas, Calatayud y Furió, 1999; Jiménez y otros, 2000; Peña y Caamaño, 2002) revelan que los estudiantes tienen un escaso conocimiento sobre el carácter ácido o básico de las sustancias cotidianas.

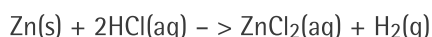
Por último, los estudiantes de la ESO deberían conocer el riesgo que supone la utilización de disoluciones ácidas o básicas concentradas, especialmente de *ácidos y bases fuertes*, y cómo deben manipularse y gestionarse sus residuos.

Ácidos y bases en el primer curso de bachillerato

En este curso se puede retomar el tema de los ácidos y de las bases con un mayor conocimiento de la estructura conceptual de la química, a partir del conocimiento de la composición química de muchas sustancias (óxidos, hidróxidos, cloruros, carbonatos, etc.) y de su estructura (molecular, iónica, etc.), y de la capacidad de expresar la composición de las sustancias y las reacciones químicas mediante fórmulas y ecuaciones químicas, así como la habilidad de realizar cálculos estequiométricos sencillos, después de haber sido introducido el concepto de *mol*.

La pregunta acerca de lo que es un ácido, y posteriormente de lo que es una base, puede ahora abordarse de forma conceptual, es decir, emitiendo alguna hipótesis sobre lo que caracteriza la composición o la estructura de las sustancias ácidas. En este punto el conocimiento de la historia de la evolución de las teorías sobre los ácidos y las bases puede ser de utilidad para el profesorado. Una de las primeras teorías sobre lo que son los ácidos fue propuesta por Antoine Lavoisier, al percatarse de que las disoluciones de óxidos de no metales presentaban propiedades básicas (óxido de azufre, dióxido de carbono, óxido de fósforo, etc.). Lavoisier propuso entonces la idea de que toda sustancia ácida lo era por el hecho de contener oxígeno (de ahí que sugiriera el término *oxígeno* para el gas que había sido descubierto recientemente por Priestley: el vocablo *oxígeno* significa 'generador de ácidos'). Sin embargo, más adelante cuando se conoció la composición del ácido muriático (el ácido clorhídrico) se vio que no contenía oxígeno y, por tanto, tuvo que descartarse esta teoría. A medida que los químicos tuvieron un mayor conocimiento de las fórmulas de los ácidos se dieron cuenta de que todos ellos contenían hidrógeno (HCl, HNO₃, H₂SO₄, etc.); aunque existían otros compuestos que también contenían hidrógeno y, sin embargo, no eran ácidos (por ejemplo, el agua o el azúcar).

Así pues, para que la teoría del hidrógeno tuviera carácter predictivo era necesario que estableciera alguna distinción entre el hidrógeno de los ácidos y el de otros compuestos. Esta distinción fue apreciada por el químico alemán Liebig, que en 1838 sugirió que un *ácido* es una sustancia molecular que contiene hidrógenos que pueden ser reemplazados por metales. La reacción de un ácido con un metal como el cinc sería un ejemplo de esta propiedad de los hidrógenos ácidos:



Con todo, la teoría de Liebig no explicaba por qué unos átomos de hidrógeno eran reemplazables y otros no, ni por qué las características ácidas sólo se mostraban cuando el compuesto estaba en disolución.

Una de las propiedades comunes de los ácidos y de las bases es que presentan conductividad eléctrica en disolución (son electrólitos). La explicación de este hecho hay que buscarla en la existencia de iones en disolución. Esta hipótesis fue lanzada por primera vez en 1884 por el químico sueco Svante Arrhenius, que definió un *ácido* como una sustancia que en disolución acuosa se disocia dando iones hidrógeno; y definió una *base*, como una sustancia que en disolución acuosa se disocia dando iones hidróxido. Así pues, Arrhenius asocia las propiedades de los ácidos a la presencia de iones H⁺, y las propiedades de los álcalis a la presencia de iones OH⁻. Esta hipótesis fue establecida en el marco de una teoría más general, la *teoría de la disociación iónica*, según la cual los electrólitos se disociaban parcialmente en iones al disolverse en agua.

Observemos como una adecuada comprensión de la teoría de Arrhenius requiere haber estudiado previamente la teoría de la disociación iónica, como hipótesis explicativa de las propiedades de los electrólitos (es decir, el estudio de las disoluciones iónicas). Lo cual a su vez nos lleva a plantearnos cuál es el origen de estos iones: ¿siempre se producen como consecuencia de una disociación de los compuestos mo-

leculares, como creía Arrhenius, o bien existen también compuestos en estado sólido formados por iones? (Grup Recerca, 1983).

Esta cuestión puede conducirnos a la introducción de los *sólidos iónicos*, cuya existencia no fue comprobada hasta 1912 mediante estudios de difracción de rayos X de las redes cristalinas del cloruro de sodio. La existencia de electrolitos moleculares (HCl) e iónicos (NaCl) justifica diferenciar entre los procesos de disolución de ambos tipos de electrolitos: *disociación* (proceso de separación de iones que ya existían, como en el caso del NaCl) e *ionización* (formación de iones donde no existían, como en el caso del HCl). Aunque el término *disociación* engloba a ambos conceptos, puesto que una ionización implica a la vez una disociación, no siempre se hace explícita la diferencia de significado de ambos términos y, de hecho, se acostumbra a hablar indistintamente de disociación.

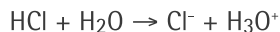
Ácidos y bases en el segundo curso de bachillerato

En el segundo curso de bachillerato se aborda de nuevo el tema de los ácidos y de las bases desde el punto de vista de la teoría de Brönsted y Lowry. Se adopta un enfoque cuantitativo, mediante el cálculo de la concentración de iones hidrógeno en las disociaciones completas de los ácidos y bases fuertes, y en las disociaciones parciales de los ácidos y bases débiles, lo que requiere haber estudiado previamente el equilibrio químico. Como no podemos abordar todos estos aspectos, nos centraremos en la presentación de la teoría de Brönsted y Lowry y en las dificultades que el cambio de teoría, de la de Arrhenius a la de Brönsted-Lowry, puede significar para los estudiantes.

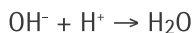
El conocimiento de la estructura electrónica de los átomos y la conceptualización del enlace químico covalente en las moléculas como una compartición de electrones de valencia permitió visualizar los procesos de disociación de las moléculas de los electrolitos desde el punto de vista electrónico y sugerir la existencia del ion hidrógeno, H_3O^+ , como consecuencia del enlace de un ion hidrógeno y una molécula de agua:



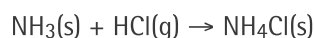
Desde este punto de vista, en la disociación del HCl en agua, el agua deja de ser vista únicamente como el disolvente y pasa a ser considerada un reactivo que acepta el ion hidrógeno o protón que es cedido por la molécula de HCl:



En 1923 el químico danés Johannes Brönsted y el químico inglés Martin Lowry formulan una nueva teoría sobre los ácidos y las bases, según la cual un *ácido* es una especie química capaz de ceder protones a otra; y una *base* es una especie química capaz de aceptar protones de otra. Así, el ion OH^- es una base de B-L porque puede aceptar un protón:



La nueva teoría permite considerar como bases sustancias que no lo eran desde el punto de vista de la teoría de Arrhenius porque no contenían iones OH^- en su composición, pero que en cambio presentaban propiedades características de las bases, como el amoníaco (NH_3), el óxido de bario (BaO) y el carbonato de sodio (Na_2CO_3). E igualmente pueden considerarse reacciones ácido-base, reacciones que no pasan en disolución acuosa, como por ejemplo:



Pero la nueva teoría no es tan sólo una mera ampliación de los conceptos de *ácido* y de *base* de Arrhenius, sino que supone de hecho una nueva definición de lo que consideramos ácidos y bases. Observemos que en la definición se habla de especies químicas y no de sustancias, de modo, que por ejemplo, desde el punto de vista de la teoría de B-L, el NaOH es una sustancia básica porque contiene iones OH^- , que es realmente la especie química que es la auténtica base de B-L. Lo mismo pasa con el óxido de bario (la base es el ion óxido, O^{2-}) y los carbonatos (la base es el ion carbonato, CO_3^{2-}). Dicho de otra forma, en la teoría de B-L los ácidos y las bases no son las sustancias, sino las moléculas o los iones. La definición de ácido y de base de Brönsted y Lowry se sitúa en el nivel microscópico, mientras que las definiciones de la teoría de Arrhenius se sitúan en el nivel macroscópico.

Lo dicho hasta aquí es suficiente para prever las dificultades que se generan en los estudiantes en el paso de una a otra teoría, máxime teniendo en cuenta que se solapan con los mismos términos tres conceptos distintos: ácido y base desde el punto de vista macroscópico de las propiedades, ácido y base desde el punto de vista macroscópico de Arrhenius (restringido a los ácidos y bases que se disuelven en agua), y ácido y base de B-L de carácter microscópico (sin restricción a los procesos en disolución acuosa, aunque se aplique en el bachillerato únicamente en ese entorno, con excepción del ejemplo de la reacción de formación del NH_4Cl). Estudios recientes (Peña y Caamaño, 2002) muestran que los estudiantes construyen modelos híbridos de ácido y base, que tiende a mezclar indiscriminadamente términos y expresiones (*ceder, captar, tener, no tener, dar, etc.*) de una y otra teoría, y que estas definiciones híbridas se encuentran también en los libros de texto.

De hecho, la teoría de Arrhenius muchas veces se acaba presentando o utilizando mediante una formulación de ácido y base ampliada, que permite considerar como bases de Arrhenius al NH_3 , el CaO y el Na_2CO_3 . El *quid* de la cuestión se encuentra en hacer desaparecer u ocultar en la definición la referencia al proceso de disociación. De este modo un *ácido* es una sustancia que en disolución da iones H^+ , y una *base* es una sustancia que en disolución acuosa da iones OH^- . Desde este punto de vista, el NH_3 puede ser considerada una base de Arrhenius porque, aunque no contenga iones OH^- en su composición y, por tanto, no se pueda disociar, reacciona con el agua y da lugar a iones OH^- .

La introducción de los conceptos de *ácido* y de *base conjugada*, la identificación de ácidos y bases fuertes, y de ácidos y bases débiles, y la predicción cualitativa del carácter relativa de la fuerza de ácidos y bases conjugadas son algunos de los aspectos de la teoría de B-L, que se consideran adecuados para ser tratados previamente a la formalización de estas cuestiones a través de la introducción de las

constantes de acidez y de basicidad y del tratamiento cuantitativo del equilibrio químico ácido-base. La conveniencia de este tratamiento de las reacciones ácido-base en dos fases, una más conceptual y cualitativa, y una segunda más formal y cuantitativa, ha sido resaltada por varios autores. Desgraciadamente no siempre se hace así, ni se dedica a las teorías ácido-base de Arrhenius y de Brönsted-Lowry el tiempo necesario para comprender su carácter diferenciado y sus limitaciones.

La secuencia propuesta hasta aquí muestra dos aspectos citados anteriormente:

- La importancia de una presentación evolutiva de los conceptos y teorías de la química, para comprender el porqué de la construcción de dichos conceptos y teorías, las limitaciones de estas teorías y los cambios de teorías producidos con posterioridad.
- La influencia que esta presentación progresiva de los conceptos y teorías debería tener sobre la secuenciación de los contenidos a lo largo de los cursos y las etapas «educativas».