

# L'elaboració del concepte de substància química al llarg de l'educació secundària. De les propietats d'una substància a la seva composició i estructura

The elaboration of the concept of chemical substance throughout secondary education. From the properties of a substance to its composition and structure

Aureli Caamaño / Societat Catalana de Química



## resum

El concepte de substància química és un dels conceptes bàsics del currículum de química de l'educació secundària. La construcció d'aquest concepte es realitza a partir de conceptes com homogeneïtat, propietat característica, identitat química, composició elemental, estructura i interacció. El present article presenta una proposta de progressió d'aprenentatge del concepte de substància química mitjançant l'elaboració d'una sèrie de models macroscòpics, mesoscòpics, atomicomoleculars i electrònics.

## paraules clau

Substància química, espècie química, entitat química, estructura química, interacció.

## abstract

The concept of chemical substance is one of the basic concepts of the chemistry curriculum in secondary education. The construction of this concept is based on concepts such as homogeneity, characteristic property, chemical identity, elemental composition, structure and interaction. This article presents a proposal for the progression of learning of the concept of chemical substance by developing a series of macroscopic, mesoscopic, atomicomolecular and electronic models.

## keywords

Chemical substance, chemical specie, chemical entity, chemical structure, interaction.

## Introducció

El concepte de substància química és un dels conceptes centrals de la química, juntament amb el concepte de canvi químic. Molts autors (Raviolo, Garritz & Sosa, 2011; Johnson, 2014) han assenyalat aquesta importància i han defensat que l'ensenyament de la química hauria de parar més atenció a aquest concepte. Una sèrie de

treballs plantegen progressions dels aprenentatges del concepte de substància química (Johnson, 2014; Talanquer, 2020; Caamaño & Marchán, 2021). La terminologia emprada per tal de diferenciar termes com substància, substància química, substància pura, espècie química, element químic, substància elemental, substància composta i producte químic també ha rebut especial

atenció (Caamaño, 2015; Fernández-González, 2015; Kermen, 2021).

L'objectiu d'aquest article és aprofundir en la progressió de l'aprenentatge del concepte de substància química al llarg de l'educació secundària, parant atenció al procés de construcció del model macroscòpic i de models submicroscòpics successius, des del model mesoscòpic

cineticocorpuscular fins al model mesoscòpic electrònic.

### Materials i substàncies

La idea de *material* com un tipus de matèria que presenta unes propietats característiques és un punt de partida per arribar al concepte de substància.

#### Materials heterogenis i homogenis

Els materials es poden classificar en homogenis (presenten una sola fase) i heterogenis (presenten més d'una fase), tot i que molts tenen un caràcter intermedi –presenten homogeneïtat a ull nu, però no si són observats a través d'un microscopi. Aquests últims materials els anomenem *dispersions* i presenten una fase dispersa i una fase dispersant. Les fases són les parts homogènies d'un material que tenen propietats físiques uniformes. Poden ser sòlides, líquides o gasoses.

#### Materials formats per una o diverses substàncies

En els materials heterogenis és fàcil percebre que estan formats per diferents fases. Cada fase es caracteritza per ser sòlida, líquida o gasosa. Aquestes fases poden estar formades per un o més components o substàncies.

En els materials homogenis no és fàcil decidir si estan formats per una única substància o per diverses substàncies. L'aparença de l'aigua pura i d'una solució de sal comuna en aigua és idèntica, però una destil·lació ens mostra que la solució salina està formada per dos components o substàncies: aigua i sal.

#### Significat quotidià de substància versus el significat de substància química

Un dels primers aspectes que cal treballar és la diferència entre el significat de substància a la vida quotidiana i en química. A la vida quotidiana s'entenen com a substància molts materials que en realitat són mesclades de substàn-

cies; per exemple, es considera que l'aire, l'aigua mineral, el vi, l'oli o la cera d'una espelma són substàncies. En tots aquests casos, es pot mostrar experimentalment, aplicant mètodes de separació, que es tracta de materials homogenis formats per diverses substàncies. Per tant, una primera definició de *substància química* seria que és un material homogeni que no es pot separar en diverses substàncies quan se li apliquen mètodes físics de separació, com l'evaporació, la destil·lació, la cristallització, la sublimació, la cromatografia, etc.

### La caracterització macroscòpica de les substàncies químiques

Les substàncies químiques s'obtenen a partir de mesclades mitjançant mètodes de separació i després se'ls aplica generalment un procés de purificació.

#### La puresa d'una substància química es caracteritza per la constància de la temperatura de fusió o d'ebullició

La constància de la temperatura de canvi d'estat ha estat durant molt temps el criteri més utilitzat en la determinació de la puresa d'una substància. Actualment, també s'apliquen mètodes cromatogràfics i espectroscòpics per identificar les impureses d'una substància amb un gran poder de resolució.

#### La puresa de les substàncies químiques és un concepte ideal

A la pràctica, tota substància conté petites quantitats d'altres substàncies; per tant, la idea d'una *substància pura* és una abstracció que utilitzem com un concepte o model ideal en química (Fernández-González, 2015). Aquest fet es fa evident quan parlem de diferents *graus de puresa* d'una substància química.

*Una substància química té unes propietats característiques que permeten identificar-la*

Una substància química es caracteritza per tenir propietats intensives (densitat, temperatura de fusió, temperatura d'ebullició, solubilitat, etc.) que són pròpies de cada substància. Tanmateix, el valor d'aquestes propietats varia en variar la temperatura o la pressió. Per exemple, la densitat d'una substància varia amb la temperatura; les temperatures de fusió i d'ebullició d'una substància varien amb la pressió. Per tant, per identificar una substància a través de les seves propietats caldrà especificar les condicions de pressió i temperatura en les quals es mesuren.

D'altra banda, les propietats característiques d'una substància varien apreciablement quan la substància canvia d'estat. Per exemple, la densitat d'una substància líquida és generalment més petita que la de la substància en estat sòlid i la d'una substància gasosa pot ser mil vegades més petita que si es troba en estat líquid.

#### La conservació de la identitat de les substàncies amb els canvis físics

La variació de les propietats característiques d'una substància en canviar d'estat físic pot posar en dubte la conservació de la seva identitat. Com podem estar segurs que el vapor d'aigua i l'aigua líquida són la mateixa substància, si no tenen les mateixes propietats?

Un primer argument a favor de la conservació de la identitat de les substàncies amb els canvis físics és que aquests presenten reversibilitat. L'aigua líquida es pot congelar, però escalfant-la obtenim de nou aigua líquida. La sal comuna es dissol en aigua, però evaporant l'aigua obtenim de nou la sal. Aquesta reversibilitat ens fa pensar que la identitat de la substància es manté amb el canvi, tot i que variïn l'aspecte físic i les propietats de la substàn-

Qüestió clau	Explicació
<i>Per què cada substància química té unes propietats característiques diferents a les d'altres substàncies?</i>	Se suposa que les substàncies presenten propietats diferents perquè estan formades per partícules diferents. Per tant, podem pensar que la identitat d'una substància rau en el fet d'estar constituïda per un determinat tipus de partícules. Aquesta és una explicació que evidentment s'haurà de revisar i completar.
<i>Per què les propietats de les substàncies són diferents en els estats sòlid, líquid i gasós?</i>	Per explicar aquestes diferències construïm un model cineticocorpuscular de les substàncies per a cada estat, imaginant com estan distribuïdes les partícules a l'espai, quin tipus de moviment tenen i quines interaccions s'estableixen entre elles. Aquestes interaccions suposem que són forces atractives que disminueixen amb la distància.
<i>Quina és la naturalesa de les forces atractives entre les partícules?</i>	Hi ha evidències experimentals del comportament elèctric de la matèria que ens permeten fer la hipòtesi que deuen ser interaccions elèctriques i que, per tant, són forces que disminueixen amb la distància (Martínez Torregrosa <i>et al.</i> , 2020). Tanmateix, de moment, podem desenvolupar el model sense conèixer la naturalesa d'aquestes forces.
<i>Per què es conserva la massa en els canvis d'estat?</i>	La conservació de la massa s'explica si suposem que les partícules de cada substància tenen una massa determinada i invariable.
<i>Per què és necessari aportar energia per a la fusió d'una substància?</i>	Quan una substància es fon augmenta la separació entre les seves partícules i aquest procés implica «vèncer» les forces d'atracció entre elles. El valor de l'energia que s'aporta en la fusió ens permet estimar la intensitat de les forces d'atracció entre les partícules.
<i>Com s'explica que la temperatura es mantingui constant durant la fusió i l'ebullició d'una substància, malgrat que s'aporta energia tèrmica?</i>	Tota l'energia que es proporciona s'utilitza per separar les partícules de la substància, és a dir, per augmentar l'energia potencial relativa al tipus d'interacció que existeix entre elles.
<i>Per què tenen punts de fusió i d'ebullició diferents les substàncies?</i>	Els diferents punts de fusió o d'ebullició de les substàncies s'expliquen en termes de la diferent intensitat de les forces d'atracció entre les seves partícules. Com més intenses són aquestes forces, més alta serà la temperatura de fusió.
<i>Per què considerem que es manté la identitat de les substàncies en canviar d'estat físic, malgrat que les seves propietats varien?</i>	La persistència de la identitat de les substàncies en els canvis físics s'explica argumentant que les partícules que formen les substàncies no es modifiquen en els canvis físics, tot i que varia la seva posició relativa, el tipus de moviment que tenen i la intensitat de les interaccions entre elles.

Quadre 1. Elaboració del model cineticocorpuscular de substància química.

cia. Tanmateix, alguns canvis químics també són reversibles, malgrat que varia la naturalesa de les substàncies.

### El model cineticocorpuscular de les substàncies

El primer model submicroscòpic de substància química que

construïm a l'escola és el model cineticocorpuscular. En aquest model considerem que les substàncies estan formades per partícules molt petites que tenen massa, estan en constant moviment i interaccionen entre elles (s'exerceixen forces atractives). A més, se suposa que aquestes

partícules són diferents en cada substància: tenen diferent massa i poden exercir entre elles forces d'atracció de diferent intensitat. Aquest model ha de poder explicar la sèrie de fets que acabem de descriure, és a dir, ha de poder respondre la sèrie de qüestions que es plantegen en el quadre 1.

## La composició elemental de les substàncies: substàncies compostes i substàncies elementals

A diferència dels canvis físics de les substàncies, hi ha canvis que sí que impliquen canvis en la naturalesa de les substàncies. Quan escalfem fortament les substàncies, fem passar corrent elèctric a través d'elles o posem en contacte dues substàncies o les seves solucions podem observar canvis que atribuïm a processos de transformació d'unes substàncies en altres de diferents (Rodríguez-Arteche & Martínez-Aznar, 2019; Izquierdo, Merino & Marzábal, 2021). Aquestes transformacions les anomenem *reaccions químiques*.

La interpretació macroscòpica d'una reacció química requereix identificar les substàncies que reaccionen i les que es formen (Caamaño & Corominas, 2020). Aquesta interpretació no és senzilla, entre altres coses perquè moltes vegades hi intervenen substàncies gasoses no visibles i perquè els alumnes tendeixen a considerar que els canvis de propietats que s'observen es poden produir sense que canviï la identitat de les substàncies. Per exemple, el canvi de coloració i de textura de la superfície del ferro quan s'oxida s'atribueix a un canvi de propietats del ferro.

### Substàncies compostes i substàncies elementals

Entre les diferents reaccions que poden sofrir les substàncies n'hi ha unes que poden aportar informació sobre la seva composició. Es tracta de les reaccions de descomposició. De la mateixa manera que escalfar materials homogenis ens ha portat a constatar que podien estar formats per diferents substàncies, un escalfament fort de les substàncies o el pas del corrent elèctric a través d'elles ens permet arribar a la conclusió que

hi ha substàncies que es poden descompondre en altres de més simples i substàncies que no es poden descompondre. Les primeres les anomenen *substàncies compostes* o *compuestos* i les segones, *substàncies elementals*.

### Substàncies elementals i elements químics

Per mitjà de la descomposició i la formació de l'aigua, Lavoisier va mostrar que estava formada per les substàncies simples hidrogen i oxigen. Lavoisier va identificar les substàncies elementals (*corps simples* en la seva terminologia) hidrogen i oxigen com els elements constituents de l'aigua. Tanmateix, si pensem com formen part l'hidrogen i l'oxigen del compost aigua, és evident que no pot ser de la mateixa manera que com estan presents en l'hidrogen gas i en l'oxigen gas; altrament no hi hauria diferència entre l'aigua i una mescla d'hidrogen i oxigen. Això ens obliga a establir una diferència entre els conceptes de *substància elemental* i *element*. De moment, podem considerar com a *element químic* el tipus de matèria que constitueix cada substància elemental, a l'espera de poder formular una definició més precisa basada en un model atomicomolecular. D'altra banda, la «reversibilitat» de la reacció de descomposició i formació de l'aigua ens permet inferir que els elements d'un compost són unitats estables que es conserven en les reaccions químiques.

### Els compostos tenen una composició elemental constant

El coneixement de la composició elemental (en % en massa) d'un compost s'obté mitjançant el procés d'anàlisi (descomposició) o mesurant les masses de combinació de les substàncies elementals en la reacció de formació del compost. Proust va observar la

composició constant dels elements que formen un compost i ho va expressar a través de l'enunciat que es coneix com a *lleï de les proporcions definides* o *lleï de Proust*. D'aquesta manera la *composició elemental constant* va passar a ser una característica fonamental de la definició d'una substància química i un dels fets en què es va fonamentar el primer model atomicomolecular de les substàncies.

## Un primer model atomicomolecular de les substàncies: àtoms i molècules

L'explicació de l'existència de substàncies elementals i compostes, de la composició elemental fixa dels compostos i del canvi químic en general requereix modificar el model corpuscular de les substàncies, fent hipòtesis sobre la diferent naturalesa de les partícules que formen les substàncies elementals i les substàncies compostes (Caamaño, 2019).

Aquesta modificació pot fer-se amb una hipòtesi similar a la que va fer el químic anglès John Dalton quan va exposar la seva teoria atòmica de la matèria. Dalton va suposar que si una substància elemental no es pot descompondre és perquè està formada per partícules indivisibles (àtoms). Per explicar que un compost es pogués descompondre en substàncies elementals va suposar que estava format per «àtoms compostos» (que ara en diem molècules) que en trencar-se proporcionaven els àtoms que formaven les substàncies elementals. Per tant, suposem que la unió entre els àtoms que formen una molècula és molt forta.

Dalton va considerar que les substàncies elementals estaven formades per àtoms iguals i que els compostos estaven constituïts per molècules d'àtoms diferents. Una de les primeres modifica-

cions que cal fer en aquest model és acceptar que les substàncies elementals també poden estar formades per *molècules d'àtoms iguals*.

En la terminologia de Dalton *element* és tant la substància elemental com el tipus d'àtom que forma aquesta substància elemental. Aquesta ambigüitat o polisèmia del terme *element* encara perdura actualment, tot i que la recomanació és evitar-la. *Substància elemental* és un terme macroscòpic que fa referència a un tipus de substància, mentre que *element* (un tipus d'àtom) és un terme abstracte que té un caràcter atòmic o mesoscòpic (Caamaño, Guitart & Grapí, 2019).

### El model mesoscòpic: estructures multimoleculares i estructures gegants

La següent modificació que cal fer en el model de Dalton és adonar-se que els àtoms es poden

unir d'una altra manera que no condueix a la formació de molècules, sinó a estructures ininterrompudes d'àtoms fortament units entre ells que s'anomenen *estructures gegants*. Aquestes estructures poden existir tant en les substàncies elementals com en els compostos.

Així doncs, hi ha substàncies formades per *àtoms lliures* (els gasos nobles), substàncies formades per *molècules* (que podrien estar en qualsevol estat) i substàncies formades per *àtoms*, que formen part d'*estructures gegants*, que només podrien existir de forma ordenada en estat sòlid).

El pas següent en la modelització de l'estructura de les substàncies és preguntar-se com estan organitzats a nivell mesoscòpic els àtoms o les molècules i quines interaccions existeixen entre ells en les estructures multiatòmiques o multimoleculares (fig. 1).

*Fent hipòtesis sobre la intensitat de la interacció entre els àtoms i entre les molècules*

Hi ha un conjunt de substàncies que a temperatura ambient són gasos, líquids o sòlids de baixa temperatura de fusió. D'aquest fet podem deduir que són substàncies en què les forces d'atracció entre les partícules són febles. Quin tipus de partícules poden ser? D'acord amb l'estructura que hem suposat que té un gas en el model cineticocorpúscular només poden estar formades per àtoms o molècules lliures. Per tant, arribem a la conclusió que les forces intermoleculares han de ser febles en les substàncies moleculars. A partir d'ara inclourem en aquesta categoria els gasos nobles, com si estiguessin formats per molècules monoatòmiques.

Per contra, la intensitat de les unions entre els àtoms que formen les molècules ha de ser molt forta, ja que es mantenen

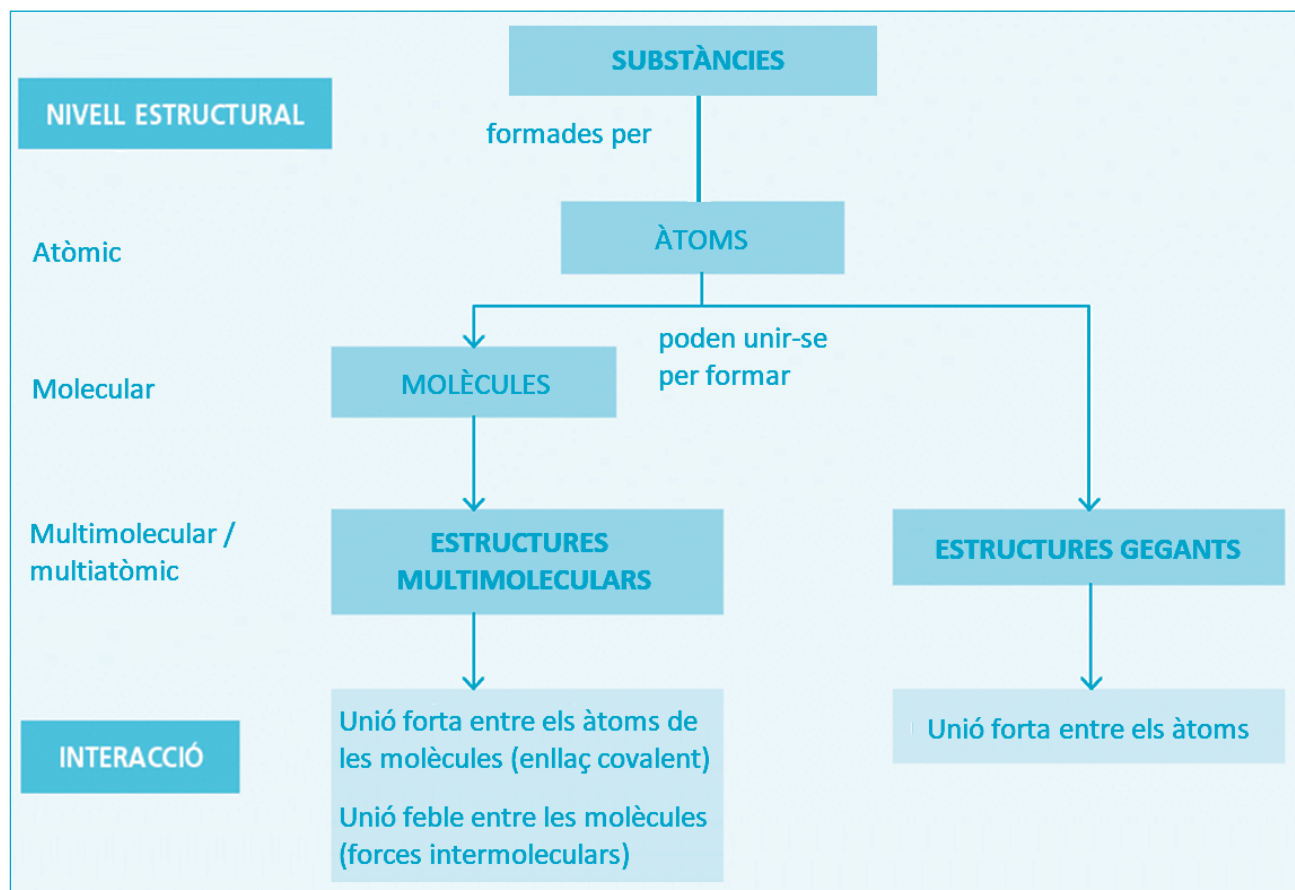


Figura 1. Estructures de les substàncies: estructures multimoleculares i estructures gegants (multiatòmiques).



inalterades durant els canvis d'estat. Com que els àtoms que formen una molècula es troben a una distància mitjana fixa, anomenarem *enllaç* el tipus d'unió que les manté unides. Aquests tipus d'enllaços els anomenem *enllaços covalents*, perquè expliquen la valència o capacitat de combinació dels àtoms per formar molècules i perquè, com veurem més endavant, es produeixen entre àtoms d'elements no metàl·lics.

Un altre grup de substàncies es caracteritzen per ser substàncies sòlides d'alta temperatura de fusió. Per explicar-ho, podem suposar que estan formades per estructures gegants amb àtoms units per forces o unions molt intenses. La interacció entre els àtoms en aquestes estructures podria ser de la mateixa intensitat que la interacció que manté units els àtoms en una molècula, i, fins i tot, de la mateixa naturalesa, però això encara no ho sabem.

#### Tres tipus d'estructures gegants

Tanmateix, quan indaguem les propietats de substàncies sòlides amb punts de fusió molt alts, és a dir, substàncies que considerem formades per estructures gegants, ens trobem amb diferències molt apreciables (Pinto, 2016). D'acord amb aquestes diferències de propietats, podem establir tres grups de substàncies amb estructures gegants:

— *Sòlids diamantins*. Sòlids molt durs, amb punts de fusió elevadíssims, insolubles i que no condueixen el corrent elèctric ni en estat sòlid ni líquid, com el diamant i el diòxid de sílice.

— *Sòlids salins*. Sòlids durs, però fràgils, que no condueixen el corrent elèctric en estat sòlid, però sí en estat líquid o en solució aquosa, com per exemple el clorur de sodi.

— *Sòlids metàl·lics*. Sòlids, en general, de gran densitat, dúctils i

mal·leables, amb lluentor metàl·lica, que condueixen l'electricitat en estat sòlid i líquid. Són metalls.

#### Tres tipus de partícules: àtoms, molècules i ions, i quatre tipus d'interaccions

Aquesta diferència de propietats tan notable ens obliga a establir tres models diferents d'estructura gegant amb partícules i/o interaccions diferents (Caamaño, 2019; Taber, 2016).

Els sòlids diamantins els imaginem formats per la unió d'àtoms per enllaços com els que existeixen en una molècula, és a dir, per *enllaços covalents*; per això els anomenem *sòlids covalents*. No disposem encara d'una explicació de l'*enllaç covalent*.

Els sòlids salins, com el clorur de sodi, que condueixen el corrent elèctric en estat líquid, els imaginem formats per àtoms amb càrrega (*ions*) de signe contrari. Per això els anomenem *sòlids iònics*. La interacció entre els ions és de tipus electrostàtic. De forma genèrica, l'anomenem *enllaç iònic*.

Els *sòlids metàl·lics* els imaginem formats per àtoms units en estructures molt compactes, però no podem construir de moment un model que expliqui la seva mal·leabilitat i conductivitat elèctrica. Tanmateix, anomenem *enllaç metàl·lic* la interacció existent entre els àtoms en aquesta estructura, malgrat que encara no la puguem explicar.

Notem que hem hagut de suposar l'existència d'una nova partícula: els ions. Per tant, hem establert ja tres tipus de partícules o entitats químiques a escala submicroscòpica: els àtoms, les molècules i els ions. I quatre tipus d'interaccions: forces intermoleculares, enllaços covalents, enllaç iònic i enllaç metàl·lic. La fig. 2 mostra les partícules que formen les estructures multimoleculares i les estructures gegants i el tipus d'interacció entre elles.

*Formes al·lotròpiques: un mateix element forma substàncies elementals diferents*

La modelització de l'estructura de les formes al·lotròpiques d'un element constitueix un dels millors exemples en què es pot evidenciar que el concepte de substància està associat a l'estructura i no tan sols a la composició química. El carboni diamant i el carboni grafit estan tots dos formats per àtoms de carboni, però les seves propietats són molt diferents perquè són diferents la seva estructura i el tipus d'interacció entre alguns dels seus àtoms. Són, per tant, dues substàncies elementals diferents, malgrat estar formades pel mateix tipus d'àtom.

#### Revisió electrònica dels models de molècula, estructura multimolecular i estructura gegant

El pas següent és modelitzar l'estructura interna de l'àtom a partir de les evidències experimentals disponibles, que s'inicien amb el descobriment de la primera partícula subatòmica, l'electró, i prossegueixen amb la caracterització dels protons i neutrons en el nucli.

Un cop hem elaborat un model per a l'estructura interna de l'àtom (Caamaño, 2018), que imaginem format per un nucli positiu (protons i neutrons) i electrons negatius distribuïts en capes, és possible interpretar des d'una perspectiva electrònica la càrrega elèctrica dels ions, la formació d'ions, l'enllaç covalent, la polaritat i geometria de les molècules, la interacció existent en els sòlids metàl·lics –entre ions positius i electrons de valència lliures– i les forces intermoleculares i els enllaços d'hidrogen. Així doncs, la modelització a nivell subatòmic o electrònic dels àtoms possibilita l'elaboració de models dels diferents tipus d'enllaç i la revisió de la modelització molecu-

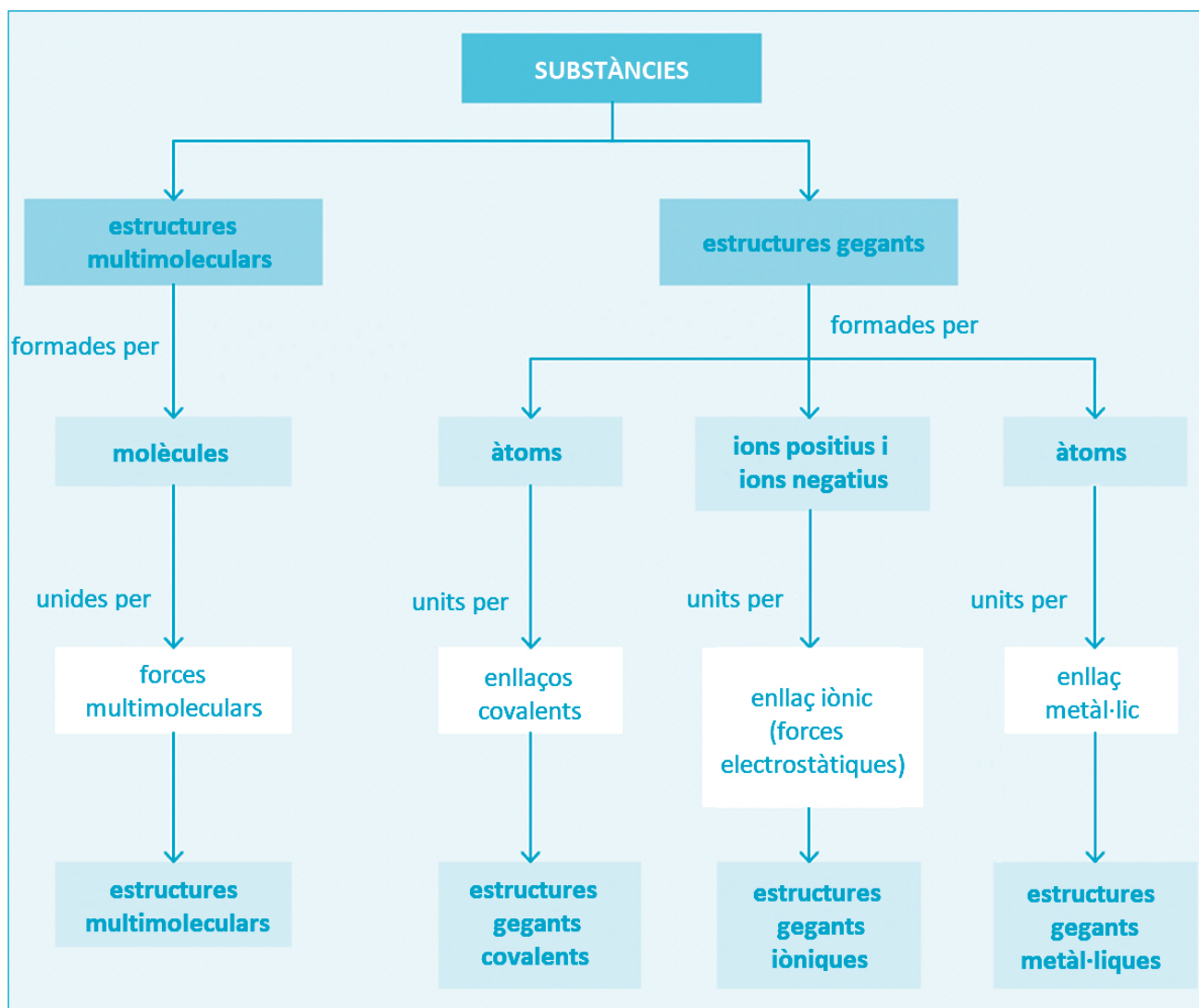


Figura 2. Estructura de les substàncies. Estructures multimoleculars i estructures gegants: covalents, iòniques i metàl·liques.

lar i mesoscòpica (multiatòmica i multimolecular) fetes amb anterioritat (Caamaño, 2016a; 2016b) (fig. 3).

El coneixement de l'estructura interna de l'àtom també permet interpretar les valències químiques dels elements, establir una nova definició d'element químic en funció del nombre atòmic, explicar l'existència d'isòtops i la periodicitat de les propietats de les substàncies elementals i dels àtoms en termes de la seva estructura electrònica (Caamaño, Guitart & Grapí, 2019), així com el comportament químic de les substàncies elementals i dels compostos.

També és possible progressar en la modelització dels diferents tipus de reaccions químiques

(Caamaño [coord.], 2021) –reaccions àcid-base, reaccions d'oxidació-reducció i reaccions de precipitació–, i abordar la modelització de diferents famílies de substàncies, com les substàncies àcides i bàsiques; les substàncies oxidants i reductores, etc.

#### Substàncies químiques, espècies químiques i entitats químiques

Al principi les substàncies, després d'un procés d'obtenció i purificació, eren caracteritzades per una anàlisi elemental i la determinació de les seves propietats físiques i químiques. Les noves tècniques de determinació de l'estructura de les substàncies han permès caracteritzar-les per l'estructura, és a dir, identificar les

espècies químiques que les constitueixen. D'aquesta manera el concepte de substància química s'ha anat desplaçant cap al d'espècie química (Chamizo, 2017). La IUPAC (2015) defineix *espècie química* de la manera següent: «Un conjunt d'entitats moleculars químicament idèntiques que poden tenir el mateix conjunt de nivells d'energia molecular en l'escala de temps d'un experiment o observació. El terme s'aplica per igual a un conjunt d'entitats atòmiques químicament idèntiques o a un conjunt d'unitats estructurals en una xarxa cristal·lina.»

La definició de la IUPAC d'espècie química, en referir-se a un conjunt d'entitats moleculars atòmiques o iòniques, se situa en







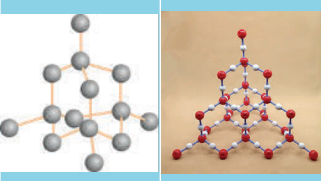
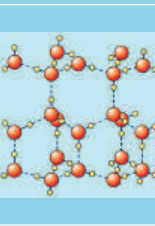
SUBSTÀNCIA							
Sofre(s) / Aigua(s)		Diamant / Diòxid de silici(s)		Clorur de sodi(s)		Coure(s)	
							
Estructura i partícules							
Multimolecular		Gegant covalent		Gegant iònica		Gegant metàl·lica	
							
Molècules S <sub>8</sub>		Molècules H <sub>2</sub> O		Àtoms C Àtoms Si i àtoms O		Ions sodi (Na <sup>+</sup> ) i ions clorur (Cl <sup>-</sup> )	
						Ions coure (Cu <sup>2+</sup> ) i electrons de valència deslocalitzats	
Tipus d'interacció							
Forces intermoleculars Enllaços d'hidrogen (en el cas de l'aigua)		Enllaç covalent (forces electrostàtiques entre els electrons compartits i els nuclis)		Enllaç iònic (forces electrostàtiques entre els ions)		Enllaç metàl·lic (forces electrostàtiques entre els ions positius i els electrons de valència deslocalitzats)	

Figura 3. Estructures multimoleculars i estructures gegants (covalents, iòniques i metàl·liques): partícules constituents i naturalesa de la interacció entre elles.

un nivell estructural mesoscòpic. Aquest conjunt d'entitats ha de ser suficientment nombrós perquè les propietats físiques i espectroscòpiques del conjunt siguin detectables, tot i que no tant com perquè l'espècie sigui perceptible a simple vista. El terme *espècie química* no sempre té correspondència a nivell macroscòpic. Qualsevol substància està formada per espècies químiques, però no totes les espècies químiques es poden presentar en forma de substància; per exemple, podem parlar de l'espècie química «io sodi(s)» o «io sodi(aq)», però no de la substància «io sodi» (Caamaño, 2015).

En un article publicat recentment, Kermen (2021) estableix les definicions que s'han adoptat per als termes de *substància química*, *espècie química* i *entitat química* en el currículum de química francès. Les *espècies químiques* poden ser atòmiques, moleculars, aniòniques, catiòniques i iòniques. Per exemple, la substància química sacarosa està formada per l'espècie molecular sacarosa; el clorur de sodi està format per l'espècie química iònica (NaCl(s)), que a l'hora està constituïda per les espècies químiques catiòniques (Na<sup>+</sup>(s)) i aniòniques (Cl<sup>-</sup>(s)). Les molècules de sacarosa, i els ions Na<sup>+</sup> i Cl<sup>-</sup> són entitats químiques.

Així, doncs, les entitats químiques són els àtoms, les molècules i els ions, que hem estat anomenant *partícules* al llarg de l'article.

#### A tall de conclusió

Al llarg d'aquest article hem presentat com es poden construir models de substància química que, partint d'un model macroscòpic basat en les propietats, permeten avançar en el coneixement de l'estructura de les substàncies fent hipòtesis sobre la naturalesa de les seves partícules constitutives, el seu moviment i les seves interaccions, seguint la seqüència de progressió següent:



model mesoscòpic cineticocorpuscular; model macroscòpic basat en la composició química elemental; model atomicomolecular; model mesoscòpic (estructures multimoleculares i estructures gegants: covalents, iòniques i metàl·liques); model subatòmic o electrònic dels àtoms; ions i molècules, i model estructural mesoscòpic electrònic.

En aquest recorregut hem parat atenció a conceptes com homogeneïtat, propietat característica, canvi d'estat, identitat química, reacció química, composició elemental, estructura i interacció, que juguen un paper important en aquest procés de construcció. Al final hem fet una consideració sobre com els nous mètodes de determinació de l'estructura de les substàncies porten al concepte d'espècie química, que es pot situar en un nivell intermedi entre els de substància química i entitat química.

### Referències

- CAAMAÑO, A. (coord.) (2021). «Tipos de reacción química». *Alambique*, núm. 103.
- CAAMAÑO, A. (2015). «Una reflexión conceptual y lingüística en torno a las diferentes denominaciones de las sustancias químicas». *Alambique*, núm. 82, p. 9-16.
- (2016a). «Un enfoque para vencer errores y ambigüedades. Enlace químico y estructura de las sustancias en secundaria». *Alambique*, núm. 86, p. 8-18.
- (2016b). «Secuenciación didáctica para el aprendizaje de los modelos de enlace». *Alambique*, núm. 86, p. 39-45.
- (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.
- CAAMAÑO, A.; COROMINAS, J. (2020). «Modelització macroscòpica dels canvis físics i químics. Un diàleg constant entre observació, interpretació, experimentació i argumentació». *Educatió Química EduQ*, núm. 27, p. 19-26.
- CAAMAÑO, A.; GUITART, F.; GRAPÍ, P. (2019). «L'ensenyament del concepte d'element químic i de la taula periòdica a l'educació secundària». *Educatió Química EduQ*, núm. 25, p. 32-40.
- CAAMAÑO, A.; MARCHÁN, I. (2021). «La progresión en el aprendizaje de los conceptos de sustancia y reacción química en secundaria». *Alambique*, núm. 103, p. 8-15.
- CHAMIZO, J. A. (2017). «La cuarta revolución química (1945-1966). De las sustancias a las especies químicas». *Educación Química*, núm. 28, p. 202-210.
- FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Manuel (2015). «Reflexiones epistemológicas sobre el concepto de sustancia pura». *Alambique*, núm. 82, p. 24-31.
- IZQUIERDO, M.; MERINO, C.; MARZÁBAL, A. (2021). «¡La reacción química emociona! La importancia del lenguaje en la modelización del cambio químico». *Alambique*, núm. 103, p. 16-22.
- JOHNSON, P. (2014). «An evidence-based approach to introductory chemistry». *School Science Review*, vol. 95, núm. 353, p. 89-97.
- KERMEN, I. (2021). «Espèce chimique, entité chimique, substance chimique? Reflexion critique autour du glossaire d'accompagnement des programmes de chimie 2019». *Bulletin de l'union des professeurs de physique et de chimie*, vol. 115, núm. 1030, p. 29-41.
- MARTÍNEZ TORREGROSA, J.; ÁLVAREZ, J. F.; LIMINANA, R.; MENARGUES, A.; NICOLÁS, C.; REY, A.; ROSA, S.; SAVALL, F. (2020). «Enseñanza sobre gases, líquidos y sólidos. Una progresión hacia la estructura de todas las cosas». *Alambique*, núm. 101, p. 8-15.
- PINTO, G. (2016). «Identificación y comprensión de la estructura y el tipo de enlace». *Alambique*, núm. 86, p. 28-33.
- RAVIOLO, A.; GARRITZ, A.; SOSA, P. (2011). «Sustancia y reacción química como conceptos centrales en química. Una discusión conceptual, histórica y didáctica». *Revista Eureka de Divulgación y Enseñanza de las Ciencias*, vol. 8, núm. 3, p. 240-254.
- RODRÍGUEZ-ARTECHE, I.; MARTÍNEZ-AZNA, M. M. (2019). «¿Qué ocurre en esta reacción? De indagar a modelizar». *Alambique*, núm. 97, p. 27-34.
- TABER, K. S. (2016). «Enlace químico y estructura atómico-molecular en secundaria». *Alambique*, núm. 86, p. 19-27.
- TALANQUER, V. (2020). «La progresión de los aprendizajes sobre la composición, estructura y transformación química de la materia». *Educatió Química EduQ*, núm. 27, p. 4-11.



**Aureli Caamaño Ros**

És doctor en química per la Universitat de Barcelona (UB) i graduat en humanitats per la Universitat Pompeu Fabra (UPF). Ha estat catedràtic de física i química de secundària i ha impartit nombrosos cursos de formació del professorat a Espanya i Llatinoamèrica. És coordinador i coautor del llibre *Enseñar Química. De las sustancias a la reacción química* i coeditor de les revistes *Alambique* i *Educatió Química EduQ*.  
A/e: aurelicaaamano@gmail.com