

De com l'àtom esdevé una peça de LEGO. Una visió crítica

How the atom becomes a LEGO brick. A critical vision

Claudi Mans i Teixidó / Universitat de Barcelona. Facultat de Química. Departament d'Enginyeria Química



resum

Les analogies com a eines per explicar les propietats de les substàncies i els objectes s'usen des de l'antiguitat. En l'article s'analitzen diversos treballs publicats recentment que proposen l'ús de peces de LEGO com a anàlogues d'àtoms per tal de modelitzar l'estequiometria de reaccions químiques per part d'alumnes d'11 a 12 anys. S'analitzen amb un cert detall les diverses concepcions errònies que aquesta analogia pot induir als estudiants sobre estructures moleculars, cinètica i altres conceptes químics que l'analogia no permet explicar.

paraules clau

LEGO, analogia didàctica, àtom, molècula, química.

abstract

Since the antiquity, the analogies have been used as a tool to explain the properties of the substances and objects. In this article, several recently published works are analyzed proposing the use of pieces of LEGO as analogs of atoms in order to model the stoichiometry of chemical reactions for 11 to 12-year-old students. This analogy can induce several misconceptions to pupils about molecular structures, kinetics and other chemical concepts that the analogy cannot explain.

keywords

LEGO, didactic analogy, atom, molecule, chemistry.

Analogies per explicar l'estructura de la matèria

Des del bell començament de la filosofia i de la ciència s'han fet servir representacions esquemàtiques o analogies per tal de visualitzar i interpretar de forma intel·ligible les propietats de les substàncies i dels objectes. S'accepta que Demòcrit i el seu mestre Leucip foren els primers a relacionar de manera mecanística les propietats macroscòpiques de la matèria amb la seva composició i estructura microscòpica. Com es podien explicar els canvis visibles del nostre entorn quan, segons els filòsofs precedents, la matèria és una i immutable? Van postular l'existència

dels àtoms com a objectes eterns i amb tres propietats bàsiques: la mida, la forma i la massa. La resta de les propietats percebudes, com el color, el gust, la duresa o la solubilitat, les expliquen les interaccions dels àtoms de la substància entre ells, o entre els seus àtoms i els del nostre cos. Per exemple, una substància seria sòlida perquè els seus àtoms tindrien ganxos que els unirien entre ells. O una substància seria dolça perquè els seus àtoms serien rodons i passarien per la llengua i pel paladar lliscant sense agredir-lo. Demòcrit va postular també l'existència del buit, un concepte discutit a totes les èpoques.

Epicur i el seu deixeble Lucreci van acceptar aquestes idees, que desenvoluparen mitjançant analogies. Per exemple, a la seva obra bàsica *De Rerum Natura*, Lucreci compara la combinació d'un nombre finit de formes atòmiques amb les lletres de l'alfabet i la formació de paraules.

En aquestes explicacions ja trobem presents els dos mecanismes de reflexió sobre què és i com funciona la natura: d'una banda, l'explicació de les propietats de les substàncies o dels objectes a partir de les estructures del seu interior, visualitzades o simplement postulades; de l'altra, l'ús d'analogies per comprendre l'estructura i les propie-

tats d'un sistema desconegut, mitjançant la comparació amb l'estructura i les propietats d'un sistema conegut.

L'explicació d'allò macroscòpic mitjançant el coneixement de les estructures microscòpiques, nanoscòpiques o atomicomoleculares ha estat un objectiu científic que ha anat progressant amb el temps, i en gran mesura en els darrers anys: tota mena de microscòpies òptiques, electròniques, de força atòmica o d'efecte túnel; tècniques d'anàlisi de superfície, difracció de raigs X i moltes d'altres, així com tècniques de tractament de dades, permeten visualitzar fins els àtoms constituents dels materials i manipular-los un a un. Amb aquest arsenal, avui hi ha un camí força ben estructurat per explicar les propietats d'un objecte o d'una substància (com ara una taula o la llet) com a format per diferents materials juxtaposats (metalls, vidre, plàstic, etc.) o format per la barreja més o menys íntima de substàncies: la llet és una emulsió de greixos en una suspensió de proteïnes disperses en una dissolució d'aigua i lactosa. I cada una d'aquestes substàncies està formada (noteu la polisèmia del terme *formar*) per estructures de diferents tipus: un metall és una xarxa cristal·lina d'àtoms compartint els electrons externs; un vidre és una estructura covalent no del tot regular, amb una xarxa bàsica de tetraedres de silicat i àtoms metàl·lics amb enllaços covalents entre ells, i un plàstic és una juxtaposició de macromolècules de polímers unides entre elles per forces de Van der Waals, barrejades amb altres molècules que li donen color o resistència mecànica. En els tres casos, podem explicar les propietats macroscòpiques a partir de les estructures atomicomoleculares. És la moderna ciència de materials.

Per a estructures biològiques, l'esquema de macro a micro i viceversa és una mica diferent. Un organisme macro (el lector, per exemple) es pot imaginar constituït per diferents «objectes» (teixits, òrgans), cada un format per altres objectes, les cèl·lules, formada cada una per objectes com ara nuclis o mitocondris, formats encara per objectes menors com ara cromosomes o membranes, i aquests darrers formats per molècules de DNA o de fosfolípids. Aquí arribem a l'àmbit atomicomolecular, format per una cadena d'«objectes» que arriba molt més avall que en el cas de les estructures vistes abans.

En ambdós casos, però, al final s'expliquen les estructures i propietats de les matèries, substàncies, objectes i organismes a partir dels àtoms com a unitats elementals. Per descomptat, a pràcticament cap substància o objecte trobem els àtoms com a tals, sinó entitats derivades dels àtoms: ions o nuclis d'àtoms envoltats dels seus electrons més interns, però amb els electrons externs compartits amb altres àtoms. Aquestes entitats atòmiques no tenen les mateixes propietats dels àtoms dels quals deriven, naturalment. Per això l'afirmació que «la matèria és constituïda per àtoms» requereix una doble matisació: la primera, que l'expressió *constituïda per* (com hem dit abans de l'expressió *format per*) no es refereix a una simple juxtaposició, sinó a la creació de noves realitats físiques, com són les molècules o les xarxes cristal·lines. I la segona matisació és que allò que constitueix aquestes molècules o xarxes no són àtoms, sinó realitats diferents que es poden imaginar derivades dels àtoms, però que no ho són. Podríem afegir, a més, que la immensa majoria de les molècules o dels ions compostos no pot ser obtinguda a partir de la reac-

ció química entre els elements dels àtoms que la constitueixen.

L'ús de les analogies com a eina didàctica ha estat analitzat de forma sistemàtica per diversos autors, i no hi ha dubte de la seva eficàcia quan són usades correctament. Desenvoluparem aquí una idea que no és pas moderna, perquè ja és present de forma embrionària a Demòcrit: l'analogia entre l'estructura de la matèria i les construccions de LEGO, amb les peces unitàries com a unitats elementals o àtoms.

LEGO: el joc

El danès Ole Kirk Christiansen, després de diversos intents, va dissenyar cap al 1930 un joc de blocs encastrables de fusta, amb protuberàncies a la cara superior (*mascles*) que permetien fer un nombre limitat de construccions encastrant-se a la cara inferior (*femella*) d'altres blocs. El nom LEGO ve de les paraules daneses *leg godt*, 'juga bé'. El 1949 van començar a usar el plàstic, acetat de cel·lulosa. El 1958 van dissenyar la novetat crucial: les protuberàncies cilíndriques buides de la cara inferior dels blocs, que permetien encastraments més resistents que abans. Mai, però, es van fer peces doble-mascle o doble-femella, que haurien permès més versatilitat a costa de duplicar el nombre de peces a fabricar.

El 1963 van canviar al polímer ABS (terpolímer acrilonitril-butadiè-estirè), un material excel·lent resistent a la calor, als àcids i a les bases, poc deformable i amb uns colors molt estables. Amb el temps, LEGO va ser imitat i fins i tot superat. Per exemple, el 1972, EXIN va dissenyar el joc TENTE, una còpia de LEGO més versàtil gràcies a un orifici central a cada protuberància, però van haver de tancar en perdre les demandes judicials de plagi. Al començament, les peces eren de formes genèriques molt simples: paral-

lelepípedes de diferents gruixos, amplàries, alçàries i colors, cilindres, plaques i poca cosa més. Amb els anys, han augmentat moltíssim el nombre i la varietat de peces disponibles, com ara finestres, rodes, eixos o figures humanes completes des del 1974. Moltes de les peces actuals són dissenyades *ad hoc* per construir una estructura determinada, en una filosofia molt llunyana de l'original. En l'analogia que es comenta aquí, interessen les peces de LEGO genèriques del sistema original del 1963.

És trivial usar peces de LEGO per a la maquetació en tota mena de camps i també en química. Amb LEGO s'han fet taules periòdiques, com la de Kuntzleman (2013); escultures matemàtiques en 3D (Lipson, 2006), i s'han representat molècules de tota mena. Des de la molècula d'aigua, H_2O , feta amb un bloc vermell de 2×4 i dos blocs blancs de 2×1 , fins a la molècula de DNA. Efectivament, Harshbarger (2001, 2003), professional de la construcció de tota mena de figures amb peces de LEGO, ha fet dues molècules de DNA, l'una amb eix central auxiliar i l'altra, més petita, sense. En el seu cas, les peces de LEGO no corresponen a molècules ni a àtoms: són simples unitats constructives. Però, per a la modelització de molècules, són molt millors els models moleculars de barres i esferes o d'espai ple (QuimiTube.com, 2014).

El complet treball dels científics de la WISC (2012) és de modelització, i usen cada peça de LEGO com una molècula. Les peces de LEGO els permeten construir tota mena de models d'estats sòlid, líquid, gas, nanoestructures, cristalls líquids i moltes altres estructures. Aquests models de LEGO no són necessàriament més aclaridors o explicatius que altres models fets amb dibuixos en 3D.

El concepte constructiu de LEGO també ha inspirat científics, que expliquen les estructures de les seves molècules fent-hi referència. Vázquez Tato (2005), en un treball acadèmic redactat el 1983 i no publicat fins molt més tard, il·lustra els principis i desenvolupaments de la química supramolecular amb peces de LEGO, que fa anàlogues a molè-

trems mitjançant una cadena de peces iguals de LEGO, cada una representant un monòmer. La millor de les visualitzacions, probablement, seria usant peces de 1×1 , que es poden estendre indefinidament. També es poden representar copolímers (amb peces de colors diferents) o polímers reticulats estenent l'estructura en les tres dimensions (taula 1).

Taula 1. Taula de colors CPK (Corey, Pauling, Koltun) proposada el 1952 per representar àtoms en les estructures químiques. Coincideix parcialment amb la taula proposada per Antropoff (1926), que fou molt seguida

Hidrogen	Blanc
Oxigen	Vermell
Carboni	Negre
Fluor, clor	Verd
Nitrogen	Blau fosc
Brom	Vermell fosc
Iode	Violeta fosc
Gasos nobles	Blau clar
Fòsfor	Taronja
Sofre	Groc
Or, metalls de transició	Rosa
Metalls alcalins	Violeta
Metalls alcalinoterris	Verd fosc
Titani	Gris
Ferro	Taronja
Altres elements	Rosa

cules. Schafmeister (2007) es va basar en el concepte de LEGO per construir les seves estructures nanomètriques reals.

LEGO per a la didàctica de la química

Hi ha hagut diverses propostes per usar LEGO per a l'ensenyament de la química, mitjançant l'ús d'analogies entre les peces de LEGO i les entitats químiques, els àtoms o les molècules. Una de les més elementals és visualitzar els polímers lineals com a cadena de monòmers, units pels seus ex-

El treball més complet d'analogia entre estructures químiques i LEGO és el de Vandiver (2009). Proposa un taller de dues hores i mitja, estructurable en unitats didàctiques de quaranta-cinc minuts, i en subministra les fitxes i altres materials. Ho combina amb experiments reals de laboratori i detalla minuciosament els objectius, continguts i experiments possibles. Cada joc de LEGO per a dos estudiants conté vint-i-quatre peces blanques de 1×2 i peces de 2×4 variades: quatre marrons, vuit roses,

vuit grogues, vuit de color verd clar, vuit de color verd fosc, dotze negres, trenta-sis vermelles i trenta-dues blaves. Els colors corresponen al codi usat en els jocs de boles i barres típics de la química. Cada tipus de peça correspon a un element, i això permet visualitzar els reagrupaments d'àtoms de les reaccions químiques del laboratori real.

Izquierdo *et al.* (2011) fan ús de les peces de LEGO per visualitzar les reaccions que tenen lloc en la respiració cel·lular. Anderson Gideon (2009) fa una proposta similar d'igualació de reaccions a partir de la manipulació de peces de LEGO. L'edat que totes les propostes recomanen per fer els tallers és al voltant dels 11 o els 12 anys (fig. 1).

Els punts bàsics de l'analogia en aquests treballs són comuns:

— Cada peça de LEGO és anàloga d'un àtom (no es pot fer més

petita, és indivisible com els àtoms) en la perspectiva química.

— Àtoms diferents són representats per peces diferents. De fet, hi ha moltes més peces diferents que tipus d'àtoms, que són cent divuit.

— La unió de dues peces equival a un enllaç entre dos àtoms. En els treballs esmentats, no s'especifica quins tipus d'enllaços són, però majoritàriament són covalents. Pel que fa a l'analogia, no es diferencien.

Les propostes usen el joc per explicar un aspecte abstracte de la reacció química, com és l'estequiometria. En essència, procedeixen de la manera següent: es defineix la reacció que es vol modelitzar i s'escriu en la seva versió molecular. Un cop s'han identificat les fórmules de les molècules que intervenen en la reacció com a reactants, es cons-

trueixen amb LEGO. En la reacció, les molècules dels reactants desapareixen i els àtoms que les constituïen es reordenen de forma que donen els productes, i es mantenen invariables el nombre i tipus d'àtoms del sistema. Aquesta és l'analogia. La participació dels alumnes en la comprensió del procés pot ser molt diferent, segons l'estratègia didàctica i els objectius del professor (fig. 2).

L'analogia que proposen els autors esmentats conté un grau d'abstracció considerable. La reacció química escrita en paper ja és una abstracció important de la reacció química vista al laboratori, perquè s'ha passat de veure substàncies a escriure fórmules, potser amb subíndexs que no queda clar d'on surten. I, després, les fórmules es fan anàlogues a construccions de LEGO, però només pel que fa al nombre i tipus de peces involucrades, no a la forma. El procés mecànic de combinar peces i imaginar noves molècules no presenta dificultats per als alumnes, especialment si no hi ha limitacions a l'hora de fer propostes de productes a partir de molècules de reactants. Però, en tot el procés, és probable que s'indueixin espontàniament malentesos o errors conceptuals que es comentaran a continuació. No són exclusius de l'ús de LEGO, per descomptat: qualsevol altra metodologia en pot introduir. Cal evitar-ho o paliar-ne la consolidació a les ments dels alumnes, de manera que cal identificar aquests errors conceptuals per tal d'explicitar-los i procurar que els alumnes en siguin conscients.

LEGO i preconceptes

Es pot portar l'analogia entre construccions de LEGO i reaccions més enllà de l'estequiometria de les reaccions? Difícilment. Hi ha el risc de generar interpretacions falses, incorrectes o massa limitades.

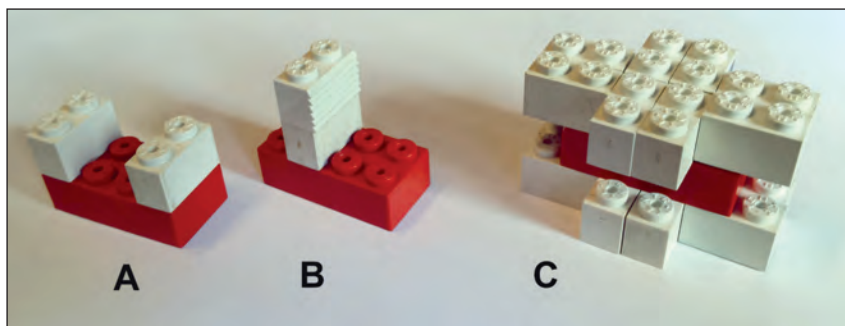


Figura 1. A i B són formes possibles de la molècula d'aigua, en l'analogia amb figures de LEGO. Les altres formes pensables són topològicament equivalents. C és la modelització amb LEGO d'una hipotètica molècula de $H_{16}O$, però que no existeix en la realitat.

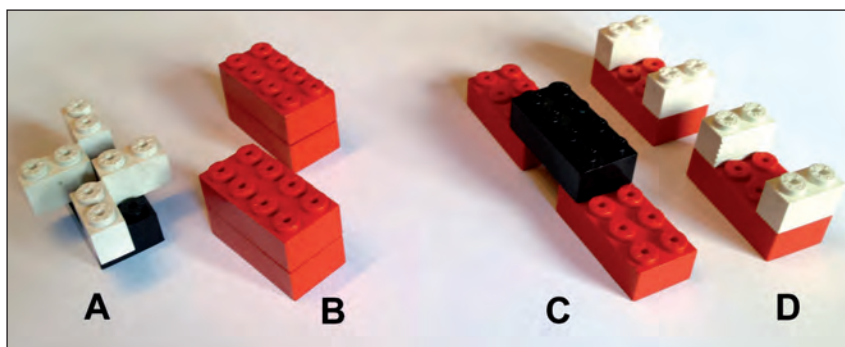


Figura 2. Reacció de combustió completa del metà. A l'esquerra, els reactants A (molècula de CH_4) i B (dues molècules d'oxigen, cadascuna de fórmula O_2). A la dreta, els productes C (molècula de CO_2) i D (dues molècules d'aigua, H_2O).

Quan els professors intenten determinar quins són els preconceptes que els seus alumnes tenen, distingeixen entre preconceptes induïts per l'entorn no científic de l'alumne i preconceptes induïts per la forma en què els professors anteriors han explicat les coses. Un exemple del primer tipus és la confusió terminològica i conceptual entre *calor* i *temperatura*, induïda probablement per l'ús habitual d'aquests termes, no coherent amb la seva interpretació científica. Un exemple del segon tipus és pensar que a les molècules hi ha àtoms dels elements com a tals. La mateixa nomenclatura química ha induït a la confusió. Per exemple, el símbol Na s'usa tant per a l'element químic com a concepte (l'element químic sodi), com per a la substància gasosa constituïda per àtoms de l'element químic aïllat (nuclis amb onze protons i dotze neutrons, envoltats per onze electrons propis), com per a l'element químic com a substància (el sodi metàl·lic, format per nuclis i electrons alguns dels quals són compartits), com, finalment, per a la part d'àtom de l'element que forma part d'una estructura, que a la fórmula NaCl indica l'ió Na^+ , que és una substància radicalment diferent de les dues anteriors.

El risc que pot haver-hi en usar peces de LEGO per modelitzar aspectes de la química és que poden introduir-se moltes idees falses, preconceptes i simplificacions que caldria evitar. Se n'indiquen a continuació els més rellevants, segons el parer de l'autor.

Concepte erroni 1. Imaginar que les molècules es creen unint directament els àtoms dels seus elements constituents. En realitat, els esquemes de reacció per obtenir els diferents productes gairebé mai passen per la síntesi directa a partir dels àtoms constituents: el clorur d'hidrogen, HCl,

sí que es genera a partir de H_2 i Cl_2 , però l'àcid sulfúric, H_2SO_4 , no s'obté a partir de S, O_2 i H_2 .

Concepte erroni 2. Imaginar que les formes de les peces determinen les possibilitats de fer molècules. Malauradament, les «molècules» modelitzades no tenen res a veure, ni en forma, ni en mida relativa (ni, per descomptat, en colors), amb les molècules reals. Només en alguns casos les «molècules» de LEGO i les reals s'assemblen una mica, com és la molècula de l'aigua feta amb una peça de 4×2 i dues d' 1×2 . Les formes i mides dels àtoms reals no poden ser representades en absolut amb peces de LEGO, i això és una important limitació operativa.

Concepte erroni 3. Imaginar que, així com a LEGO es poden unir totes les peces entre elles, tots els àtoms es poden unir entre ells per donar molècules. Però ni totes les molècules són possibles, ni un àtom pot reaccionar amb tots els altres.

Concepte erroni 4. Imaginar que, de la mateixa manera que les peces de LEGO es poden unir de formes diverses, els àtoms de les molècules també poden fer-ho. Així, la molècula H_2O es pot fer amb LEGO unint cada H a l'O, o bé unint un H a l'O i unint-lo també a l'altre H ($\text{H}-\text{O}-\text{H}$ o $\text{H}-\text{H}-\text{O}$), però només la primera estructura és correcta.

Concepte erroni 5. Imaginar que, així com en el LEGO una peça pot unir-se a d'altres mentre li quedin protuberàncies i buits, l'àtom que la peça representa també pot anar-se unint a altres àtoms. Però això no és cert, perquè depèn de la seva estructura electrònica, en absolut representada amb LEGO. En l'exemple de la molècula d'aigua, la peça vermella de 2×4 que representa l'oxigen podria unir-se, en el límit, amb setze peces d' 1×2 blanques que representen hidrògens, vuit per dalt i vuit per baix (que, al seu torn, podrien

anar-se unint a altres àtoms). Però l' H_{16}O no existeix.

Concepte erroni 6. Imaginar que, de la mateixa manera que les peces a l'estructura mantenen la seva individualitat, els àtoms a les molècules també la mantenen. Però, de fet, no trobem àtoms com a tals ni a les molècules, ni als metalls, ni a les sals, ni estructures gegants covalents, ni macromolècules.

Concepte erroni 7. Imaginar que les reaccions químiques tenen lloc descomponent les molècules dels reactants en els seus àtoms, que es tornen a reagrupar com a molècules de productes. Els mecanismes de reacció són molt més complexos, i les equacions químiques globals representables amb peces de LEGO no ens diuen res dels mecanismes de reacció, sinó només dels estats inicial i final.

Concepte erroni 8. Imaginar que les reaccions tenen lloc completament, que els reactants es transformen completament en productes. Aquest error és molt comú, perquè no s'acostuma a distingir prou clarament entre la reacció química a escala de molècules, representada per l'equació química, i la reacció química a escala macroscòpica, representada per la mateixa equació química, però amb masses de reactants i de productes, on poden haver-hi equilibris amb conversions menors del cent per cent.

Concepte erroni 9. Imaginar que les reaccions modelitzables amb LEGO són les úniques existents. Però n'hi ha moltíssimes més, com ara les reaccions amb metalls o en dissolució, que no estan prou ben representades amb peces de LEGO.

Concepte erroni 10. Imaginar que les reaccions tenen lloc amb rapidesa i relacionar-la amb la rapidesa amb la qual es poden construir o destruir les estructures de LEGO. Però la cinètica i el mecanisme de les reaccions no poden

ser imaginats veient només l'estequiometria.

Concepte erroni 11. Imaginar que hi ha poca energia involucrada en les reaccions. De fet, el mecanisme real d'unió de dues peces de LEGO entre elles és l'elasticitat del material amb el qual estan fetes i el fregament. Considerats microscòpicament, es tracta d'enllaços febles de caràcter electrostàtic i no d'enllaços covalents, metàl·lics o iònics, com a les reaccions químiques.

Concepte erroni 12. Imaginar que, així com en el LEGO es passa directament de les peces individuals als objectes (una excavadora), en la química es passa dels àtoms als objectes pel simple creixement de l'estructura. En la realitat, hi ha altres estructures intermèdies involucrades, diferents de les molècules i unides entre elles per enllaços diferents dels covalents, tal com s'ha comentat abans. Això no és possible de visualitzar amb LEGO.

Conclusions

Com és evident, qualsevol eina didàctica pot generar disfuncions. En l'article s'ha analitzat amb un cert detall l'ús del joc de construccions LEGO com a eina de suport en determinats temes de química, i s'hi han detectat diverses limitacions. L'una és estructural: el joc indueix a visualitzar i imaginar estructures químiques que estan molt allunyades de la forma de les estructures reals de la matèria. La segona limitació té a veure amb la reacció química: en cap moment la modelització permet treure conclusions sobre aspectes termodinàmics (equilibri, conversió) o sobre aspectes cinètics (velocitat de reacció) i només permet visualitzar l'estequiometria de les reaccions.

Cal, doncs, que el professor sigui molt conscient de les limitacions de l'analogia entre LEGO i química i que n'eviti els paranys,

com caldria fer amb qualsevol altra analogia o metodologia didàctica.

Bibliografia i webgrafia

- ANDERTON GIDEON, A. J. (2009). *LEGO my LEGO* [en línia]. Austin: Texas Education Agency. <http://www.depts.ttu.edu/gk12/modules/2008/lego_my_lego.pdf> [Consulta: 30 setembre 2014].
- ANTROPOFF, A. von (1926). «Eine neue Form des periodischem Systems der Elementen». *Z. Angew. Chem.*, núm. 39, p. 722-728.
- CHEMISTRYUNDERSTOOD.COM (s. d.). *Atoms, molecules and chemical reactions: Explained by LEGO analogy* [en línia]. S. ll.: s. n. <<http://chemistryunderstood.com/understand/Leogs/index.html>> [Consulta: 30 setembre 2014].
- HARSHBARGER, E. (2001, 2003). «The mysteries of the LEGO genome...». A: *Eric Harshbarger's LEGO website* [en línia]. S. ll.: s. n. <<http://www.ericharshbarger.org/lego/dna.html>> [Consulta: 30 setembre 2014].
- IZQUIERDO, M. [et al.] (2011). *Química a infantil i primària: Una nova mirada*. Barcelona: Graó, p. 73-84.
- KUNTZLEMAN, T. S. (2013). «LEGO periodic table». A: *LEGO elements* [en línia]. S. ll.: s. n. <<http://sites.arbor.edu/legoelements/>> [Consulta: setembre 2014].
- LIPSON, A. (2006) *Mathematical LEGO sculptures* [en línia]. S. ll.: s. n. <<http://www.andrewlipson.com/mathlego.htm>> [Consulta: setembre 2014].
- QUIMITUBE.COM (2014). «Modelos moleculares: jugando como niños con la química». A: *QuimiTube* [en línia]. S. ll.: s. n. <<http://www.quimitube.com/modelos-moleculares>> [Consulta: 30 setembre 2014].
- SCHAFMEISTER, C. F. (2007). «LEGO supramolecular». *Inv. y Cien.*, núm. 367 (abril), p. 78-85.

VANDIVER, K. M. (2009). *Teacher's guide for «LEGO® atoms and molecules: Chemical reactions»* [en línia]. Billund: The LEGO Group; Cambridge: MIT. <https://edgerton.mit.edu/sites/default/files/media/LEGOChemteachersguide_9-7-12.pdf> [Consulta: setembre 2014]. [Revisat periòdicament]

VÁZQUEZ TATO, J. (2005). «Química supramolecular». *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 6, núm. 1 (febrer), p. 44-80. [Correspon a una conferència del 1983]

WISC (2012). *Exploring the nanoworld with LEGO® bricks* [en línia]. Madison: University of Wisconsin-Madison. Materials Research Science and Engineering Center on Nanostructured Materials and Interfaces. <<http://education.mrsec.wisc.edu/LEGO/PDFfiles/nanobook.PDF>> [Consulta: 30 setembre 2014].



Claudi Mans i Teixidó

És catedràtic emèrit del Departament d'Enginyeria Química de la Universitat de Barcelona. Té publicats llibres de text i de divulgació, entre ells, *La truita cremada* (2005), *Els secrets de les etiquetes* (2007), *La vaca esfèrica* (2008) i *Sferificaciones y macarrones* (2010). Assessor i col·laborador de CosmoCaixa i de la unitat UB-Bullipèdia. Director científic del Comité Español de la Detergencia (CED). Vocal de les juntes de l'Associació Catalana de Comunicació Científica (ACCC), l'Associació Catalana de Ciències de l'Alimentació (ACCA) i el Col·legi de Químics de Catalunya.
A/e: cmans@ub.edu.