

L'ensenyament del concepte *element químic* i de la taula periòdica a l'educació secundària

Teaching the concept *chemical element* and the periodic table in secondary education

Aureli Caamaño / Societat Catalana de Química

Fina Guitart / Departament d'Educació. CESIRE / Societat Catalana de Química

Pere Grapí / Societat Catalana de Química / Societat Catalana d'Història de la Ciència i de la Tècnica



resum

Els conceptes *substància elemental*, *compost*, *element químic* i *lleis periòdiques* constitueixen termes fonamentals del currículum de química de l'educació secundària. En el present article, abordem el significat d'aquests conceptes, fem algunes consideracions sobre la seva evolució històrica, considerem els enfocaments més habituals per al seu ensenyament, fem una revisió bibliogràfica sobre la investigació i les propostes didàctiques que s'han fet en les últimes dècades i, finalment, proposem un procés modelitzador de les nocions *substància elemental*, *element* i *taula periòdica* que en té en compte l'evolució històrica i els diferents nivells de conceptualització.

paraules clau

Element químic, substància elemental, lleis periòdiques, taula periòdica, propietats periòdiques.

abstract

The concepts *elemental substance*, *compound*, *chemical element* and *periodic law* constitute fundamental concepts of the chemistry curriculum of secondary education. In this article, we approach the meaning of these concepts, we make some considerations about their historical evolution, we consider the most common approaches to their teaching, we do a bibliographic review on the research and the didactic proposals that have been made in the last decades and, lastly, we propose a modeling process of the concepts *elemental substance*, *element* and *periodic table* which takes into account its historical evolution and the different levels of conceptualization.

keywords

Chemical element, elemental substance, periodic law, periodic table, periodic properties.

Element químic:

un terme polisèmic

El terme *element* procedeix de la traducció llatina de la paraula grega στοιχείον (*stoicheion*), de la qual Benjamin Richter va derivar, a final del segle XVIII, el mot *estequiometria*, per designar la mesura dels elements. Al llarg dels segles, el concepte *element químic* ha anat canviant de significat i encara avui en té un de polisèmic. Diferents autors han tractat aquesta polisè-

mia (Roundy, 1989; Fernández, 1999; Linares, 2004; Nelson, 2006; Mans, 2009; Scerri, 2012; Caamaño, 2015). El terme s'usa actualment amb un doble significat, que es manifesta en la definició que dona la IUPAC d'*element químic* al *Gold book*:

1. Una classe d'àtoms; tots els àtoms tenen el mateix

nombre de protons al nucli atòmic.

2. Una substància química pura composta d'àtoms amb el mateix nombre de protons al nucli atòmic. De vegades, aquest concepte es denomina *substància elemental* [...].

La primera definició fa referència a un significat submicroscòpic, en parlar d'«una classe d'àtoms», i té un caràcter abstracte, tal com argumentarem a continuació. La segona definició té un caràcter macroscòpic i concret, ja que es refereix a una «substància elemental» amb unes propietats determinades.

L'element com a classe d'àtoms

Un «element» és una classe d'àtoms amb el mateix nombre atòmic, és a dir, amb el mateix nombre de protons al nucli atòmic. La idea d'una classe d'àtoms és un «concepte abstracte». En general, no parlem d'un únic àtom, sinó d'un conjunt d'àtoms o ions que tenen en comú el mateix nombre de protons al nucli. El símbol d'un element (per exemple, H) representa alhora aquest concepte abstracte d'*element* i un sol àtom d'hidrogen; per representar l'ió d'un element, utilitzem el símbol de l'element i hi afegim en superíndex la càrrega de l'ió, o més exactament el «nombre de càrrega» (per exemple, H^+ per a l'ió hidrogen i H^- per a l'ió hidrur).

Ara bé, ens podríem preguntar quants àtoms o ions d'un element hi ha d'haver per poder parlar d'aquest element. Un de sol és suficient, però, en general, quan parlem d'un element, no ho fem d'un sol àtom, ja que en aquest cas ens referiríem a aquesta entitat com l'àtom o l'ió monoatòmic d'un element determinat, sinó que ens referim a un conjunt molt gran d'àtoms que tenen un determinat nombre de protons al nucli atòmic.

Aquests àtoms normalment estan units entre si formant molècules o estructures gegants. Segons si són àtoms del mateix o de diferents elements, donen lloc a substàncies elementals o a compostos. Per tant, l'element no és generalment una classe d'àtoms aïllats, sinó àtoms units a altres àtoms formant molècules,

estructures atòmiques gegants, o bé ions monoatòmics units a ions de càrrega oposada formant estructures gegants iòniques.

Quan diem que l'aigua està formada pels elements oxigen i hidrogen, utilitzem el concepte submicroscòpic d'*element*. Evidentment, un expert no interpreta que s'estigui dient que l'aigua està formada per hidrogen gas i oxigen gas. L'element hidrogen i l'element oxigen es troben a l'aigua en forma d'àtoms combinats entre si. El que no es pot deduir de la frase és la manera en què es troben units aquests àtoms. En aquest cas, ho fan formant molècules H_2O .

Quan els àtoms d'un element es combinen amb els del mateix element o d'un altre, la seva perifèria electrònica es modifica. Però, en qualsevol cas, es considera que totes les entitats submicroscòpiques (àtoms lliures, àtoms que formen part de molècules i àtoms o ions que formen part d'estructures gegants) corresponen a un mateix element si tenen el mateix nombre de protons al nucli. Per exemple, els àtoms Fe que formen el Fe(g) a altes temperatures; els ions Fe^{2+} que formen l'estructura gegant del ferro metàl·lic, Fe(s); els ions Fe^{2+} que formen l'estructura gegant iònica de clorur de ferro(II) ($FeCl_2(s)$), o els ions $Fe^{2+}(aq)$ que formen part de la solució aquosa de clorur de ferro(II) són tots l'element ferro. El fet que una tal varietat de partícules submicroscòpiques sigui designada pel mateix terme deixa ben clar el caràcter abstracte del concepte.

Però la causa de la varietat de partícules que poden correspondre a un mateix element no queda reduïda a les modificacions de la perifèria electrònica dels àtoms. Els àtoms d'un element a la natura són, en realitat, una mescla d'àtoms que tenen el mateix nombre atòmic (el mateix nombre de protons al nucli) però

una massa atòmica diferent, perquè tenen un nombre de neutrons al nucli diferent. Els àtoms amb una massa diferent però el mateix nombre atòmic s'anomenen isòtops, i tots es consideren el mateix element. Per exemple, l'hidrogen és una mescla isotòpica de 1H , 2H (D), 3H (T), sent el 1H el que es troba amb més proporció; d'altra banda, l'oxigen és una mescla isotòpica de ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , sent el ^{16}O el que es troba amb més proporció. Quan aquests isòtops de l'hidrogen i de l'oxigen es combinen, donen lloc a molècules de massa diferent, per exemple, H_2O i D_2O (aigua pesada). Així, doncs, per exemple, 1H , 2H (D), 3H (T) i els ions corresponents són el mateix element, malgrat tenir un nombre de neutrons al nucli diferent i, en el cas dels ions, un nombre d'electrons diferent.

L'existència d'isòtops i el fet que l'abundància o la composició isotòpica sigui constant a la natura fan que els pesos atòmics dels elements, que es van prendre inicialment com la característica identificadora d'aquests, siguin en realitat una massa atòmica mitjana. Això també explica que aquests pesos atòmics, originalment masses atòmiques relatives a la massa de l'àtom d'hidrogen, no siguin nombres enters, com alguns químics esperaven que serien, ja que suposaven que els àtoms dels diferents elements podien tenir una estructura interna formada per àtoms d'hidrogen. Per exemple, el pes atòmic o massa atòmica relativa del clor (35,5) és la massa atòmica mitjana dels dos isòtops estables que formen part del clor a la natura, ^{35}Cl i ^{37}Cl , amb una abundància del 75,5 % i del 24,5 %, respectivament.

L'element com a substància elemental

En el nivell macroscòpic, el terme *element* es fa servir a

vegades per designar el que més apropiadament s'ha de dir *substància elemental* i que històricament es va anomenar *substància simple* o *cos simple*. De fet, la utilització del terme *element* per designar una substància elemental depèn de l'àmbit lingüístic. Mentre que en els sistemes educatius hispanoparlants i angloparlants s'acostuma a utilitzar el terme *element* per designar una substància elemental, en el sistema francès d'educació, la noció d'*element* en denota el sentit metafísic o abstracte, i es parla de *corps simple* per designar el concepte *substància simple*.

A França distingeixen entre *corps simple moléculaire* (O_2 , N_2 , O_3 , etc.) i *corps simple élémentaire* (He, Fe, C(diamant), etc.), segons si es tracta d'una substància simple formada per molècules o per àtoms.

Una substància elemental es caracteritza pel fet d'estar formada per àtoms del mateix nombre atòmic, però això no vol dir que les partícules constituents hagin de ser àtoms lliures: poden ser molècules o àtoms que formen part d'estructures gegants atòmiques. Un mateix element pot presentar estructures moleculars o multiatòmiques diferents, la qual cosa donarà lloc a substàncies elementals diferents que s'anomenen *formes al·lotròpiques* o *al·lotrops*. Per exemple, l'oxigen es pot presentar en forma de dioxigen, $O_2(g)$, o en forma d'ozó(g), $O_3(g)$, que són dues substàncies elementals amb estructures moleculars diferents i, per tant, amb propietats també diferents. D'altra banda, el carboni es pot presentar en forma de C(diamant), C(grafit), fullerenes o nanotubs; totes aquestes substàncies estan constituïdes pel mateix element (en la concepció submicroscòpica), però tenen estructures multiatòmiques o moleculars diferents i propietats també diferents i, per tant, són substàncies elementals diferents.

Hi ha elements sòlids que poden presentar formes cristal·lines diferents, com ara l'estany blanc i l'estany gris. Aquestes formes cristal·lines diferents s'anomenen *formes polimorfes* o *polimorfs* i el fenomen, *polimorfisme*, i també el poden presentar els compostos. L'al·lotropia dels elements inclou el polimorfisme.

Origen i evolució del concepte element químic

La dualitat actual de significat del terme *element* té causes històriques. El concepte ha anat variant al llarg del temps (Leicester, 1967; Bensaude-Vincent, 1994; Brock, 1998; Fernández, 1999; García Belmar i Bertomeu Sánchez, 1999, p. 52-53; Geoffroy, 2012, p. 16-36). Per als primers filòsofs grecs, el concepte *element* era un principi fonamental del qual derivaven tots els cossos. Empèdocles va proposar la teoria dels quatre elements fonamentals: terra, aire, foc i aigua. Segons Demòcrit, aquests elements estaven formats per àtoms en moviment perpetu, que diferien en mida, forma, pes i calor, i que es movien a l'atzar en el buit. Plató va acceptar els quatre elements d'Empèdocles i atorgà als àtoms formes geomètriques limitades per cares planes. Aquesta idea, tot i ser incorrecta, va ser l'origen d'una altra de fecunda: que les propietats macroscòpiques de les substàncies estan determinades per les estructures dels components microscòpics dels quals estan formades. Aristòtil va acceptar la idea dels quatre elements, però no l'existència dels àtoms. Els elements podien combinar-se en qualsevol proporció per formar els diferents cossos.

La teoria dels quatre elements d'Aristòtil sobre la constitució de la matèria va ser la que més empremta va deixar en l'imaginari dels químics, atès que va

perdurar en la base teòrica de la química fins a final del segle XVIII. A les acaballes d'aquest segle, les especulacions sobre els constituents últims de la matèria van acabar sent considerades una tasca banal i merament metafísica. En aquest context, Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) va abanderar l'alternativa d'una concepció estrictament operativa dels elements-principis constituents dels cossos. Per a Lavoisier, la química era una ciència de l'anàlisi i el concepte *substància o cos simple* en va ser la noció clau. Però aquest concepte bàsic es va definir en termes purament negatius, com el d'un cos indescomponible fins a aleshores. L'objectiu era realitzar les anàlisis necessàries fins a arribar als cossos més simples possibles. Però, d'altra banda, Lavoisier va generar una certa ambigüitat entre els termes *element* i *cos simple* en afirmar que, si s'assimilaven els elements d'un cos amb la idea de l'últim estadi al qual es pot arribar mitjançant l'anàlisi, llavors totes les substàncies que fins a aleshores no s'havien pogut descompondre per qualsevol mitjà serien considerades elements. Mentre el concepte *element* es caracteritzés pel criteri negatiu de ser indescomponible, no es podria veure com una entitat individual i causa de les propietats específiques i permanents de tots els cossos químics (Bensaude-Vincent, 1986, p. 12).

El 1808, John Dalton (1766-1844) va publicar, en la primera part del llibre *A new system of chemical philosophy*, les seves idees sobre la constitució de la matèria. Va suposar que cada element consistia en un tipus particular d'àtom i va intentar estimar-ne els pesos relatius. Els àtoms de Dalton, més que unitats mínimes de composició de la matèria, eren unitats mínimes de combinació (fig. 1). Però les idees de Dalton no

van aconseguir una acceptació general. Molts químics pensaven que no tenia sentit aventurar-se en un territori inaccessible a l'experiència per explicar les relacions ponderals de combinació. La situació no es va clarificar fins al congrés internacional de química de Karlsruhe del 1860, que va acabar sense cap acord sobre el problema de les masses atòmiques i moleculars. Es va distribuir l'article del 1858 de Stanislao Cannizzaro, en què va utilitzar un treball anterior d'Amedeo Avogadro i que va influir en els assistents, entre els quals hi havia Lothar Meyer i Mendeléiev, que després elaborarien la taula periòdica.

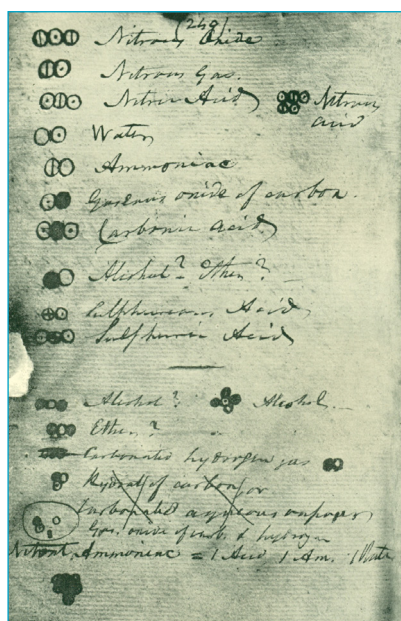


Figura 1. Fórmules de compostos mostrant els símbols de les seves ultimíssimes partícules (àtoms). Entrada en el quadern de laboratori de Dalton (6 de setembre de 1803).

Dmitri Mendeléiev (1834-1907) va revertir la situació en proposar un criteri positiu de l'element químic que va superar com a principi explicatiu el de cos/substància simple de Lavoisier. L'element químic de Mendeléiev, a diferència del cos/substància simple, era una abstracció mental i, al mateix temps, una entitat material latent tant en el cos simple com en el

compost que es mobilitza i es conserva en els canvis químics (Bensaude-Vincent, 1998, p. 517). De fet, l'escriptura d'una equació química és una visualització de la persistència dels elements durant el canvi químic.

Amb el descobriment dels isòtops a principi del segle xx, va semblar que es produïa una multiplicació d'elements, però el radioquímic austríac Fritz Paneth (1887-1958) va reconceptualitzar l'element abstracte de Mendeléiev com una «substància bàsica». Paneth va considerar que el descobriment de nous isòtops representava el descobriment de nous elements com a substàncies simples, però que el sistema periòdic de Mendeléiev es basava en elements com a «substàncies bàsiques». Sobre la base dels treballs de Paneth, la IUPAC va modificar, el 1923, la propietat essencial de l'element del pes atòmic al nombre atòmic.

Així, doncs, en l'evolució històrica del concepte *element* des de Lavoisier fins a l'actualitat, podem caracteritzar diverses conceptualitzacions: element com a substància simple (que actualment anomenem *substància elemental*); element com a àtom indivisible amb una massa atòmica determinada (Dalton); element com a entitat material latent en les substàncies simples i els compostos que s'intercanvia i es conserva en els canvis químics (Mendeléiev), i element com a classe d'àtoms amb un nombre atòmic determinat.

Origen i evolució de la taula periòdica dels elements

Sobre l'origen i l'evolució de la taula periòdica, podeu consultar un ampli ventall d'articles, llibres i monografies: Bensaude-Vincent, 1998; Brock, 1998; Esteban, 2009; Román Polo, 2002a; Román Polo, 2002b; Román Polo, 2019; Mendeléiev, 2008; Mendeléiev, 2019;

Scerri, 1998; Scerri, 2007; Scerri, 2008; Scerri, 2013; Scerri, 2019; Bertomeu Sánchez, 2019.

En el segle XIX, el descobriment de cada cop més elements va fer necessari pensar en algun tipus de classificació. Alguns químics van optar per agrupar els elements (substàncies elementals) segons propietats similars i van intentar veure si hi havia alguna relació entre els seus pesos atòmics; d'altres, com Meyer i Mendeléiev, van tractar d'ordenar-los pels pesos atòmics i van descobrir que les seves propietats variaven de forma periòdica.

Julius Lothar Meyer (1830-1895) va ser el primer a elaborar una taula periòdica, però no la va publicar fins al 1870 (fig. 2). La classificació dels elements de Mendeléiev (1834-1907) va sorgir en el context de l'ensenyament de la química a la Universitat de Sant Petersburg, quan Mendeléiev va començar a escriure el segon volum del llibre *Principis de química*, el febrer de 1869 (fig. 3). Va ser en aquestes circumstàncies que es va materialitzar la proposta de classificar els elements fins aleshores coneguts a partir de dos criteris: l'ordre creixent de pesos atòmics i la regularitat d'algunes propietats dels elements i de les seves combinacions, com ara la temperatura de fusió i la composició i l'acidesa dels seus òxids. El 1869, Mendeléiev encara no es referia a la seva classificació com a *taula*, sinó com a *sistema*, sense qualificar-lo de *periòdic*. No va ser fins al 1871 que Mendeléiev va publicar una versió ampliada (en alemany) de la taula, en què, per primera vegada, es feia referència a una «lei periòdica dels elements», la qual cosa expressava l'existència d'una dependència o relació entre les propietats i els pesos atòmics d'aquests (Mendeléiev, 2008, p. 15):

Jo descriu com a llei periòdica les relacions mútues, a desenvolupar posteriorment, de les propietats dels elements amb llurs pesos atòmics, les quals són aplicables a tots els elements; aquestes relacions tenen la forma d'una funció periòdica.

La compressió filosòfica de la naturalesa dels elements de Mendeléiev li donà una visió de futur que el portà a fer prediccions d'elements no coneguts encara, així com a situar alguns elements de manera anòmala respecte al seu pes atòmic. Una de les prediccions encertades de Mendeléiev va ser l'element que va anomenar *eka-silici* (situat sota el silici), que resultà ser l'anomenat *germani*, del qual n'havia predit correctament gairebé totes les propietats. Un exemple d'anomalia és el cas de la inversió del tel·luri i el iode, en situar abans el tel·luri amb l'argument desencertat que els seus pesos atòmics havien estat calculats incorrectament (Scerri, 2013).

La «lleï periòdica» va convertir la taula de Mendeléiev en un

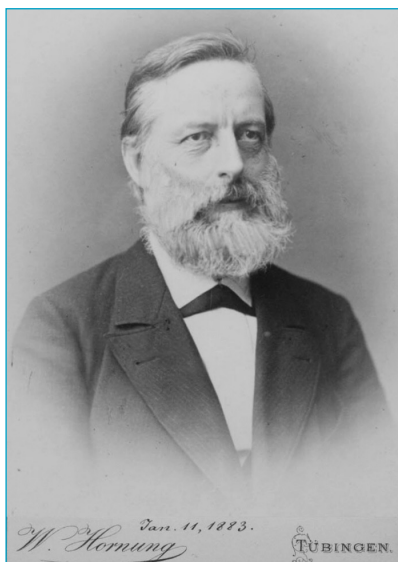


Figura 2. Julius Lothar Meyer (1830-1895).

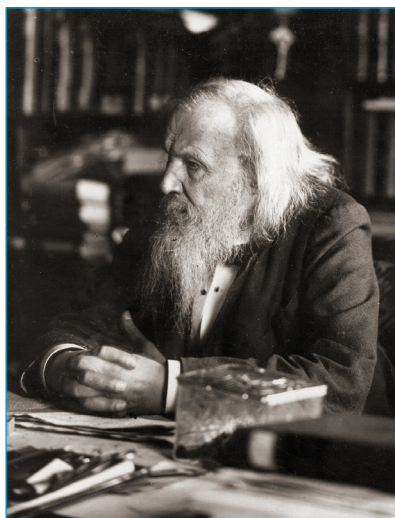


Figura 3. Dmitri Ivànovitx Mendeléiev (1834-1907).

veritable model científic. Entre els diferents trets que caracteritzen els models científics, n'hi ha dos que la taula-model de Mendeléiev va subscriure amb escreix: fer prediccions i resoldre anomalies.

Podem veure que l'establiment de la taula periòdica per part de Meyer i Mendeléiev va implicar, des d'una perspectiva conceptual actual, una relació de les propietats macroscòpiques (temperatura de fusió, volums molars, acidesa dels compostos, etc.) de les substàncies elementals amb conceptes abstractes i propietats submicroscòpiques, com el pes atòmic (en relació amb les masses d'interacció química) i la valència (capacitat de combinació dels elements deduïda de les fórmules dels compostos).

El descobriment de cinc gasos nobles entre els anys 1892 i 1898 va constituir un autèntic daltabaix per a la taula periòdica, fins al punt que es va arribar a pensar a abandonar-la. Es tractava d'una autèntica anomalia per a la lleï periòdica, ja que aquests gasos, l'existència dels quals no estava prevista, no tenien cabuda a la taula, atès que no se'n coneixia cap combinació amb els altres elements.

L'any 1900, William Ramsay (1852-1916), que havia descobert, juntament amb Lord Rayleigh

(1842-1919), el gas noble argó, va suggerir a Mendeléiev crear un nou grup (entre el dels halògens i el dels alcalins) per acomodar-hi els gasos nobles. Mendeléiev va poder respirar tranquil, perquè aquesta proposta suposava «una gloriosa confirmació de l'aplicabilitat general de la lleï periòdica» (Scerri, 2007).

Entre els anys 1913 i 1920, el físic britànic Henry Moseley (1887-1915) va observar que la freqüència dels raigs X emesos per un element era proporcional a l'arrel quadrada del seu nombre atòmic (nombre d'ordinalitat) a la taula periòdica. Ernest Rutherford va explicar aquesta relació com a conseqüència que el nombre atòmic indicava la càrrega nuclear dels àtoms i va aventurar que el nucli estaria format per partícules positives. Finalment, aquest descobriment va permetre substituir el pes atòmic pel nombre atòmic a l'hora d'ordenar els elements a la taula. La importància de les aportacions de Moseley residia en què, per primera vegada, es podia determinar de forma inequívoca el nombre d'elements presents a la taula periòdica i quines cel·les eren candidates a ser ocupades per futurs elements encara desconeguts (Scerri, 2007). No obstant això, els fonaments de la lleï periòdica dels elements formulada per Mendeléiev van romandre intactes a condició de canviar els «pesos atòmics» pels «nombres atòmics».

Claudi Mans (2013, p. 34-42) fa ressaltar la importància del descobriment de l'estructura interna dels àtoms i la seva configuració electrònica en el pas d'una «taula química» a una «taula física»:

Els elements de la taula periòdica actuals són els àtoms lliures amb el mateix

nombre atòmic i amb l'estructura electrònica corresponent al seu estat fonamental. El descobriment de l'estructura interna de l'àtom i la seva configuració electrònica va motivar el pas de la «taula química» de Mendeléiev a la «taula física». D'aquesta manera, de les estructures electròniques dels àtoms es va derivar la regularitat i la periodicitat de les propietats químiques i físiques dels elements. Des de fa cent anys, ja no són la periodicitat química i les masses atòmiques els criteris d'ordenació de la majoria de les taules periòdiques, sinó el nombre atòmic i l'estructura electrònica.

Investigació didàctica sobre el concepte *element* i la taula periòdica

Moltes de les dificultats d'aprenentatge del concepte *element químic* s'atribueixen a la manca de diferenciació entre els nivells macroscòpic i submicroscòpic, així com a una falta de perspectiva històrica de l'evolució del concepte (Solsona i Izquierdo, 1998; Alzate, 2005; López-Valentín i Furió-Mas, 2005; López-Valentín, 2008; Raviolo, 2008; Sosa y Méndez Vargas, 2011; Scerri, 2012; Franco-Mariscal i Oliva-Martínez, 2012; Francisco-Mariscal i Oliva-Martínez, 2013a; Labarca i Zambon, 2013; Caamaño, 2015).

Amb relació a la taula periòdica, molts investigadors critiquen la manca d'una perspectiva històrica pel que fa al seu ensenyament en els llibres de text i proposen una aproximació didàctica de tipus històric (Linares, 2004; Brito, Rodríguez i Niaz, 2005; Camacho, Quintanilla, Cuéllar, Gallego i Pérez, 2006;

Camacho, Gallego i Pérez, 2007; Agudelo, 2015; Agudelo, 2019).

Propostes didàctiques per a l'ensenyament de la substància elemental, l'element químic i la taula periòdica

L'aproximació didàctica més habitual a l'ESO és que la introducció del concepte *element químic* es faci com a substància elemental i que l'accepció submicroscòpica s'abordi, per primera vegada, en el marc de la teoria atòmica de Dalton.

La taula periòdica s'introdueix generalment a l'ESO després d'haver abordat el model d'àtom nuclear amb capes electròniques, de manera que hi ha una predominança de la taula periòdica «física», basada en l'estructura electrònica dels àtoms, enfront de la taula periòdica de les substàncies elementals. Tanmateix, les taules que s'utilitzen sovint contenen informació sobre les propietats de les substàncies elementals, com ara el punt de fusió o d'ebullició.

Al batxillerat, es justifica la taula periòdica a partir de l'estructura electrònica dels àtoms i s'aborda la variació de les propietats atòmiques periòdiques, tal com marca el currículum. S'acostumen a introduir algunes referències històriques sobre el descobriment de la taula periòdica de Mendeléiev i els intents previs de les tríades de Döbereiner, la llei de les octaves de Newlands i les propietats físiques periòdiques de Lothar Meyer, sense que aquesta perspectiva històrica sigui utilitzada per abordar una aproximació didàctica basada en la modelització.

Substància elemental i element químic

Sobre els usos dels termes *element* i *substància elemental*, hi ha un consens força ampli en el fet que cal utilitzar *substància*

elemental per designar el concepte macroscòpic d'*element* i reservar el terme *element* per designar una classe d'àtoms, la propietat distintiva dels quals seria, a l'inici de la modelització de l'estructura de la matèria, el fet de tenir la mateixa massa atòmica relativa i, més endavant, després d'abordar el model nuclear i electrònic de l'àtom, el fet de tenir el mateix nombre atòmic. L'ús del terme *substància simple* es va abandonant a favor de *substància elemental*.

Les recomanacions didàctiques aconsellen la diferenciació dels conceptes *substància elemental* i *element*, però hi ha una diversitat d'enfocaments pel que fa a la manera d'introduir inicialment el concepte *element*: en algunes aproximacions, es parteix de la visió atòmica daltoniana, mentre que en d'altres es posa més l'èmfasi en la idea d'*element* com a entitat abstracta que es conserva en els canvis químics, seguint la visió de Mendeléiev. Tanmateix, les dues aproximacions no són necessàriament incompatibles, ja que l'àtom, en el model daltonià, també és una entitat que es conserva en els canvis químics, i el mateix Mendeléiev parla dels elements com a àtoms, tot i que no en defensa l'existència.

En el projecte Química Faraday (Grup Recerca-Faraday, 1990) s'abordava inicialment la diferenciació entre *substància simple* i *composta* de forma operacional i, posteriorment, s'introduïa el concepte *element* com una classe d'àtoms amb una massa atòmica relativa determinada.

Taula periòdica

La majoria de les propostes didàctiques sobre l'ensenyament de la taula periòdica en defensen una aproximació històrica i proposen un procés de modelització que impliqui diferenciar els

nivells macroscòpic i submicroscòpic del concepte *element químic* i de les propietats químiques (Bensaude-Vincent i Rebaud, 1994; Gutiérrez Julián, 2003; López-Valentín i Furió-Mas, 2013; Franco-Mariscal i Oliva-Martínez, 2013b; Aliberas, Izquierdo i Guitart, 2014; Segura, 2017; Segura i Hernández, 2017).

Hi ha propostes que se centren a indicar els continguts essencials que cal aprendre, mentre que d'altres proposen seqüenciacions que prioritzen el coneixement de la taula periòdica actual i la seva relació amb els models senzills de l'estructura interna de l'àtom. Per exemple, González (2013) considera que els estudiants que inicien el seu camí en la química haurien de conèixer els aspectes següents: els elements químics són les unitats fonamentals de la matèria; estan formats per àtoms que contenen un nucli central, uns electrons interns i uns altres de perifèrics, i són aquests els que determinen les propietats dels elements i la capacitat de formar compostos; a partir d'uns noranta elements (dels cent divuit coneguts), es coneixen desenes de milions de compostos químics; l'ordenació dels elements en funció del nombre atòmic; la divisió de la taula en grups i períodes, i, finalment, la classificació dels elements en tres grans blocs (metàl·lics, no metàl·lics i semiconductors).

En un article de Franco-Mariscal i Oliva-Martínez (2013a) que recull l'opinió d'un grup d'experts en didàctica de les ciències sobre quina seria la millor seqüenciació pel que fa a l'estudi de la taula periòdica, es fan propostes que comencen per la familiarització amb l'estructura de la taula actual, així com els noms i símbols dels elements i la seva posició a la taula (a 3r d'ESO); a 4t d'ESO, es justifica l'ordenació dels elements en funció del nombre

atòmic, s'interpreta la taula periòdica en funció d'un model atòmic de capes electròniques (2, 8, 8) que abasta només els primers vint elements i s'atribueix la similitud de propietats dels elements al fet que els àtoms tinguin el mateix nombre d'electrons a l'última capa; al batxillerat, finalment, es proposa acabar l'estudi de la taula establint una relació entre les propietats atòmiques dels elements i les seves configuracions electròniques.

La nostra proposta didàctica, que descrivim a continuació, es basa en un enfocament indagador i modelitzador de l'aprenentatge dels conceptes *substància*, *substància elemental*, *compost*, *element químic*, *taula periòdica* i *periodicitat de les propietats dels elements* que en té en compte l'evolució històrica. La filosofia didàctica subjacent a aquesta proposta és un procés de modelització mitjançant una progressió de models en els nivells macroscòpic, atomicomolecular i mesoscòpic, abans d'abordar models submicroscòpics electrònics (Caamaño, 2014).

El concepte *substància elemental* inicial que proposem és el d'una substància que no es pot descompondre en d'altres més simples. Es considera que cada substància elemental està formada per un únic tipus d'element químic. Aquests elements químics es troben combinats en els compostos i són les entitats materials que es conserven en les reaccions químiques. Una tal visió abstracta del concepte *element químic* es fa més fàcil de comprendre quan introduïm el concepte atòmic d'*element* de Dalton, segons el qual els elements estan formats per àtoms del mateix element i els compostos, per «àtoms compostos» (molècules) d'àtoms de diferents elements. Aquesta hipòtesi s'introdueix per explicar el fet que els elements reaccionin

en proporcions definides. Ara bé, un cop introduït aquest model, cal modificar-lo ràpidament en dos aspectes: primer, els àtoms d'un mateix element poden combinar-se per formar molècules; segon, àtoms, iguals o diferents, també es poden combinar per formar una estructura ininterrompuda d'àtoms fortament units entre si, la qual denominem *estructura gegant*.

Utilitzem les fórmules químiques com a representació simbòlica de la composició atòmica d'un compost. A partir de les fórmules químiques dels compostos que forma cada element, proposem establir el concepte *valència química*.

Les masses atòmiques relatives i les fórmules dels compostos que forma cada element són dues de les característiques que va fer servir Mendeléiev per establir la seva taula periòdica. En aquest sentit, proposem activitats de caire històric molt recomanables, com ara refer les prediccions d'elements no coneguts de Mendeléiev, plantejar el problema d'alguns elements que no seguien l'ordre de masses atòmiques creixent i estudiar el problema que va presentar el descobriment dels gasos nobles, per als quals es va haver de crear un grup nou.

També proposem arribar a una primera classificació periòdica dels primers vint elements a través d'una ordenació segons la massa atòmica relativa creixent i una agrupació dels elements amb les mateixes valències o la mateixa valència màxima. Un cop establerta aquesta primera taula periòdica, en què es pot veure una periodicitat de 2, 8, 8, es pot ampliar amb la incorporació de més elements. La taula obtinguda és una taula d'àtoms, però podem transformar-la en una de substàncies elementals i observar com varien algunes propietats macroscòpiques al llarg de la taula; per exemple, podem indagar la

variació de propietats com el caràcter metàl·lic o no metàl·lic, el punt de fusió en relació amb l'estructura molecular o gegant i el caràcter àcid o bàsic dels òxids. També podem investigar més a fons algunes famílies d'elements, com és el cas de la dels metalls alcalins i la dels halògens.

La diferenciació entre *substància elemental* i *element* (classe d'àtoms) comporta la necessitat de diferenciar dos tipus de taules periòdiques: la de les substàncies elementals (amb indicació de les propietats de les substàncies elementals i llur estructura) i la dels àtoms (amb indicació de les propietats atòmiques i l'estructura electrònica dels àtoms). Es tracta, doncs, de dues taules periòdiques que corresponen a dos nivells estructurals diferents.

La taula periòdica obtinguda ens permet aportar evidències sobre la distribució d'electrons en capes quan s'aborda l'estructura interna dels àtoms. Una altra evidència de la distribució dels electrons en capes s'obté estudiant la variació del volum atòmic dels primers vint elements de la taula (Caamaño, 2018).

Un cop establert un model atòmic amb capes d'electrons, és possible justificar la periodicitat de les propietats dels elements en funció de la càrrega nuclear i el nombre d'electrons a l'última capa de cada àtom. A partir d'un model de càrrega nuclear efectiva, és possible explicar la variació dels volums atòmics, les energies d'ionització i les electronegativitats.

Al batxillerat, un cop presentat el model quàntic de l'àtom, podem relacionar les configuracions electròniques dels àtoms amb la posició dels elements a la taula periòdica i justificar els grans grups (*s*, *p*, *d*, *f*) diferenciant entre elements representatius, de transició i de doble transició.

Podeu trobar activitats d'aula relacionades amb aquesta

proposta didàctica a l'Aplicació de Recursos per al Currículum (ARC) del Departament d'Educació <http://apliense.xtec.cat/arc/node/31035>.

Referències

- AGUDELO, C. (2015). *La función de la tabla periódica en la enseñanza de la química: Clasificar o aprender*. Tesi doctoral. Bellaterra: Universitat Autònoma de Barcelona.
- (2019). «La función de la tabla periódica en los libros de texto: ¿una clasificación de los átomos o una herramienta de pensamiento químico?». *Alambique*, núm. 97, p. 51-56.
- ALIBERAS, J.; IZQUIERDO, M.; GUITART, F. (2014). «Com es veuen els àtoms a la llum d'una espelma i com es compliquen més i més». *Educació Química EduQ*, núm. 19, p. 4-9.
- BENSAUDE-VINCENT, B. (1986). «Mendeleev's periodic system of chemical elements». *British Journal for the History of Science*, núm. 19, p. 3-17.
- (1994). «Le langage chimique à la recherche de l'élément chimique». *L'Actualité Chimique*, núm. 182, p. 51-55.
- (1998). «Mendeleiev: historia de un descubrimiento». A: SERRES, M. (ed.). *Historia de las ciencias*. Madrid: Cátedra, p. 503-525.
- BENSAUDE-VINCENT, B.; REBAUD, D. (1994). «Construire le tableau périodique des éléments. Pour une utilisation pédagogique d'informations historiques». *Bulletin de l'Union des Physiciens*, núm. 88, p. 1109-1129.
- BERTOMEU SÁNCHEZ, J. R. (2019). «El sistema periòdic i la pedagogia química del segle XIX: la creativitat col·lectiva de les aules de ciències». *Educació Química EduQ*, núm. 25, p. 21-31.
- BROCK, W. H. (1998). *Historia de la química*. Madrid: Alianza.
- CAAMAÑO, A. (2014). «La estructura conceptual de la química. Realidad, conceptos y representaciones simbólicas». *Alambique*, núm. 78, p. 7-20.
- (2015). «Una reflexión conceptual y lingüística en torno a las diferentes denominaciones de las sustancias químicas». *Alambique*, núm. 82, p. 9-16.
- (2018). «Los modelos atómicos escolares. ¿Recreación de los modelos históricos o creación de modelos propios?». *Alambique*, núm. 93, p. 7-17.
- (2019). «La teoría atómico-molecular en secundaria. Modelización progresiva basada en evidencias experimentales». *Alambique*, núm. 97, p. 8-18.
- ESTEBAN, S. (2009). *La historia del sistema periódico*. Madrid: Cuadernos de la UNED.
- FERNÁNDEZ, M. (1999). «Elementos frente a átomos». *Alambique*, núm. 21, p. 59-66.
- FRANCO-MARISCAL, A. J.; OLIVA-MARTÍNEZ, J. M. (2013a). «¿Qué enseñar en secundaria sobre la tabla periódica?». *Educació Química EduQ*, núm. 15, p. 43-52.
- (2013b). «Diseño de una unidad didáctica sobre los elementos químicos». *Alambique*, núm. 74, p. 57-67.
- GARCÍA BELMAR, J. A.; BERTOMEU SÁNCHEZ, J. R. (1999). *Nombrar la materia: Una introducción histórica a la terminología química*. Barcelona: Ediciones del Serbal.
- GEOFFROY, E.-F. (2012). *La representación de lo invisible: Tabla de los diferentes 'rapports' observados en la química entre diferentes sustancias*. Ed. a cura de P. Grapí. Alacant: Publicacions Universitat d'Alacant.
- GONZÁLEZ, P. (2013). «Què diu i què no diu la taula periòdica?». *Educació Química EduQ*, núm. 15, p. 19-24.
- GRUP RECERCA-FARADAY (1990). *Química Faraday: Un enfoque conceptual, experimental e histórico*. Barcelona: Teide.

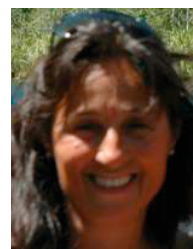
- GUTIÉRREZ JULIÁN, M. S. (2003). «La clasificación periódica de los elementos químicos». *Alambique*, núm. 38, p. 54-61.
- LEICESTER, H. M. (1967). *Panorama histórico de la química*. Madrid: Alhambra.
- LINARES, R. M. (2004). *Elemento, átomo y sustancia simple: Una reflexión a partir de la enseñanza de la tabla periódica en los cursos generales de química*. Tesis doctoral. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona.
- LÓPEZ-VALENTÍN, D. M.; FURIÓ-MAS, C. (2013). «Diseño de una secuencia de enseñanza para introducir el concepto de elemento químico en la enseñanza secundaria». *Enseñanza de las Ciencias*, núm. extra: IX Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, p. 1997-2001.
- MANS, C. (2009). «Element Al». *Educació Química EduQ*, núm. 3, p. 56-60.
- (2013). «Taules periòdiques menys convencionals». *Educació Química EduQ*, núm. 15, p. 34-42.
- MENDELÉIEV, D. I. (2008). *La regularitat periòdica dels elements*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans. Societat Catalana de Química. (Clàssics de la Química; 4), p. 15.
- (2019). *La relació entre les propietats dels elements i llur pes atòmic*. 2a ed. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans. Societat Catalana de Química. (Clàssics de la Química; 2).
- NELSON, P. G. (2006). «Definition of element». *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 7, núm. 4, p. 288-289.
- ROMÁN POLO, P. (2002a). «El racó de la història. Del caos a l'ordre químic: Mendelèiev». *Revista de la Societat Catalana de Química*, núm. 3, p. 233-245.
- (2002b). *El profeta del orden químic: Mendelèiev*. Madrid: Nivola. (Científicos para la Historia; 9).
- (2019). «La evolución de la tabla periódica de los elementos químicos desde 1869 hasta hoy». *Educació Química EduQ*, núm. 25, p. 11-20.
- ROUNDY, W. H. Jr. (1989). «What is an element?». *Journal of Chemical Education*, núm. 66, p. 729-730.
- SCERRI, E. (1998). «Evolución del sistema periódico». *Investigación y Ciencia*, núm. 266, p. 54-59.
- (2007). *The periodic table: Its story and its significance*. Oxford: Oxford University Press.
- (2008). «El pasado y el futuro de la tabla periódica. Este fiel símbolo del campo de la química siempre encara el escrutinio y el debate». *Educación Química*, vol. 19, núm. 3, p. 234-241.
- (2013). *La tabla periódica: una breve introducción*. Madrid: Alianza.
- (2019). «La tabla periódica: una obra inacabada». *Investigación y Ciencia*, núm. 513, p. 14-17.
- SEGURA, P. A. (2017). *La enseñanza del concepto 'tabla periódica': una propuesta desde un enfoque histórico*. Tesis doctoral. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- SEGURA, P. A.; HERNÁNDEZ, R. (2017). «La tabla periódica desde un enfoque histórico: experiencia de aula con docentes en formación en química». A: *Actas del Congreso Internacional de Liderazgo y Mejora de la Educación*. Madrid: RILME, p. 343-348.



Aureli Caamaño

És llicenciat en química i doctor en química per la Universitat de Barcelona (UB) i graduat en Humanitats per la Pompeu Fabra. Ha estat catedràtic de física i química d'ensenyament secundari i coordinador i professor del

curs de formació inicial (CAP) de l'ICE de la UB, i ha participat en diversos programes de formació permanent del professorat de ciències i en diferents projectes. És autor de llibres de text i de nombrosos articles sobre la didàctica de la química i els treballs pràctics. A/e: aurelicaamano@gmail.com.



Fina Guitart

És llicenciada en química i farmàcia i doctora en química per la Universitat de Barcelona (UB). És catedràtica de física i química de l'INS Jaume Balmes, actualment membre de l'àmbit científic del CESIRE, i professora associada de la Facultat d'Educació de la UB per a l'especialitat de física i química del màster de formació del professorat de secundària. És també autora de llibres de text, articles i comunicacions en congressos de didàctica de les ciències i de la química. A/e: jguitar3@xtec.cat.



Pere Grapí

És llicenciat en ciències químiques per la Universitat de Barcelona i doctor en filosofia i lletres (programa d'història de la ciència) per la Universitat Autònoma de Barcelona. Ha estat catedràtic de física i química d'ensenyament secundari. La seva àrea de recerca principal en història de la ciència és la química de final del segle XVIII i principi del segle XIX, així com les relacions entre la història de la ciència i l'ensenyament. A/e: pgrapi@gmail.com.