

# El sistema periòdic i la pedagogia química del segle XIX: la creativitat col·lectiva de les aules de ciències

The periodic system and 19<sup>th</sup>-century chemical pedagogy: the collective creativity of science classrooms

José Ramón Bertomeu Sánchez / Universitat de València. Institut Interuniversitari López Piñero



## resum

El sistema periòdic és un dels components fonamentals de la ciència contemporània. Té un paper rellevant tant en la memòria col·lectiva de la comunitat química com en la seua imatge pública. Aquestes característiques creen un ampli ventall d'oportunitats per a fer servir la seua història amb finalitats educatives. El present treball fa servir els nous estudis de la història del sistema periòdic per a esbrinar aquestes potencialitats didàctiques. L'argument central és la consideració del sistema periòdic com a resultat de l'activitat creativa de les aules de ciències del segle XIX.

## paraules clau

Sistema periòdic, Dmitri Ivànovitx Mendeléiev, Auguste Cahours, didàctica de la química, història de la química.

## abstract

The periodic system is one of the fundamental components of contemporary science. It plays a relevant role in both the collective memory of the chemical community and the public image of chemistry. These features create a wide spectrum of opportunities for using its history in educational projects. This paper relies on the recent scholarship on the history of the periodic system in order to explore its potential didactic uses. My main claim is that the periodic system was an out-standing result of the collective creativity related to 19<sup>th</sup>-century classroom science.

## keywords

Periodic system, Dmitri Ivanovich Mendeleev, Auguste Cahours, chemical education, history of chemistry.

El sistema periòdic és un dels components fonamentals de la ciència contemporània. A l'igual d'altres aspectes de la ciència, el sistema periòdic dels elements presenta una gran varietat de significats que es poden analitzar des d'un punt de vista històric. El més habitual és considerar-lo com una classificació dels elements que, mitjançant diverses representacions gràfiques, és emprada com a eina didàctica. També sol defi-

nir-se com una llei amb capacitat de predicció de les propietats de nous elements, com sembla que prova una part dels descobriments de les darreres dècades del segle XIX i principi del segle XX, tot i que també hi ha hagut moltes excepcions i situacions problemàtiques. D'altra banda, més enllà dels límits de la comunitat científica, la taula periòdica forma part de les imatges més populars de la química. Gràcies a l'extensió de

l'educació secundària, una gran part de la població s'ha familiaritzat amb alguna de les seues versions gràfiques que es poden trobar en museus de ciència i en obres de divulgació. El sistema periòdic té així un paper rellevant tant en la memòria col·lectiva de la química com en la seua imatge pública. Aquestes característiques creen un ampli ventall d'oportunitats per a fer servir la seua història amb finalitats educatives. El present treball

fa servir els nous estudis de la història del sistema periòdic per a esbrinar aquestes potencialitats didàctiques. El punt central és la consideració del sistema periòdic com a resultat de l'activitat creativa de les aules de ciències del segle XIX.

### Mites

El sistema periòdic constitueix també un tema habitual de les introduccions històriques als llibres de química. El nombre de protagonistes de la narració és variable, però un sol ocupar una posició central: Dmitri Ivànovitx Mendeléiev (1834-1907). Segons una de les versions més difoses, l'ordenació periòdica va ser producte d'un somni de Mendeléiev durant el qual se li va revelar sobtadament el nou ordre dels elements. Altres narracions afirmen que el químic rus va arribar a elaborar aquesta classificació a través d'un joc de cartes, una espècie de «solitari químic». El fragment, inclòs en una petita nota a peu de pàgina de l'última edició del seu manual, s'ha repetit innumerable vegades i ha servit per a alimentar les imatges populars sobre els moments eureka de la ciència (Gordin, 2004). Se n'han creat aplicacions didàctiques, versions novel·lades i documentals aparentment fidedignes del famós joc de cartes de Mendeléiev. Resulta sorprenent la importància que ha cobrat aquesta petita nota a peu de pàgina, escrita més de quaranta anys després dels suposats esdeveniments. No sembla que es dega a la seua fiabilitat com a font històrica, sinó al fet que concorda amb imatges estereotipades del descobriment científic.

Altres versions del descobriment segueixen la mateixa tònica i la troballa es presenta com a resultat d'una inspiració onírica o

## A grans trets, es pot afirmar que el sistema periòdic va ser el resultat de la confluència de dues àrees de treball en química: els càlculs de masses atòmiques (o pesos atòmics, com es coneixien en l'època) i les classificacions químiques

d'una nit de treball sense descans. Basant-se en aquest tipus de relats, amb un fonament documental molt feble, alguns autors han exalçat la figura de Mendeléiev com a geni solitari, fins a equiparar-lo amb un profeta del panteó de la ciència. Tot abandonant aquest tipus de mitologies, la recerca acadèmica ha permès recollir una gran quantitat d'informació històrica sobre el sistema periòdic. A la darrereria del segle XIX, el químic historiador nord-americà Francis Preston Venable va recollir referències a treballs de més d'una centena d'autors de nombrosos països amb diverses contribucions al desenvolupament del sistema periòdic (Venable, 1896). Ara fa cinquanta anys, el químic holandès Jan van Spronsen va publicar un estudi detallat amb desenes de sistemes periòdics semblants publicats en la segona meitat del segle XIX (Spronsen, 1969). Molts altres treballs posteriors han confirmat el caràcter col·lectiu de la creació del sistema periòdic (Kaji, Kragh i Palló, 2015).

A grans trets, es pot afirmar que el sistema periòdic va ser el resultat de la confluència de dues àrees de treball en química: els càlculs de masses atòmiques (o pesos atòmics, com es coneixien en l'època) i les classificacions químiques. Ambdues àrees van

estar fortament connectades des dels treballs de Dalton i van ser el resultat de la labor col·lectiva d'un grup molt ampli de protagonistes. Atès que la història de l'atomisme del segle XIX ha estat més estudiada (Rocke, 1984; Ramberg, 2003; Dalton, 2012; Ramberg, 2015), aquest resum se centra en el segon aspecte: les classificacions químiques a les aules de ciències.

Quan va realitzar la versió del 1869 del sistema periòdic, Mendeléiev era un jove professor de química que, com molts d'altres, afrontava el gran problema pedagògic del segle XIX: l'ordre dels elements i els compostos. La seua resposta s'ha d'entendre dins una llarga línia de treballs que procedeixen del segle XVIII, punt de partida on iniciarem la primera part d'aquest article. Més endavant, descriurem les anomenades *classificacions artificials i naturals*, així com els debats que hi va haver durant les primeres dècades del segle XIX sobre aquestes qüestions. Finalment, estudiarem en detall un manual de mitjan segle: el realitzat pel químic francès Auguste Cahours. Tot i que l'autor és actualment poc conegut, llevat dels cercles especialitzats, aquest llibre és especialment rellevant per a la història del sistema periòdic. Sabem que Mendeléiev el coneixia en detall, ja que en va preparar una traducció al rus pocs anys abans del primer esborrany del sistema periòdic del qual celebrem enguany el cent cinquantè aniversari. El punt final del treball són els primers anys de la recepció del sistema periòdic de Mendeléiev tenint en compte la recerca històrica recent. Aquesta recerca també confirma l'existència d'una tradició pedagògica de llarga durada en les aules de química, sense la qual és impos-

sible entendre l'origen, el desenvolupament i els primers usos del sistema periòdic.

Abans de començar, convé fer una petita precisió terminològica. S'emprarà al llarg del text l'expressió *sistema periòdic* per a fer referència a les dues expressions més habituals en el segle XIX (*lleis periòdiques* i *classificació periòdica*). Quan es pretenga recalcar algun d'aquests dos aspectes (*lleis* o *classificació*), farem ús de les expressions anteriors. En general, reservarem l'expressió *taula periòdica* per a esmentar alguna de les seues representacions gràfiques. És evident que totes aquestes expressions assenyalen diversos aspectes de les qüestions ací analitzades. Els termes van ser ja emprats de manera poc consistent pels contemporanis de Mendeléiev. No és fàcil fixar amb precisió les fronteres entre uns significats que han anat canviant al llarg de les dècades posteriors, per exemple, amb l'arribada de les interpretacions fonamentades en la mecànica quàntica. En realitat, la diversitat d'expressions i la seua ambigüitat demostren els diversos usos del sistema periòdic des de les últimes dècades del segle XIX fins a l'actualitat. Dins la comunitat científica, ha estat emprat com a prova concloent per a les hipòtesis atomistes o per a aclarir els conceptes *element* i *substància elemental*. També s'ha fet servir com a recurs pedagògic per a presentar temes molt diversos, des de la química inorgànica descriptiva fins a aspectes centrals de la mecànica quàntica i la seua aplicació a l'estudi de les propietats químiques, fet que ha originat també debats filosòfics sobre el reduccionisme, particularment pel que fa a la possibilitat d'explicar el sistema periòdic amb les lleis de la mecànica quàntica (Scerri, 2006;

Scerri, 2013). Amb diverses perspectives i durant diferents períodes, el sistema periòdic ha servit com a eina heurística per a preveure nous elements químics. Fins i tot, a la darrerria del segle XIX, va fonamentar una hipòtesi cosmogònica (darwinisme inorgànic) que explicava l'evolució conjunta de les estrelles i dels elements químics (Bertomeu Sánchez, 2011). En la cultura popular, s'ha transformat en una veritable icona de la química i ha servit per a inspirar novel·les, art popular, música rock, murals, sèries de televisió, etc. (Alvarez, 2013). Aquests diferents usos i significats han variat al llarg de la història i en funció dels espais geogràfics i culturals considerats. Atesa la curta extensió, aquest treball està centrat en el seu origen com a producte de les aules i els primers usos didàctics durant les darreres dècades del segle XIX.

### **Del simple al compost**

Per a entendre la història del sistema periòdic, cal fer algunes consideracions prèvies sobre la relació entre lleis, classificacions, disciplines i pràctiques pedagògiques. L'ensenyament és un ingredient fonamental en la constitució de disciplines acadèmiques o escolars. La química va configurar els seus límits disciplinaris al llarg del segle XVIII. La gran quantitat d'informació acumulada va fer plantejar les qüestions pedagògiques associades a la classificació i la seqüenciació de continguts. En aquests anys, les taules d'afinitat es van transformar en un ingredient indispensable de les aules de química i van servir per a organitzar una gran quantitat d'informació entorn de les reaccions químiques conegudes (Kim, 2003). Encara que l'estructura i els usos van ser diferents, es pot comparar el seu paper, en certa

**Per a entendre la història del sistema periòdic, cal fer algunes consideracions prèvies sobre la relació entre lleis, classificacions, disciplines i pràctiques pedagògiques. L'ensenyament és un ingredient fonamental en la constitució de disciplines acadèmiques o escolars**

manera, amb el que van tenir en la segona meitat del segle XX les taules periòdiques a les aules de ciències. Van ser eines que van ordenar els sabers, van facilitar l'aprenentatge de la química i van propiciar la recerca de regularitats i, fins i tot, lleis de les afinitats i relacions quantitatives, de manera que van oferir una cohesió disciplinar incipient a la ciència química naixent (Taylor, 2008; Geoffroy, 2012).

Juntament amb la informació respecte a les reaccions químiques i als aparells de laboratori, els apartats dedicats a la descripció de les substàncies conformaven la major part dels manuals de química. A mitjan segle XVIII, molts autors afirmaven que seguien una ordenació basada en l'antic principi d'avançar del conegut al desconegut per a facilitar l'estudi d'una ciència. En el cas de la química, aquest postulat obligava a partir de les substàncies més simples per a avançar fins als compostos més complexos. Per exemple, un dels manuals més reeditats i traduïts de mitjan segle XVIII, realitzat pel metge francès Pierre Macquer, contenia la justificació següent del pla de l'obra:

El pla que he proposat seguir és principalment no suposar cap coneixement químic en el lector, per a portar-lo de les veritats més simples, que suposen el mínim coneixement, a les veritats compostes, que en requereixen més. Aquest ordre [...] m'ha imposat la llei de tractar al principi les substàncies més simples que coneixem, i que considerem elements que componen els altres, perquè el coneixement de les propietats d'aquestes parts elementals conduirà naturalment a descobrir les de les seues diferents combinacions. Al contrari, el coneixement de les propietats dels cossos compostos exigeix que ja estiguem informats dels seus principis (Macquer, 1753, p. xi).

La nova noció de *composició química* que es va imposar en aquests anys va reforçar aquesta idea en els manuals de les dècades de 1780 i 1790. El més famós d'aquests manuals, actualment, el va escriure Antoine Lavoisier en 1789. L'autor francès, que no arribaria a publicar mai la segona edició d'aquest llibre perquè va morir a la guillotina, va recollir les idees més habituals en manuals de química, tot i que amb el suport de la filosofia sensualista de Condillac, que va fer servir per a redactar aquest famós fragment del pròleg:

Em vaig imposar la llei de procedir sempre d'allò que era conegut a allò que era desconegut, de no traure cap

desconegut, de no traure cap conseqüència que no es derivés immediatament dels experiments i de les observacions, i d'encadenar els resultats i les veritats químiques en l'ordre més estricte per a facilitar-ne la intel·ligibilitat als principiants (Lavoisier, 2003, p. 9).

El fragment de Lavoisier indica la importància de la seqüenciació, així com la relació entre ordenació i terminologia química.

Aquests criteris de Lavoisier van servir per a establir les taules d'elements i compostos amb què va organitzar les primeres parts del seu manual. Van ser els seus col·laboradors més destacats, sobretot Jean-Antoine Chaptal i Antoine François de Fourcroy, els qui van desenvolupar aquestes idees en les seues obres (Bensaude-Vincent, 1990). Aviat, però, aquests criteris generals van ser contestats perquè deixaven obertes moltes opcions i plantejaven nombroses paradoxes. A la primeria del segle XIX, Jacob Berzelius considerava que les obres dirigides a profans no podien començar per les substàncies elementals. Per a atraure l'atenció del públic, era necessari començar per barreges de gasos com l'aire o compostos com l'aigua, que formaven part dels sabers comuns. «Els autors de química, com els historiadors o els literats, han de fer nàixer la curiositat en l'esperit del lector abans de satisfer-la», afirmava Berzelius. I era absurd tractar de generar aquest interès partint «d'objectes que són totalment desconeguts», tal com passava amb l'hidrogen, l'oxigen, el clor i altres substàncies elementals amb què començaven molts llibres de text (Berzelius, 1845-1850, vol. I, p. 69).

Molts autors posteriors van comprovar que l'ordre de complexitat creixent defensat pels químics del segle XVIII no era necessàriament la seqüència pedagògica més adequada per a propiciar l'aprenentatge de la química. D'aquesta manera, i enfrontats a un nombre cada vegada més important de compostos químics, molts autors van fer propostes pròpies per a organitzar els continguts de les seues obres (Bertomeu Sánchez, García Belmar i Bensaude-Vincent, 2002; Bensaude-Vincent, García Belmar i Bertomeu Sánchez, 2003).

### Classificacions naturals i artificials

A més dels problemes assenyalats per Berzelius, el criteri de complexitat creixent deixava obertes nombroses possibilitats d'ordenació de les substàncies químiques. No resolva l'ordre de presentació de més d'una trentena de substàncies elementals que eren conegudes en l'època. Tampoc facilitava l'organització dels grups amplis, com els compostos binaris o les sals, tots amb un mateix grau de complexitat. Per a abordar aquestes qüestions, durant la primera meitat del segle XIX, van sorgir diverses propostes. Les dues classificacions més influents van ser proposades per Jacques Thenard, basada en la reacció dels elements amb l'oxigen, i per Jacob Berzelius, fonamentada en les propietats electroquímiques.

La taula 1 mostra la classificació dels metalls basada en els criteris de Thenard. Amb una gran quantitat de modificacions i addicions, fruit de noves incorporacions d'elements i nous estudis experimentals, la classificació va ser emprada en els manuals de química fins al final del segle XIX. El *Traité* de Thenard es va conver-



## A més dels problemes assenyalats per Berzelius, el criteri de complexitat creixent deixava obertes nombroses possibilitats d'ordenació de les substàncies químiques

tir en un model per als llibres de text francesos, mentre que el *Lärbok* de Berzelius va tenir un paper similar a Suècia i també en el món de parla alemanya (Lundgren i Bensaude-Vincent, 2000).

Taula 1. Classificació dels metalls de Thenard

Seccions	Metalls
Grup 1	Mg, Be, Y, Al, Th, Zr, Si
Grup 2	Ca, Sr, Ba, Li, Na, K
Grup 3	Mn, Zn, Fe, Sn, Cd
Grup 4	a) As, Mo, Cr, W b) Sb, U, Ce, Co, Ti, Bi, Cu, Te, Ni, Pb
Grup 5	Hg, Os
Grup 6	Ag, Pd, Rh, Pt, Au, Ir

Les classificacions de Thenard i Berzelius tenien una característica comuna: estaven basades en un grup limitat de propietats rellevants seleccionades amb cura pels autors. Per aquesta raó van ser conegudes com a *classificacions artificials*. Encara que, en certa manera, s'acceptava el seu caràcter arbitrari, aquestes classificacions artificials tenien l'avantatge d'estar basades en dades experimentals senzilles de determinar. Un dels deixebles de Thenard, Victor Regnault, que també va contribuir a perfeccionar la classificació dels metalls amb nous experiments de laboratori, assenyalava el següent:

Segons alguns, els cossos només han de ser ordenats d'acord amb una de les seues propietats, només una de les seues característiques. Per descomptat, el resultat d'aquesta ordenació només pot ser una classificació artificial, però pot ser molt útil si la característica escollida és una de les més importants. Per contra, l'altre tipus de classificació té en compte totes les propietats generals dels cossos i les considera totes. Així, es posen al costat dels altres els cossos que comparteixen el major nombre de característiques i propietats més importants (Regnault, 1836, p. 337).

Regnault esmentava així un nou tipus de classificacions que es van obrir pas a mitjan anys trenta del segle XIX: les classificacions naturals. Aquest tipus d'ordenacions, habitualment emprades en història natural, havien estat introduïdes en química al començament del segle XIX gràcies als treballs de Marie-André Ampère. En una influent publicació del 1816, Ampère va suggerir de seguir l'exemple dels naturalistes i va proposar classificacions fonamentades en «el conjunt de característiques dels cossos» (fig. 1). Va tractar d'establir grups de tots els elements coneguts atenent el «major nombre» de similituds i les «analogies més essencials» entre les seues propietats. Va oferir una ordenació circular en què les propietats canviaven de forma gradual d'un grup a un altre. Així, va crear tres grans famílies (*gazolytes*, *leucolytes* i *chroicolytes*) que es dividien en quinze gèneres formats per diverses substàncies elementals (Bertomeu Sánchez, García Belmar i Bensaude-Vincent, 2002).

*Tableau des quinze genres et des quarante-huit espèces des Corps simples pondérables, rangés dans l'ordre naturel.*

{	Carbone.	Bore.	}
{	Hydrogene.	Silicium.	}
{	Azote.	Colombium.	}
{	Oxigene.	Molybdene.	}
{	Soufre.	Chrome.	}
{	Chlore.	Tungstene.	}
{	Fluore.	Titane.	}
{	Iode.	Osmium.	}
{	Tellure.	Rhodium.	}
{	Phosphore.	Iridium.	}
{	Arsenic.	Or.	}
{	Antimoine.	Platine.	}
{	Etain.	Palladium.	}
{	Zinc.	Cuivre.	}
{	Bismuth.	Nickel.	}
{	Mercur.	Fer.	}
{	Argent.	Cobalt.	}
{	Plomb.	Urane.	}
{	Sodium.	Manganese.	}
{	Potassium.	Cerium.	}
{	Barium.	Zirconium.	}
{	Strontium.	Aluminium.	}
{	Calcium.	Chaux.	}
{	Magnesium.	Yttrium.	}

Figura 1. Classificació natural dels elements d'Ampère publicada als *Annales de Chimie* l'any 1816.

Les propostes d'Ampère van ser molt poc emprades durant les primeres dècades del segle XIX dins les aules de química. A partir de mitjan dècada de 1830, un nombre creixent d'autors d'obres de química va denunciar l'arbitrarietat de les classificacions artificials, basades en un criteri únic seleccionat pel seu autor. Començaren a interessar-se per les classificacions naturals fonamentades en un conjunt ampli de propietats dels elements que podien ser descobertes mitjançant la recerca experimental. Aquestes classificacions permetien, segons els partidaris, establir grups fonamentats en l'ordre de la natura i no en l'elecció arbitrària dels autors. Per exemple, Ferdinand Hoefer, historiador, autor de manuals i un dels més destacats defensors de les classificacions naturals, va criticar durament l'«exageració del paper de l'oxigen» en l'organització dels manuals que seguien l'exemple de Thenard. Pensava que les classificacions naturals eren alhora eines heurístiques i didàctiques. Proporcionaven informació sobre «el que encara quedava per

descobrir», atès que assenyalaven la potencial existència d'elements encara desconeguts en determinades famílies naturals. Podia també ser possible així preveure propietats de substàncies encara no descobertes. Les classificacions naturals també eren, segons Hofer, eines per a millorar l'ensenyament i l'aprenentatge de la química. Un grup de substàncies podia ser estudiat posant atenció únicament al «tipus d'una família» (fig. 2), és a dir, a la substància amb les propietats més característiques del grup (Hofer, 1845).

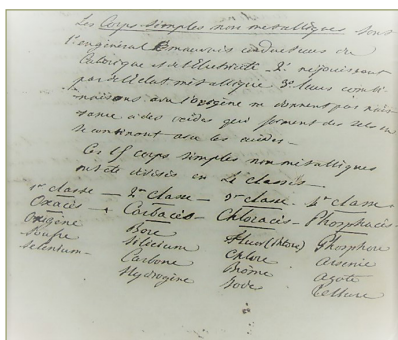


Figura 2. Classificació dels elements no metàl·lics en un curs de química del 1845 a la Facultat de Medicina de París. Aquests elements són agrupats en quatre classes amb el nom del component característic del grup: oxacès (O, S, Se), carbacès (B, Si, C, H), chloracès (F, Cl, Br, I) i phosphacès (P, As, N, Te).

Molts autors van adoptar aquests criteris en els seus llibres de text. D'altres van suggerir diverses variacions de les classificacions naturals durant la dècada de 1840, més o menys inspirades en l'obra d'Ampère. Tanmateix, l'arribada d'aquest tipus de seqüenciacions no va suposar l'eliminació de les classificacions artificials anteriors, almenys de forma completa. Les classificacions naturals es van emprar amb èxit en el grup dels metal·loides o no-metalls, però van trobar molts problemes per a poder ser aplicades dins el grup dels metalls, molt més

nombrós i creixent al llarg d'aquests anys. Com a resultat, els manuals de química de mitjan segle XIX van presentar una barreja complexa de classificacions artificials i naturals. Aquestes classificacions «híbrides», en constant evolució i adaptació per part dels autors, es van convertir en les més habituals durant la segona meitat del segle XIX (Bertomeu Sánchez, García Belmar i Bensaude-Vincent, 2002; Bensaude-Vincent, García Belmar i Bertomeu Sánchez, 2003; Bertomeu Sánchez, 2009).

### Auguste Cahours, un il·lustre desconegut

Un dels autors de manuals que va emprar aquestes classificacions híbrides va ser Auguste Cahours (fig. 3). Els seus manuals van tenir prou circulació pel seu paper com a professor a l'École Centrale de París, un dels centres més importants d'ensenyament de la química del segle XIX. Com molts altres professors d'aquests anys, Cahours va desenvolupar nombroses recerques de gran rellevància, com ara estudis sobre les densitats de vapor, relacionats amb els càlculs dels pesos atòmics. Els seus manuals tingueren moltes edicions a França i van ser traduïts a moltes llengües europees. De fet, pocs anys abans de realitzar la seua famosa classificació periòdica i de publicar el seu propi llibre de text, Mendeléiev va traduir les *Leçons de chimie générale élémentaire* de Cahours (Gordin, 2004). Com molts altres llibres de text francesos d'aquests anys, Cahours va organitzar els elements no metàl·lics del seu llibre en «famílies naturals» i va dedicar un apartat especial a discutir els fonaments teòrics d'aquesta classificació. Segons Cahours, aquests elements es podien agrupar gràcies a la similitud dels

seus compostos, «dotats de les més íntimes analogies químiques», de manera que fins i tot es podien reemplaçar els uns pels altres sense canviar la forma cristal·lina. Era la propietat que Eilhard Mitscherlich havia anomenat *isomorfisme* i que també per a Mendeléiev era la clau principal per a entendre les propietats periòdiques. Cahours reconeixia que «si volguérem classificar els metalls mitjançant isomorfisme, no podríem aconseguir-ho», per això va fer servir les classificacions artificials inspirades en l'obra de Thenard (Cahours, 1855-1856).



Figura 3. Auguste Cahours (1813-1891).

El llibre de Cahours contenia també una discussió sobre la variació de les propietats químiques dins les famílies naturals i connexions d'aquestes qüestions amb la teoria atòmica. En parlar dels elements no metàl·lics, Cahours afirmava que diverses propietats químiques (volatilitat, punt d'ebullició, caràcter metàl·lic, decreixement de l'afinitat per l'hidrogen i l'oxigen, etc.) variaven de manera gradual quan els elements de cada família eren organitzats en ordre creixent de pesos atòmics. També va constatar les variacions en l'acidesa dels compostos hidrogenats dins les famílies d'elements homòlegs, així com les fórmules similars dels compostos resultants, i va arribar a

Taula 2. Variació de l'acidesa dels compostos hidrogenats de tres famílies naturals d'elements segons Cahours (1855-1856)

Família	Elements	Combinacions amb l'hidrogen
Primera	F, Cl, Br, I	$\frac{1}{2}$ vol. R + $\frac{1}{2}$ vol. de H = 1 vol. RH àcid fort
Segona	O, S, Se, Te	$\frac{1}{2}$ vol. R' + 1 vol. de H = 1 vol. R' H àcid molt feble
Tercera	N, P, As, Sb	$\frac{1}{2}$ vol. R'' + $\frac{3}{2}$ vol. de H = 1 vol. R'' H base forta

Nota: El volum era una forma d'expressar el que ara podríem anomenar mols d'àtoms o de molècules dels diferents elements.

1 VOLUMEN DE HIDRÓGENO DA, CON OTRO DE LOS CUERPOS SIGUIENTES, 2 VOLUMENES DE UN ÁCIDO PODEROSO.				
	FLUOR.	CLORO.	BROMO.	YODO.
Símbolo . . . . .	Fl	Cl	Br	I
Densidad . . . . .	»	1,33	3	5
Densidad del vapor . . . . .	»	2,4 amarillo	4,4 rojo	8,7 violado
Punto de ebulicion. . . . .	»	-50° ó 60°	63	173
Peso equivalente. . . . .	19	35,5	80	126
Volumen equivalente. . . . .	»	27	26	25
Estado físico á la temperatura ordinaria.	Desconocido	Gaseoso	Líquido	Sólido
Aspecto . . . . .	Desconocido	Trasparente	Idem	Casi metálico
Afinidad para con H.	Estremada	Muy grande	Menos fuerte	Débil
Afinidad para con O . . . . .	Ningun compuesto conocido.	Muy débil	Débil	Notable

Figura 4. Variació de propietats dins una família d'elements segons la traducció castellana del manual de química de Cahours (Madrid, 1856-1857).

escriure taules com les que podem veure a la taula 2 i a la fig. 3.

Les similituds entre aquestes classificacions amb les que va utilitzar Mendeléiev, així com les sorprenents discussions sobre les variacions de propietats periòdiques amb el pes atòmic, semblen convertir Cahours en un altre precursor del descobriment del sistema periòdic. Podríem incloure el seu nom en la llarga llista de precursors que solen figurar en moltes narracions, com Johann Wolfgang Döbereiner, per les seues conegudes *Triaden* ('tríades') d'elements, o Jean-Baptiste Dumas, pels seus menys famosos càlculs que connectaven pesos atòmics i propietats químiques. En realitat, el llibre de Cahours no és gaire diferent d'altres manuals de química d'aleshores, la qual cosa obligaria a incloure molts altres il·lustres desconeguts en aquest grup. Potser exagerant una mica més, es podria fins i tot afegir el nom de Cahours i d'altres professors

d'aquest període a la llarga llista d'autors que moltes vegades se situen al costat de Mendeléiev com a descobridors del sistema periòdic durant les dècades de 1860 i 1870: Alexandre-Émile Béguyer de Chancourtois, John A. Newlands, William Odling i Lothar Meyer (Spronsen, 1969; Scerri, 2006; Scerri, 2013). És evident que ampliar encara més aquesta llista conduiria a una situació absurda. Són part de les apories resultants de portar fins a les darreres conseqüències les imatges idealitzades del descobriment científic esmentades al principi del treball. Molts relats d'aquest tipus complementen els moments eureka amb la cerca de «precursors» més o menys oblidats i es perden en complicades controvèrsies de prioritat.

L'objectiu de la investigació històrica, particularment quan es pretén oferir eines de reflexió per a les aules, no és afegir noms nous al panteó dels sants laics de la ciència; al contrari, el que mostren

les investigacions resumides en aquest treball és la creativitat col·lectiva sorgida de l'activitat quotidiana de les aules de ciències.

S'ha vist que ni Cahours ni Mendeléiev van ser els primers autors de llibres de text que van afrontar el problema de les classificacions químiques. Hi havia una llarga tradició d'estudis sobre aquest tema que es remun-tava a la segona meitat del segle XVIII i que va continuar i es va amplificar pels anys trenta i quaranta del segle següent, amb les controvèrsies sobre les classificacions naturals i artificials. Més que el producte d'un somni, d'un moment eureka o d'un joc de cartes, les classificacions químiques van ser el resultat de la creativitat col·lectiva dels professors de química del segle XIX. Es tracta d'un tipus de creativitat científica per a la qual no hi ha mitologies ni imatges tan poderoses com les esmentades abans. Tampoc és fàcil determinar fites crucials ni autories particulars (Bertomeu Sánchez, 2009). A més dels autors dels manuals i el professorat de ciències, les classificacions emprades per Cahours i Mendeléiev van ser una resposta als interessos dels públics principals als quals es dirigia l'ensenyament de la química al llarg del segle XIX. Bona part del públic destinatari eren estudiants de medicina o de farmàcia que perseguen una bona descripció dels productes químics més importants amb aplicació terapèutica. Davant l'augment exponencial del nombre de substàncies conegudes, els professors de química



## La constant aparició de noves substàncies fomentava també el canvi dels criteris classificatoris. Era comú que els autors de manuals feren modificacions parcials de les classificacions existents per a donar lloc a ordenacions més o menys diferents de les establertes

havien d'abordar inevitablement el problema d'una millor ordenació didàctica. L'adopció d'una classificació adient (per exemple, l'agrupació en famílies amb propietats similars) era un assumpte crucial per a la seqüenciació de continguts i, doncs, també per a l'èxit pedagògic de les classes i dels llibres de text de química (Bensaude-Vincent, García Belmar i Bertomeu Sánchez, 2003).

### Primeres reaccions al sistema periòdic de Mendeléiev

La constant aparició de noves substàncies fomentava també el canvi dels criteris classificatoris. Era comú que els autors de manuals feren modificacions parcials de les classificacions existents per a donar lloc a ordenacions més o menys diferents de les establertes. La dinàmica pròpia de la química, que deixava ràpidament obsoletes les classificacions amb el descobriment de nous elements i compostos, predisposava els autors de manuals a mantenir una actitud irreverent enfront de les propostes d'ordenació anteriors, les quals s'havien de remodelar necessàriament per a acollir les novetats i organitzar les obres d'acord amb les concepcions pedagògiques i els

interessos dels públics destinataris. Dins aquesta atmosfera crítica i creativa, cal entendre l'acollida de les classificacions de Mendeléiev.

Quan el seu sistema periòdic va circular per Europa durant les dècades de 1870 i 1880, va trobar una tradició pedagògica plenament consolidada; per això, era habitual l'apropiació crítica i selectiva de propostes de seqüenciació dels continguts dels manuals, més o menys basades en classificacions dels elements segons famílies naturals. Per aquesta raó, els aspectes nous que indubtablement presentaven els treballs de Mendeléiev van quedar atenuats per la gran quantitat de classificacions anteriorment proposades que havien anat arribant durant les dècades anteriors (Bertomeu Sánchez, 2011; Kaji, Kragh i Palló, 2015).

Per això, resulta difícil trobar referències al sistema periòdic de Mendeléiev en els manuals d'ensenyament de química durant la primera dècada de la seua publicació (1870-1880). Aquesta situació es dona en països tan diferents com la Gran Bretanya, França, Dinamarca, Suècia o Espanya. Només a Rússia i a Alemanya sembla que hi ha una recepció més primerenca. Les referències a la classificació periòdica dins els manuals francesos van començar a partir del 1880, però no es van generalitzar fins a la dècada següent (Nekoval-Chikhaoui, 1994). L'anàlisi de manuals anglesos i americans indica que les primeres referències van aparèixer poc abans, pels volts del 1877, però es van generalitzar durant la dècada següent (Brush, 1996). Una situació semblant es desprèn de l'anàlisi dels manuals publicats a Espanya, on les referències al sistema periòdic apareixen al començament de la dècada de 1880 i esdevenen més freqüents a

la darrereria del segle XIX (Bertomeu Sánchez i Muñoz, 2011).

Totes aquestes primeres reaccions als treballs de Mendeléiev han estat analitzades en detall en un llibre col·lectiu. És el resultat del treball d'un equip de més de quinze investigadors d'arreu, des de França fins al Japó, i diversos congressos internacionals que van contribuir a donar-li forma i propiciaren anàlisis comparades (Kaji, Kragh i Palló, 2015). Els treballs mostren una àmplia varietat de situacions. Per regla general, la circulació de la classificació de Mendeléiev va ser afavorida per les prediccions reeixides de nous elements, com el gal·li, l'escandi o el germani. Mendeléiev va fer moltes altres prediccions que no es van confirmar mai o que van estar sempre en contra de les dades experimentals disponibles. El sistema periòdic també va servir, durant aquests anys, per a fer rectificacions de les masses atòmiques, per exemple, en el cas d'elements com l'urani. El van utilitzar alguns autors com una confirmació de les hipòtesis atòmiques durant uns anys de forta controvèrsia en aquest tema. No obstant això, algunes de les prediccions de Mendeléiev, particularment les que es referien a la massa atòmica del tel·luri, no van arribar mai a rebre una confirmació empírica. Al contrari, van ser refutades per les dades experimentals disponibles, de manera que es va crear tota una sèrie d'irregularitats en l'ordenació que no serien plenament resoltes fins a la introducció del concepte *nombre atòmic* (Scerri, 2006; Scerri, 2013). Finalment, el descobriment de nous elements, particularment el grup de gasos nobles a la fi del segle XIX, va crear nous reptes a causa de les dificultats per a trobar acomodament en les classificacions periòdiques sorgides en la dècada de 1870.



Aquestes circumstàncies, juntament amb la ja esmentada tradició pedagògica, que incloïa les seues pròpies classificacions naturals i artificials, expliquen el paper limitat del sistema periòdic com a principi organitzatiu dels manuals d'ensenyament fins ben entrat el segle XX (Kaji, Kragh i Palló, 2015).

Hi hagué també reaccions molt crítiques. Podem esmentar autors que fins i tot van considerar el sistema de Mendeléiev com «la classificació més imperfecta de totes les que s'havien creat», tal com va afirmar Rodríguez Carracido (1888), influent catedràtic de química de la Facultat de Farmàcia de Madrid. Més comunes van ser les crítiques menors o reserves com les que va expressar Juan Manuel Bellido Carballo, professor de física i química en un col·legi catòlic de

Salamanca. En un manual publicat a la darrereria del segle XIX, va afirmar que la llei periòdica era una especulació poc adequada per a una ciència «eminentment empírica» com la química, tot i que considerava que podia presentar aspectes interessants. Altre exemple de recepció crítica són les irregularitats esmentades per Fernando Díaz Guzmán, catedràtic de física i química de l'institut de Logronyo, en el text reproduït al peu de la fig. 5. Més habituals que les crítiques van ser els silencis o l'absència de referències als treballs de Mendeléiev en els manuals de química. Més de la meitat del centenar de manuals de química publicats a Espanya entre els anys 1870 i 1920 no va incloure cap referència a l'ordenació periòdica. La major part dels autors que sí que ho van fer es

van limitar a descriure-la, molts amb una representació gràfica. També va haver-hi abundants elogis a les reeixides prediccions d'elements. No obstant això, tant crítics com defensors coincidien amb els que ni tan sols la van citar per l'escàs o, més aviat, nul paper que van atorgar a la classificació periòdica en l'organització dels manuals. Fins i tot els autors que van valorar positivament la classificació periòdica van preferir adoptar altres classificacions existents, generalment amb criteris diferents per al cas dels metal·loides i els metalls, com havia estat comú en els anys anteriors. I també molts autors van proposar petites modificacions sobre les classificacions ja existents i també classificacions noves, com la que va suggerir José Muñoz del Castillo, catedràtic de la Universitat Central de Madrid, que s'inspirà en les idees del darwinisme inorgànic de la darrereria del segle XIX (fig. 6). Com Mendeléiev, Muñoz del Castillo va deixar molts espais en blanc dins la seua classificació cíclica per tal d'incloure-hi posteriorment elements encara no descoberts dels quals podia preveure algunes propietats químiques (Bertomeu Sánchez i Muñoz, 2011).

## Conclusions

La discussió anterior obliga a fer un replantejament d'imatges de la producció i la circulació de la ciència que, tot i que han estat àmpliament abandonades pels historiadors, persisteixen en relats pseudohistòrics. Mitjançant els exemples anteriors, s'ha mostrat que les recerques sobre el sistema periòdic van ser el resultat de creativitats col·lectives amb un grup ampli de protagonistes. Amb aquest treball, he centrat l'atenció en la creativitat de les aules de ciències. Si fa cent

**Tabla periódica de Mendeleeff.**

H	Li	Gl <sup>?</sup>	Bo	C	N	O	Fl				
1	7	9,3	11	12	14	16	19				
	Na	Mg	Al	Si	Ph	S	Cl				
	23	24	27,5	28	31	32	35,5				
	K	Ca	?	Ti	Va	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	
	39,1	40	44 <sup>?</sup>	48	51	52,4	55	56	59	59	
	Cu	Zn	Ga <sup>?</sup>	?	As	Se	Br				
	63,5	65	68	71 <sup>?</sup>	75	78	80				
	Rb	Sr	It	Zr	Nb	Mo	?	Rn	Rh	Pd	
	85,4	87,5	87,6	90	94	95,8	99 <sup>?</sup>	103,5	104,1	106,2	
	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I				
	107,9	112	113	118	120	128	127				
	Cs	Ba	C	La	»	Di					
	132,6	137	137	139	»	147					
	?	?	Er	?	Ta	Wa	»	Os	Ir	Pt	
	165	169	170,6	173	182	184	»	198,6	196,7	196,7	
	Au	Hg	Tl	Pb	Bi						
	197	200	204	206,9	210						
				Th <sup>?</sup>	Ur <sup>?</sup>						
				233,9	240						

Figura 5. Taula periòdica de Mendeléiev segons la versió reproduïda al llibre *Nociones de química*, de Fernando Díaz Guzmán (Logronyo, 1891). L'autor afirma que «la clasificación propuesta [per Mendeléiev] no resiste a un severo análisis, viéndose que en una misma columna vertical, por ejemplo, la segunda, se juntan cuerpos como el litio, sodio y potasio, de propiedades tan afines, con el cobre, plata y oro, que las tienen tan diferentes [...]. En la columna del oxígeno aparecen cuerpos como éste, el azufre y el selenio, entre sí tan afines, separados por otros, tan desemejantes como el cromo, el molibdeno y el tungsteno [...]. Hay otros cuyos pesos atómicos no corresponden al grupo que figuran, como sucede con el yodo, situado después que el teluro, en vez de antes».



- (2011). «Pedagogia química y circulación de la ciencia: el sistema periódico de los elementos durante el siglo XIX». A: *Química: Historia, filosofía, educación*. Bogotá: Universidad Pedagógica, p. 45-69.
- BERTOMEU SÁNCHEZ, J. R.; GARCÍA BELMAR, A.; BENSUADE-VINCENT, B. (2002). «Looking for an order of things: textbooks and chemical classifications in nineteenth-century France». *Ambix*, núm. 49, p. 227-251.
- BERTOMEU SÁNCHEZ, J. R.; MUÑOZ, R. (2011). «Darwinismo inorgánico, pedagogia química y popularización de la ciencia: el sistema periódico en España a finales del siglo XIX». A: DÍAZ ROJO, J. A. (ed.). *La circulación del saber científico en los siglos XIX y XX*. València: IHMC, p. 25-63.
- BERZELIUS, J. J. (1845-1850). *Traité de chimie*. París: Firmin-Didot. 6 v.
- BRUSH, S. G. (1996). «The reception of Mendeleev's periodic law in America and Britain». *Isis*, núm. 87, p. 595-628.
- CAHOURS, A. (1855-1856). *Leçons de chimie générale élémentaire, professées à l'École Centrale des Arts et Manufactures*. París: Mallet-Bachelier. 2 v.
- DALTON, J. (2012). *El atomismo en química: un nuevo sistema de filosofía química*. Ed. a cura d'A. García Belmar. Textos d'I. Pellón González i A. J. Rocke. Sant Vicent del Raspeig: Publicacions de la Universitat d'Alacant.
- 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. Acompanyat d'un assaig d'U. Klein. Sant Vicent del Raspeig: Publicacions de la Universitat d'Alacant.
- GORDIN, M. D. (2004). *A well-ordered thing: Dmitrii Mendeleev and the shadow of the periodic table*. Nova York: Basic Books.
- HOEFER, F. (1845). *Nomenclature et classifications chimiques, suivies d'un lexique historique et synonymique comprenant les noms anciens, les formules, les noms nouveaux, le nom de l'auteur et la date de la découverte des principaux produits de la chimie*. París: J. B. Baillièere.
- KAJI, M.; KRAGH, H.; PALLÓ, G. (2015). *Early responses to the periodic system*. Oxford: Oxford University Press.
- KIM, M. G. (2003). *Affinity, that elusive dream: A genealogy of the chemical revolution*. Boston: Massachusetts Institute of Technology.
- LAVOISIER, A.-L. de (2003). *Tractat elemental de química*. Ed. a cura d'A. Nieto-Galán. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans: Eumo: Pòrtic.
- LUNDGREN, A.; BENSUADE-VINCENT, B. (2000). *Communicating chemistry: Textbooks and their audiences, 1789-1939*. Canton: Science History Publications.
- MACQUER, P. (1753). *Elémens de chymie théorique*. París: Hérisant.
- NEKOVAL-CHIKHAOUI, L. (1994). *La diffusion de la classification périodique de Mendeleïev en France entre 1869 et 1934*. Tesi doctoral. París: Université de Paris IX.
- RAMBERG, P. J. (2003). *Chemical structure, spatial arrangement: The early history of stereochemistry, 1874-1914*. Aldershot: Ashgate.
- RAMBERG, P. J.; NYE, M. J. (2015). «Introduction». *Annals of Science*, vol. 72, núm. 2: *Atomism and organic chemistry in context: Essays in honour of Alan J. Rocke*, p. 149-152.
- REGNAULT, V. (1836). «Essai d'une nouvelle classification des métaux d'après leur degré d'oxydabilité». *Annales de Chimie*, núm. 62, p. 337-388.
- ROCKE, A. (1984). *Chemical atomism in the nineteenth century: From Dalton to Cannizzaro*. Columbus: Ohio University Press.
- RODRÍGUEZ CARRACIDO, J. (1888). *Discursos leídos ante la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en la recepción pública del Sr. D. José Rodríguez Carracido*. Madrid: Vda. e Hijo de Aguado.
- SCERRI, E. (2006). *The periodic table: Its story and its significance*. Oxford: Oxford University Press.
- (2013). *La tabla periódica: una breve introducción*. Madrid: Alianza.
- SPRONSEN, J. W. (1969). *The periodic systems of chemical elements: A history of the first hundred years*. Amsterdam: Elsevier.
- TAYLOR, G. (2008). «Marking out a disciplinary common ground: the role of chemical pedagogy in establishing the doctrine of affinity at the heart of British chemistry». *Annals of Science*, núm. 65, p. 465-486.
- VENABLE, F. P. (1896). *The development of the periodic law*. Easton: Chemical Publishing.



**José Ramón Bertomeu Sánchez**

És historiador de la ciència i director de l'Institut Interuniversitari López Piñero de la Universitat de València. Ha estudiat els manuals de química del segle XIX i la seua recerca actual és la història dels productes tòxics durant els segles XIX i XX. És també director del programa de recerca HAR2015-66364-C2-2-P. El seu darrer llibre es titula *Entre el fiscal y el verdugo. Mateu Orfila y la toxicología del siglo XIX* (PUV, 2019). A/e: bertomeu@uv.es.