

# Seqüència d'ensenyament-aprenentatge per a l'estudi de la interacció llum-matèria a secundària

Raquel Rios Font ([raquel.rios@uab.cat](mailto:raquel.rios@uab.cat))

Roser Pintó Casulleras ([roser.pinto@uab.cat](mailto:roser.pinto@uab.cat))

Centre de Recerca per a l'Educació Científica i Matemàtica (CRECIM). Universitat Autònoma de Barcelona.

---

*Aquest article descriu una seqüència d'ensenyament-aprenentatge per a l'estudi de la interacció de la llum infraroja (IR) amb la matèria utilitzant diferents eines TIC. Es tracta d'una sessió contextualitzada al voltant de l'efecte d'hivernacle, plantejada per explorar els fonaments de la interacció entre la matèria i la radiació electromagnètica, que permet també introduir diversos conceptes relacionats amb l'espectroscòpia IR.*

---

**Paraules clau:** radiació electromagnètica, IR, efecte d'hivernacle, espectre d'absorció, aprenentatge amb TIC.

---

## INTRODUCCIÓ

Contingut a tractar: L'estudi de la interacció entre la radiació electromagnètica i la matèria és un dels temes inclosos en el currículum de batxillerat. A segon curs, concretament, es para especial atenció a l'absorció de la llum infraroja (IR) i la llum ultravioletada (UV) per part de determinades molècules que es troben presents a l'atmosfera.

Per què cal tractar aquest contingut?: La importància d'estudiar aquests fenòmens recau en el fet que, entre d'altres coses, permeten explicar l'efecte d'hivernacle i el paper de l'ozó a l'atmosfera. Tot i així, molts llibres de text tracten aquesta part del currículum de forma superficial, o bé no arriben a incloure-la, de manera que existeix actualment una escassetat de recursos didàctics relacionats amb aquest tema.

On es pot tractar aquest contingut?: Per donar suport al professorat de secundària en l'ensenyament de la interacció entre la radiació i la matèria, ens vam plantejar el disseny d'una sessió pràctica dins el marc del projecte REVIR. Aquest projecte, que rep el nom per l'acrònim de **RE**alitat-**VIR**tualitat, està orientat a oferir a estudiants de secundària sessions pràctiques sobre física, química o biologia, amb la particularitat que són sessions dissenyades al voltant d'un context relacionat amb la vida quoti-

diana, i que es porten a terme en un laboratori informatitzat emprant eines TIC.

En concret, la interacció entre llum i matèria és un fenomen que té lloc a escala molecular, i per tant, no és possible explorar els seus fonaments mitjançant experiments clàssics. Alguns experiments, però, sí que poden servir per estudiar l'efecte macroscòpic fruit d'aquesta interacció. D'altra banda, existeix un ampli ventall d'eines computacionals que poden ser molt útils per a l'estudi a l'aula del model d'interacció llum-matèria. La proposta que descriurem a continuació ha estat dissenyada i pilotada durant el curs 2011-2012, i planteja abordar l'exploració d'aquest fenomen mitjançant l'ús de diverses eines TIC al llarg d'una seqüència d'activitats en què els alumnes treballen en grups de 2-3 components.

## PRESENTACIÓ DE LA SESSIÓ

L'objectiu general de la sessió és que els alumnes entenguin els efectes de l'absorció de llum IR per part de la matèria, tant a nivell macroscòpic com a nivell molecular, i els relacionin entre sí.

Per tal de contextualitzar la sessió, es planteja inicialment una situació hipotètica: *en una inspecció realitzada a una empresa que emmagatzema CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> i Ar, es detecta una fuga*. Concretament, segons l'informe presentat, existeix una fuga de gas d'efecte d'hivernacle, sense especificar de quin o

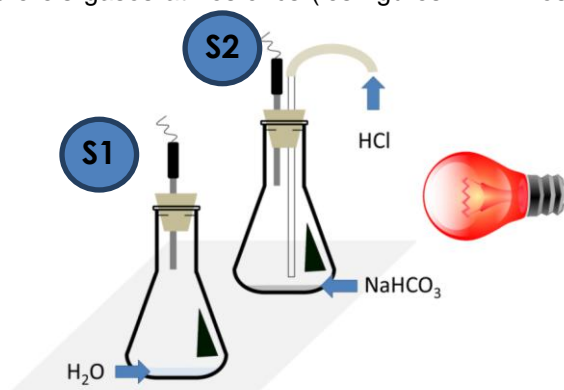
quins dels gasos es tracta. El repte que es proposa als alumnes és que al final de la pràctica puguin respondre, de manera justificada, la següent pregunta: “com podem afirmar quin d'aquests tres gasos ( $CH_4$ ,  $H_2$  i  $Ar$ ) és un gas d'efecte d'hivernacle?”

A partir d'aquí, la proposta s'estructura en tres grans blocs:

1. Exploració de la interacció entre llum IR i matèria a escala macroscòpica mitjançant l'ús d'equips de captació automàtica de dades.
2. Exploració qualitativa de l'efecte que diferents tipus de llum (microones, IR, visible i UV) produeixen en algunes molècules presents a l'atmosfera, utilitzant una simulació computacional.
3. Exploració d'espectres d'absorció IR teòrics mitjançant un visualitzador de molècules.

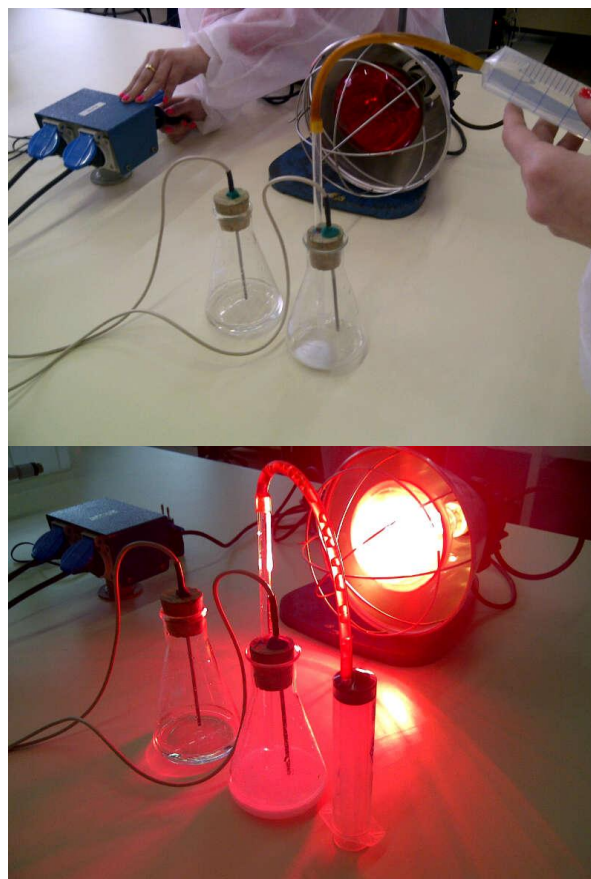
### 1. Exploració de la interacció entre llum IR i matèria a escala macroscòpica mitjançant l'ús d'equips de captació automàtica de dades

En primer lloc, els alumnes realitzen un experiment amb el qual es pretén reproduir, a escala de laboratori, l'efecte de la llum IR provinent del sol sobre els gasos atmosfèrics (les figures 1 i 2 mostren el muntatge experimental).



tren el muntatge experimental).

**Figura 1.** Esquema del muntatge experimental.



**Figura 2.** Muntatge experimental abans de fer l'experiment (dalt) i durant la seva realització (baix).

L'experiment consisteix a irradiar amb una bombeta de llum IR dos erlenmeyers (S1 i S2), que simulen dues “atmosfera” on una està més contaminada que l'altra. El sistema que simula l'atmosfera control (S1) només conté 50 ml d'aigua, mentre que al sistema que representa l'atmosfera més contaminada (S2) hi fem reaccionar 5 g d'hidrogen carbonat sòdic amb 50 ml de solució d'àcid clorhídric 1M. Mitjançant la utilització de dos sensors de temperatura i d'un sistema de captació automàtica de dades, els estudiants poden enregistrar l'evolució de la temperatura de la fase gasosa dins els dos erlenmeyers mentre són irradiats amb llum IR. Abans de realitzar l'experiment, però, se'ls demana que dibuixin gràficament la predicció de la variació de temperatura en funció del temps per ambdós sistemes. Aquest exercici de predicció és molt important, fonamentalment perquè permet fer aflorar les idees prèvies dels estudiants sobre la forma en què evolucionarà la temperatura dels sistemes d'estudi. D'aquesta manera, el professorat sap d'on parteix i l'alumnat comença a reflexionar sobre el fenomen partint dels seus models mentals preexistents. Això permet discutir quina serà la temperatura inicial, si hi haurà un escalfament de

tots dos sistemes o només d'aquell on s'ha produït la reacció, i si l'augment es produirà de manera lineal, o bé si s'accelerarà o s'alentirà al llarg del temps.

### Discussió dels resultats

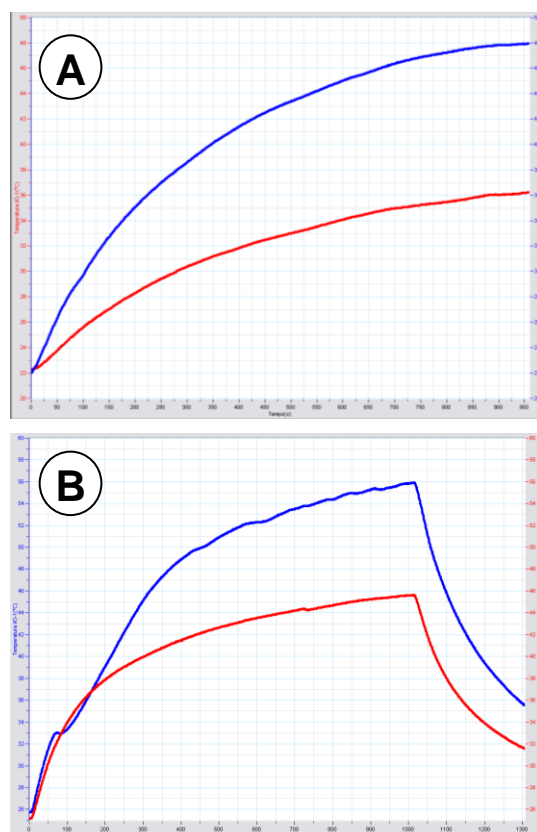
La comparació del resultat de l'experiment (figura 3) amb les idees de l'alumnat que prèviament han quedat explicitades amb la seva predicció, permet que arribin a les següents conclusions:

- La interacció entre la llum IR i els gasos presents a l'aire (entre els quals es troben l'O<sub>2</sub>, el N<sub>2</sub>, el CO<sub>2</sub>, el vapor d'H<sub>2</sub>O i l'Ar) produeix un augment de la temperatura d'aquesta barreja de gasos.
- L'augment de temperatura al llarg del temps segueix un comportament asimptòtic, i els sistemes tendeixen a l'equilibri tèrmic.
- Com més alta és la concentració de CO<sub>2</sub> en el recipient, tant més gran és l'augment de temperatura. Aquest resultat és, de fet, el que permet afirmar que "el CO<sub>2</sub> és un gas d'efecte d'hivernacle".

Cal tenir en compte, però, que l'augment de temperatura detectat també està influenciat pel fet que els sensors s'escalfen en rebre la radiació directa de la font de llum.

**Precaucions a tenir en compte:** Un dels principals inconvenients d'aquest muntatge experimental és que cal controlar les variables de manera molt precisa, i la distància del focus de llum als sensors és particularment important. En aquest sentit, i després de diverses experiències, hem trobat que és recomanable situar el focus de llum a uns 20 cm dels erlenmeyers, i aquests, a uns 2-3 cm de distància l'un de l'altre. També és important no introduir els sensors de temperatura a gaire profunditat, ja que l'efervescència que es produeix durant la reacció en el sistema S2 pot esquitxar el sensor, i això falsejaria els resultats ja que no s'estaria enregistrant la temperatura de la fase gasosa. De fet, quan això succeeix acostumem a obtenir una gràfica com la que es mostra a la figura 3(B), on la corba corresponent al sistema S2 experimenta un descens (que es correspon amb el moment en què es mulla el sensor) i posteriorment va augmentant fins que arriba a creuar-se amb la corba del sistema S1.

Fins aquí, aquesta primera activitat permet als estudiants explorar com es manifesta a escala macroscòpica la interacció entre la llum IR i els gasos atmosfèrics i comprovar que el CO<sub>2</sub> és un gas d'efecte d'hivernacle. Per tal de resoldre el problema plantejat inicialment, podrien proposar fer un experiment d'aquest tipus per a cadascun dels tres gasos (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> i Ar). Això, però, no els permetria predir quin d'ells és un gas d'efecte d'hivernacle (tal i com es demana a la pregunta inicial), sinó que el que farien seria comprovar si ho són o no.



**Figura 3:** Corbes de temperatura per als sistemes S1 (vermell) i S2 (blau) en dos experiments diferents: (A) el sensor de temperatura S2 no es mulla; (B) el sensor de temperatura S2 es mulla per les esquitxades al principi de l'experiment (de manera que la corba per al sistema S2 presenta una petita disminució) – la disminució de temperatura de les dues corbes al final de l'experiment coincideix amb el moment en què es va apagar la font de llum IR –.

## **2. Exploració qualitativa de la interacció llum-matèria a escala molecular**

La següent activitat consisteix en explorar l'efecte que diferents tipus de llum tenen sobre al-

gunes molècules. Aquesta exploració es fa de manera molt qualitativa mitjançant la simulació "Molècules i llum" (J. Blanco), que permet visualitzar el comportament de diverses molècules que es troben presents a l'atmosfera quan són irradiades amb fotons de diferent naturalesa.

Així, els estudiants poden triar una molècula ( $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$  o  $\text{O}_3$ ) i el tipus de llum amb què la volen irradiar (microones, IR, visible i UV), i la simulació els permet observar quin és l'efecte que es produeix **si la molècula absorbeix aquests fotons** (aquest punt serà important tenir-lo en compte al final de la secció 3).

Un cop explorades totes les possibilitats, els estudiants poden establir que l'absorció de llum IR per part de determinades molècules comporta canvis "vibracionals" en aquestes, i això els permet relacionar el comportament molecular amb l'efecte macroscòpic observat a l'experiment de l'apartat 1:

- A nivell molecular, l'absorció de llum IR per part de determinats gasos presents a l'atmosfera produeix un augment de la vibració de les molècules, la qual cosa comporta un augment de l'energia cinètica d'aquestes.
- Com que la temperatura és una mesura de l'energia cinètica de les molècules, l'absorció de llum IR a nivell molecular es tradueix, a escala macroscòpica, en un augment de temperatura del sistema.

La simulació també mostra quins efectes produeixen sobre les molècules els diferents tipus de llum (microones, IR, visible i UV), de manera que es pot complementar l'activitat interpretant aquests efectes des del punt de vista de l'absorció d'energia. Així, a partir d'una representació dels nivells energètics associats a una molècula (figura 4), es poden establir diverses relacions:

- L'absorció de llum microones (de baixa energia) produeix excitacions entre nivells energètics rotacionals (que estan molt propers);
- L'absorció de llum infraroja (d'energia una mica més alta) produeix excitacions entre nivells energètics vibracionals (que es troben més separats entre sí que els rotacionals);
- l'absorció de llum visible-UV (de més alta energia) produeix excitacions electròniques entre estats energètics encara més separats entre sí que els nivells vibracionals.

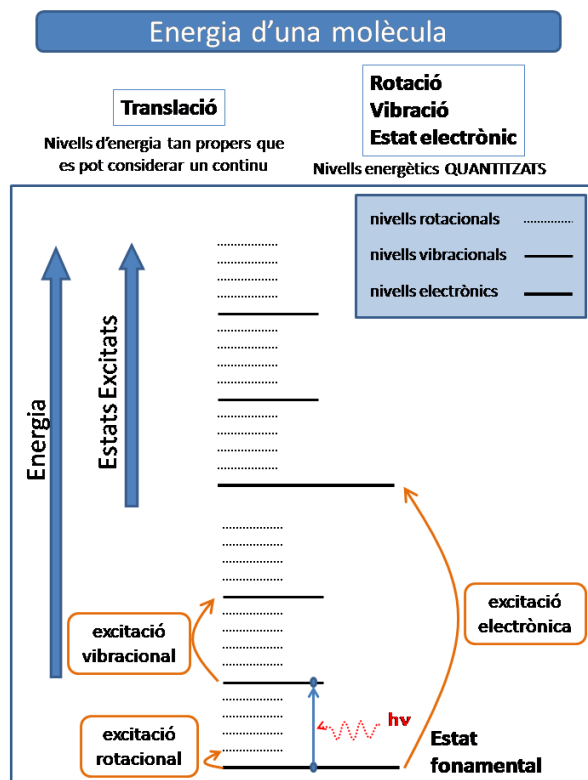
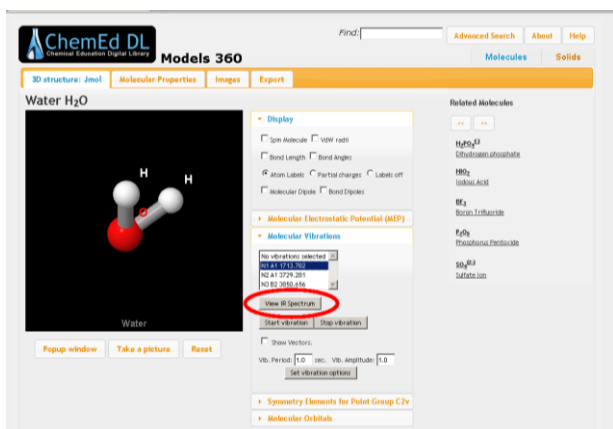


Figura 4: Representació esquemàtica dels nivells energètics en una molècula.

### 3. Exploració d'espectres d'absorció IR teòrics mitjançant un visualitzador de molècules

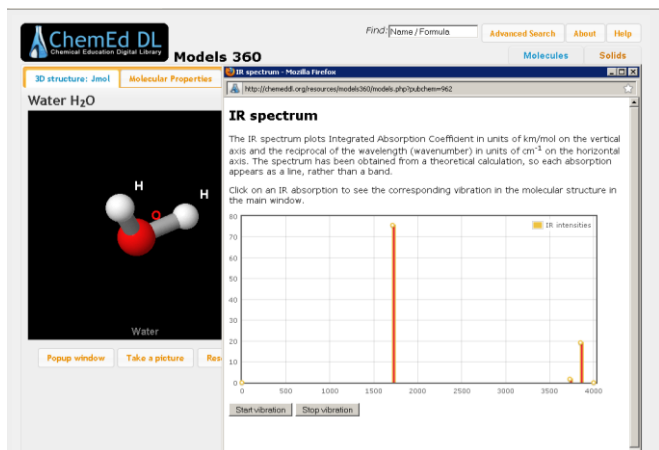
En l'apartat anterior, s'introdueix el concepte d'absorció de llum IR d'una manera molt qualitativa, sense tenir en compte diversos aspectes, com ara que no tots els fotons de llum IR tenen la mateixa freqüència. Per tal d'anar un pas més enllà, podem utilitzar una interfície visual com el Models 360 (X. Prat-Resina), que és una important col·lecció de models moleculars que permet examinar estructures i geometries.

Amb aquesta eina, els estudiants poden seleccionar qualsevol de les molècules disponibles a la base de dades del Models 360, i explorar les vibracions moleculars i els espectres d'absorció IR teòrics. A la figura 5 es mostra l'estructura de la molècula d'aigua així com els valors dels seus modes de vibració, i picant sobre cadascun d'ells, es pot visualitzar quin és el moviment vibracional corresponent, que pot ser de tensió (elongació o escurçament dels enllaços) o de flexió (deformacions de la molècula per variació dels angles d'enllaç).



**Figura 5:** Captura de pantalla de l'eina Models 360 on es mostra l'estructura de la molècula d'aigua i els valors dels seus modes

Mitjançant el botó *View IR Spectrum*, accedim a una finestra emergent on es mostra l'espectre IR de la molècula (figura 6). És important remarcar que aquest és un espectre **teòric**, és a dir, que no ha estat obtingut experimentalment, sinó a partir de càlculs computacionals.

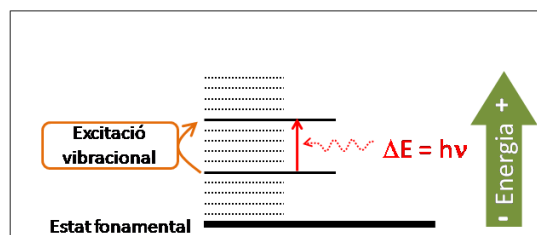


**Figura 6:** Captura de pantalla de l'eina Models 360 on es mostra l'espectre d'absorció IR (teòric) de la molècula d'aigua.

A partir d'aquí, cal comentar diversos conceptes per tal que els alumnes entenguin quina informació proporcionen els espectres en relació al fenomen de l'absorció de llum IR. A més, és necessari distingir entre aquests espectres teòrics (obtinguts mitjançant una sèrie de càlculs on s'assumeix que el comportament de les molècules es pot aproximar al

de l'oscil·lador harmònic) i els espectres experimentals (que s'obtenen a partir de mesures fetes amb un espectrofotòmetre). Les idees més importants a remarcar són:

- Bandes d'absorció. El fet que apareguin uns pics o bandes a unes freqüències concretes es pot relacionar amb el fet que les molècules absorbeixen radiació d'una determinada freqüència, la qual cosa provoca que tinguin lloc excitacions vibracionals (veure figura 7).
- Absorbància vs transmittància. Tot i que en aquests espectres es representa la proporció d'intensitat de llum absorbida per la mostra, la majoria d'espectres experimentals representen la proporció de llum transmesa.
- Unitats de la freqüència vibracional. És important aclarir que en els espectres IR, malgrat que parlem de "freqüència" ( $\nu$ , que té unitats de Hertz o  $s^{-1}$ ), se sol utilitzar el "nombre d'ona" ( $1/\lambda$ , que té unitats de  $cm^{-1}$ ), una magnitud que és directament proporcional a la freqüència ( $1/\lambda = \nu/c$ ).



**Figura 7:** Esquema representant la relació entre un pic d'absorció a una certa freqüència i la variació d'energia corresponent a l'excitació entre nivells vibracionals.

Arribats a aquest punt, es demana als alumnes que, mitjançant el Models 360, explorin els espectres d'absorció teòrics de diferents molècules presents a l'atmosfera ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  i  $CO_2$ ), i que completin la taula 1.

D'altra banda, comparant els espectres teòrics amb les observacions fetes en la secció 2 (segons les quals algunes molècules absorbeixen fotons de llum IR i altres no), es pot arribar a justificar quines de les molècules de la taula 1 NO corresponen a gasos d'efecte d'hivernacle: aquelles que no presenten cap pic en el seu espectre, no absorbeixen llum IR, de manera que no produeixen un augment de temperatura a causa de les seves excitacions vibracionals. Aquesta justificació representa, de fet, la resposta a la pregunta plantejada inicialment (com podem predir quin d'aquests tres gasos –CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> o Ar– és un gas d'efecte d'hivernacle?)

MOLÈCULA	$1/\lambda$ (Freqüències vibracionals) (cm <sup>-1</sup> )	Té algun pic d'absorció associat a l'espectre IR?
O <sub>2</sub>	1659,3	
N <sub>2</sub>	2457,7	
H <sub>2</sub> O	1713,8	
	3729,3	
	3850,7	
CO <sub>2</sub>	640,2	
	640,2	
	1371,8	
	2435,8	

**Taula 1:** Dades que es demanen per a diverses molècules presents a l'atmosfera i que es poden obtenir a partir del Models360.

## CONCLUSIONS

Aquesta seqüència d'ensenyament-aprenentatge permet explorar el fenomen de la interacció entre la llum IR i la matèria, i relacionar els efectes que tenen lloc a escala macroscòpica i a escala molecular.

A través d'un experiment en què s'utilitzen equips de captació automàtica de dades, els alumnes exploren com influeix la interacció entre la llum IR i els gasos atmosfèrics sobre la temperatura d'aquests. En el fons, s'intenta reproduir, a escala de laboratori, l'efecte d'hivernacle en dos sistemes: un que simula una atmosfera "normal" (la que tenim

a la Terra), i un altre que simula una atmosfera "contaminada" (on hi ha una major concentració de CO<sub>2</sub>). És interessant remarcar que, abans de fer l'experiment, quan es demana als alumnes que prediguin com seran les corbes de temperatura per als dos sistemes, sovint prediuen un comportament lineal o bé exponencial. En canvi, en realitzar l'experiment arriben a concloure que l'augment de temperatura al llarg del temps segueix un comportament asimptòtic, i que els sistemes tendeixen a l'equilibri tèrmic.

D'altra banda, l'ús de la simulació "Molècules i llum" permet als alumnes explorar l'efecte que la llum (microones, IR, visible i UV) produeix en algunes molècules presents a l'atmosfera. Tot i la utilitat d'aquesta eina per introduir el model d'interacció entre radiació i matèria, és important remarcar que presenta algunes limitacions que requereixen la clarificació per part del professorat. En aquest sentit, les limitacions més destacables provenen principalment de la naturalesa qualitativa de la simulació i de la seva pròpia simplicitat:

- El caràcter "monocromàtic" dels diferents tipus de llum. Segons aquesta simulació, es podria pensar que tots els fotons de llum microones són iguals (i el mateix per a la llum IR, visible i UV). De fet, però, cada tipus de llum correspon a un rang de freqüències dins l'espectre electromagnètic, i no a una freqüència concreta.
- El comportament estàtic de les molècules quan no interaccionen amb la llum. En aquest cas, cal destacar aquesta limitació i comentar als alumnes que les molècules mai estan quietes (això es pot relacionar amb el tercer principi de la termodinàmica, ja que les molècules només podrien estar totalment en repòs en el zero absolut).
- La interpretació de l'efecte produït per l'absorció de llum visible. Tot i que la simulació mostra que l'absorció de llum visible fa que la molècula "s'il·lumini", cal clarificar que això és una representació de l'excitació electrònica, que d'altra banda seria molt difícil d'il·lustrar en aquesta simulació.

Finalment, mitjançant un visualitzador de molècules com el Models 360 que permet explorar l'estructura i els espectres d'absorció IR (teòrics) d'una gran varietat de molècules, es pot mostrar als alumnes quina informació ens donen els espectres d'absorció i quin és el significat de conceptes com

les bandes d'absorció, la transmitància o la freqüència de vibració. A més, al final de la seqüència els alumnes poden respondre la pregunta que se'ls havia plantejat inicialment: com podem predir quin d'aquests tres gasos –CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> o Ar– és un gas d'efecte d'hivernacle?

## AGRAÏMENTS

El disseny d'aquesta seqüència d'ensenyament-aprenentatge ha estat finançat gràcies al Projecte EDISTE (EDU2011-28431) i a la Fundació Obra Social La Caixa.

## REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

BLANCO, J., LANCASTER, K., LOEBLIN, T., PARSON, R., PERKINS, K. *Molecules and light* (PhET Interactive Science Simulations), University of Colorado at Boulder.

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/molecules-and-light>

X. PRAT-RESINA *et al.* *Models360* (Chemical Education Digital Library).

<http://www.chemeddl.org/resources/models360/models.php>. Copyright ©