

Monografies de les Seccions de Ciències, 15

LLUM I COLOR

UNIVERSITAT CATALANA D'ESTIU
INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

MONOGRAFIES DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES

- 1. OBRA D'EVARISTE GALOIS**
a cura d'A. Malet
- 2. INTRODUCCIÓ A LA
TERMODINÀMICA DE
PROCESSOS BIOLÒGICS**
D. Jou
- 3. ANÀLISI DE LA
PSICOANÀLISI**
L. Garcia i Sevilla
Pròleg de M. Brunge
- 4. COMPENDI DE
NOMENCLATURA DE
QUÍMICA ANALÍTICA**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret
- 5. VOCABULARI
FORESTAL**
Eduard Parés i Español
- 6. PLASMES I FOCS**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret
- 7. GLOSSARI DE CORROSIÓ**
a cura de J. M. Costa
i P. L. Cabot
- 8. GASOS I ATMOSFERES**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret
- 9. TERRA I SÒL**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret
- 10. LÍQUIDS I BIOFLUIDS**
a cura d'E. Casassas
i S. Alegret

LLUM I COLOR

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

Monografies de les Seccions de Ciències, 15

SECCIÓ DE CIÈNCIES I TECNOLOGIA

SECCIÓ DE CIÈNCIES BIOLÒGIQUES

LLUM I COLOR

Actes del curs que fou impartit a la
XXVI Universitat Catalana d'Estiu,
a Prada de Conflent

Edició a cura de
JULI G. PERETÓ i SALVADOR ALEGRET

UNIVERSITAT CATALANA D'ESTIU
INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS
BARCELONA, 2001

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP

Llum i color : actes del curs que fou impartit a la XXVI Universitat Catalana d'Estiu, a Prada de Conflent. — (Monografies de les seccions de ciències ; 15)
ISBN 84-7283-571-5

I. Peretó, Juli G., ed. II. Alegret, Salvador, ed.

III. Universitat Catalana d'Estiu (Prada)

IV. Institut d'Estudis Catalans

V. Col·lecció: Monografies de les seccions de ciències ; 15

1. Llum — Congressos 2. Color — Congressos

535.1 (061.3)

Disseny gràfic: Maria Casassas

© Els autors dels articles

© 2001, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: octubre de 2001

Tiratge: 450 exemplars

Text revisat lingüísticament pel Servei de Correcció de l'IEC

Compost per fotocomposició gama, s. l.

Carrer d'Àristides Maillol, 3, 1r. 08028 Barcelona

Imprès a Limpergraf, SL

Polígon industrial Can Salvatella. Carrer de Mogoda, 29-31.

08210 Barberà del Vallès

ISBN: 84-7283-571-5

Dipòsit Legal: B. 22375-2001

Són rigorosament prohibides, sense l'autorització escrita dels titulars del copyright, la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol procediment i suport, incloent-hi la reprografia i el tractament informàtic, la distribució d'exemplars mitjançant lloguer o préstec comercial, la inclusió total o parcial en bases de dades i la consulta a través de xarxa telemàtica o d'Internet. Les infraccions d'aquests drets estan sotmeses a les sancions establertes per les lleis.

LLUM I COLOR

Professors:

MANUEL FONT I ALTABA.* Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona.

DAVID JOU.* Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona.

CARME JUNQUÉ. Departament de Psiquiatria i Psicobiologia Clínica. Universitat de Barcelona.

ALBERT MASÓ. Departament d'Ecologia. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona.

ANTONI MORER. Museu Nacional d'Art de Catalunya. Barcelona.

JESÚS NAVARRO. Institut de Física Corpuscular. CSIC. Universitat de València.

MANUEL PIJOAN. Divulgador científic i escriptor.

LLUÍS PRAT. Estudis de Comunicació Audiovisual. Universitat Pompeu Fabra. Barcelona.

ÀNGEL ROMO. Institut Botànic de Barcelona.

ALFRED GINER-SOROLLA.* College of Medicine. University of South Florida. Tampa. EUA.

PERE VENDRELL. Departament de Psiquiatria i Psicobiologia Clínica. Universitat de Barcelona.

Coordinadors:

SALVADOR ALEGRET.* Departament de Química. Universitat Autònoma de Barcelona.

JULI G. PERETÓ.* Departament de Bioquímica i Biologia Molecular. Universitat de València.

This One



JFC4-ZN6-NZ1W

* Membre de l'Institut d'Estudis Catalans.

PREFACI

LES MONOGRAFIES DE LES SECCIONS DE CIÈNCIES I EL RECORD DEL DOCTOR ENRIC CASASSAS

Amb aquest llibre la present col·lecció de monografies científiques arriba a la quinzena de volums publicats. Potser seria ara un bon moment de fer-ne un balanç, atès que el primer volum va ser publicat ja fa una colla d'anys. Però els que tenim la responsabilitat de tirar endavant aquests llibres, en aquests moments, no sabem sostreure'ns el record del doctor Casassas, el qual ha estat fins el darrer moment el vertader impulsor d'aquesta col·lecció.

Les *Monografies* van néixer l'any 1984, quan el doctor Casassas presidia la Secció de Ciències de l'Institut. (Vegeu la llista de títols i autors apareguts fins ara a les solapes de la sobrecoberta d'aquest llibre). La Secció es va plantejar aleshores si calia complementar la seva col·lecció «Arxius de la Secció de Ciències», bàsicament dedicada a la publicació de treballs originals de recerca científica, amb una altra col·lecció més orientada a aspectes generals de la ciència. No cal dir que hom sospesà si a una corporació acadèmica com l'Institut, que té per objectiu l'alta investigació científica, li corresponia la tasca de promoure la divulgació d'aquesta activitat. Va prevaler l'opinió del doctor Casassas en el sentit que hi havia un buit bibliogràfic sobre aquesta temàtica en la nostra llengua, i com que ningú l'omplia, l'Institut una vegada més havia de fer una labor de suplència.

Com a secretari redactor de la Secció de Ciències, qui escriu aquestes ratlles, va tenir el goig d'encarregar-se dels treballs preparatoris de publicació de les «Monografies de la Secció de Ciències» (que quan es va subdividir aquesta Secció en les seccions de Cièn-

cies i Tecnologia i de Ciències Biològiques, el títol de la col·lecció canvià lleugerament a «Monografies de les Seccions de Ciències»). El seu disseny gràfic, de la mà de Maria Casassas, plagué de seguida al doctor Ramon Aramon, el secretari general de l'Institut d'aleshores, el qual vetllava personalment totes les publicacions de la institució. El disseny incorporà la sobrietat pròpia de les edicions científiques, com els «Arxius de la Secció de Ciències», però amb una tipografia i composició de les diferents parts del llibre més escaients a la naturalesa de la nova col·lecció. Hom preveié que cada obra tingués un mateix format de coberta, coincidint amb el de la portada, però amb una sobrecoberta —d'un impacte visual contingut— diferent per a cada obra. A més a més, els llibres havien d'incorporar unes guardes de color cru, per a enriquir el conjunt. Aquest disseny encara és l'actual, i cal dir que ha resistit bé el pas del temps.

Des de bon començament no ha estat fàcil als responsables de les monografies de trobar regularment originals per a la col·lecció. No ens ha estat conhort saber que la divulgació científica també té dificultats en altres llengües, llevat potser de l'anglès, i que potser és més per manca d'autors que de lectors. Aquest problema fou solucionat, en part, amb la coedició d'alguns llibres conjuntament amb la Universitat Catalana d'Estiu (UCE). En efecte, quan el doctor Casassas prengué l'any 1988 la responsabilitat de presidir l'equip rector d'aquesta universitat, sempre que podia intervenia en els treballs de la seva àrea de ciències, la qual vaig tenir la responsabilitat de coordinar durant diversos anys. Recordo ben bé que el doctor Casassas tingué una participació activa en l'establiment dels continguts científics de les edicions de l'UCE de l'any 1988 al 1991. Aquests anys es dugué a Prada una revisió actualitzada dels estats de la matèria. Aquests cursos donaren lloc a uns interessants textos científics recollits a les monografies núms. 6, 8, 9 i 10, que porten els suggerents títols de *Plasmes i focs*, *Gasos i atmosferes*, *Terra i sol* i *Líquids i biofluids*. El doctor Casassas col·laborà personalment en l'edició i publicació d'aquestes monografies.

Gràcies a la fructífera iniciativa de l'Institut d'editar materials de l'àrea de ciències de l'UCE, una nodrida representació de científics dels Països Catalans han trobat en les monografies un recer per a difondre coneixements científics entre un públic no especialitzat. Sortosament aquest recer, aquests darrers anys, s'ha engrandit. La Universitat de València ha encetat, en col·laboració amb Edicions

Bromera, d'Alzira, la magnífica col·lecció de divulgació científica «Sense Fronteres».

El doctor Casassas, mentre presidia l'UCE i especialment després, el podíem veure, tant en condició d'alumne com de professor, participant activament en aquesta manifestació estiuenca. Els anys 1991 i 1992 participà en els seminaris d'investigació, oferts a Prada per la Universitat de Barcelona, sobre «Del plaer dels sentits al plaer de les xifres» i «Modelització macroscòpica en ciències experimentals». Aquests cursos han estat recollits en les monografies núm. 13 i 12, respectivament, en unes edicions a cura del doctor Casassas en col·laboració amb deixebles seus. Cal esmentar que a la monografia núm. 13, en el capítol escrit per ell mateix, «De l'alquímia a la quimiometria», hi podem veure tres il·lustracions seves fetes a ploma, d'una gran qualitat artística.

La present monografia núm. 15, titulada *Llum i color* correspon a un curs impartit a Prada, l'any 1994. El doctor Casassas hi participà amb una «Introducció general a la fotoquímica en sistemes aquàtics». La seva intervenció evidencià, una vegada més, que gaudia d'una vellesa ben activa i fecunda intel·lectualment. Estàvem esperant el text de la seva conferència per ser publicat en aquesta monografia. Però això no ha pogut ser. El doctor Casassas ens deixà el febrer del 2000.

No cal dir, doncs, que per a tots els que hem intervingut en la preparació del present volum, ens ha costat molt lliurar-lo a la impremta sense la seva presència. Per això, no hem sabut fer res de millor que recordar-lo en aquest prefaci.

SALVADOR ALEGRET*

* Vicepresident de la Secció de Ciències i Tecnologia.

1. LA NATURALES DE LA LLUM

Jesús Navarro*

1.1. INTRODUCCIÓ

Totes les societats i civilitzacions s'han preguntat segurament què és la llum, i com és de suposar, les respostes han estat molt diverses. Per exemple, la resposta podia ser mitològica, tal com feien els antics egipcis, que consideraven la llum com la deessa Maat, filla del déu Ra, el Sol. O també la resposta podia basar-se en els que ara podríem dir *constituents de la matèria*, que pels antics grecs eren quatre: terra, foc, aire i aigua. Així, certs pensadors consideraven que el foc seria llum en estat pur.

L'objectiu d'aquest seminari és donar a conèixer les idees de la física actual sobre la naturalesa de la llum. Per tal de fer-ho d'una manera divulgativa, he triat seguir una exposició històrica, que forçosament serà esquemàtica i també esbiaixada, puix que presentaré les coses des de la perspectiva actual. S'ha d'ésser conscient que moltes coses que ara ens semblen evidents o intuïtives, han patit en el seu moment grans dificultats conceptuals, i a l'inrevés, conceptes importants per a científics del passat poden no tenir interès en la perspectiva actual. El fil de l'evolució històrica serà ací bàsicament un recurs didàctic i no faré, doncs, un seminari d'història de la física o de l'òptica. Consideraré algunes preguntes que s'han plantejat al llarg de la història sobre la llum, així com els raonaments i els experiments que s'han fet per respondre-les i que han dut a plantejar noves preguntes, com ja veurem.

* Institut de Física Corpuscular (IFIC). Centre Mixt CSIC. Universitat de València.

Començaré per descriure alguns fenòmens que ha d'explicar qualsevol teoria sobre la llum: reflexió, refracció i difracció. Així veurem com s'ha anat plantejant el debat sobre la naturalesa de la llum fins al segle XVII. Després descriuré les teories corpuscular de Newton i ondulatoria de Huygens, sobre la llum. Aquest fou el debat central sobre la naturalesa de la llum, que al llarg del segle XIX es va decantar per la teoria ondulatoria, ja que es considerava la llum una ona electromagnètica. Finalment, descriuré les idees actuals sobre la llum: hom parla d'una dualitat ona/corpuscle. En el que aparentment no és més que una síntesi s'amaga un concepte més profund, compartit per molts altres objectes i descrit per la física quàntica d'una manera satisfactòria fins ara.

1.1.1. La reflexió i la refracció

Tal com està indicat en la figura 1, quan un raig de llum arriba a la superfície de separació de dos medis transparents, part de la llum es reflecteix i part de la llum travessa la superfície, desviant-se respecte de la seua direcció. Hom parla de *reflexió* i *refracció*, respecti-

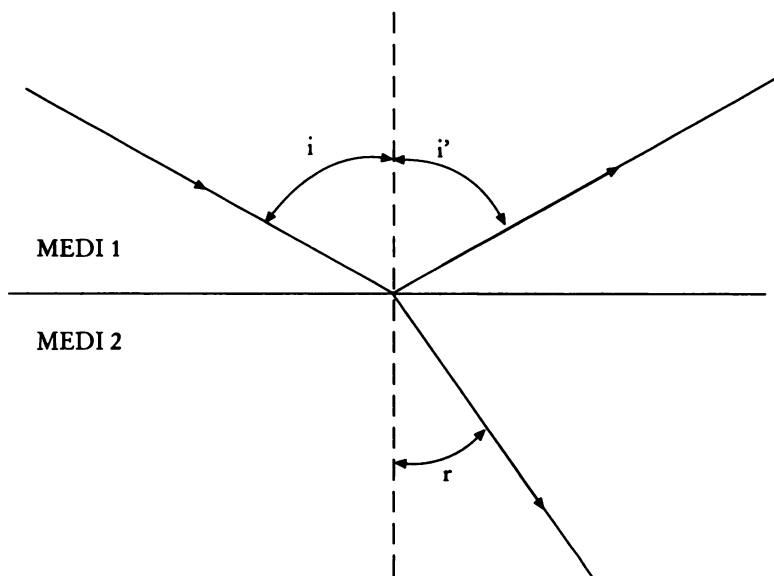


FIGURA 1. La reflexió i la refracció de la llum.

vament. En el cas d'un espill només hi ha reflexió. Segons siguen els medis considerats, el raig refractat s'acosta o se separa de la normal a la superfície en el punt d'incidència. Comencem per plantejar una pregunta que no té, sembla, res a veure amb la naturalesa de la llum: quina relació matemàtica existeix entre els angles d'incidència i , de reflexió i' i de refracció r ?

La relació matemàtica entre angles va ser trobada de manera empírica. Euclides (segle III aC) va escriure un llibre, *L'òptica i la catòptrica*, que és el més antic conegut sobre l'òptica. Hi afirma que la llum es propaga en línia recta, parla de *raigs visuals*, i pel que fa al nostre problema, assenyala que en tota reflexió s'acompleix la igualtat entre els angles de reflexió i d'incidència. Aquesta és la llei de la reflexió, i amb el seu ajut Euclides va abordar problemes més complicats com ara la reflexió per miralls amb superfícies corbes.

Als segles X i XI els àrabs havien fet progressos en molts dominis. En el que ara és l'Irak, Alhazen (965-1039) es va ocupar de problemes d'òptica, i els seus treballs foren els més estudiats a les societats cristianes de l'edat mitjana. Alhazen donà, sense cap justificació, una interpretació de la reflexió i la refracció que pot sorprendre pel seu caràcter «modern». En el moviment de la llum distingia dues components: una horitzontal, paral·lela a l'espill o a la superfície de separació de dos medis transparents, i una vertical, perpendicular a la superfície. La component horitzontal, afirma Alhazen, té la propietat de no modificar-se mai, ni en la reflexió ni en la refracció. La reflexió es produeix per un xoc entre la llum i l'espill i aleshores la component vertical canvia simplement de direcció. D'ací es dedueix, per simples consideracions geomètriques, la llei de la reflexió: l'angle de reflexió és igual a l'angle d'incidència. Observem que l'explicació de l'observació empírica s'ha traslladat a l'explicació del comportament de les dues components suposades a la llum. En el cas d'una substància transparent, la llum hi penetra i, segons el tipus de substància, pot accelerar-se (augmentant la component vertical, en el qual cas $r < i$) o pot frenar-se (disminuint la component vertical, i aleshores $r > i$). En conseqüència, segons aquestes hipòtesis, la velocitat de la llum en el segon medi transparent augmentaria respecte del primer si $r < i$, o disminuiria si $r > i$.

Witelo (1230-1300) estudià quantitativament la refracció: va construir unes taules relacionant les mesures dels angles d'incidència i de refracció en aire, aigua i vidre. Cal dir que al segle XIII ja es fabricaven lents de vidre per a persones grans, així que conèixer les

relacions entre angles d'incidència i de refracció era també una qüestió d'importància pràctica. De fet, les taules de Witelo van ser utilitzades durant un quants segles pels fabricants de lents. La llei de la refracció va ser trobada per Snell (1580-1626), que va morir sense publicar els seus resultats. Descartes (1569-1650) publicà el 1637 el seu llibre *La diòptrica*, on apareix per primera vegada la llei de la refracció (sense fer, però, cap referència a Snell), que es pot formular així: quan la llum passa per dos medis transparents, els angles d'incidència i de refracció són tals que el quocient entre els seus sinus és sempre igual a una constant. Matemàticament, i amb la notació de la figura 1, s'escriu $\sin i / \sin r = n$, on n és l'índex de refracció del segon medi respecte del primer. Convé definir una quantitat per a cada medi, que s'anomena *índex de refracció*, i l'índex relatiu s'escriurà $n = n_2/n_1$. Actualment, l'índex de refracció d'un medi es defineix com el quocient entre les velocitats de la llum en el buit i en el medi.

Una vegada trobades empíricament les relacions entre angles, s'ha d'intentar explicar la relació entre l'índex de refracció amb les propietats físiques del medi, com ara la seua densitat o la velocitat de propagació de la llum al medi, etc. Descartes es proposà deduir aquestes relacions a partir de la naturalesa física de la llum. La seua descripció és complicada i requereix d'una substància, que va anomenar *l'aire subtil*, formada per esferes petitíssimes, invisibles, totes idèntiques, que ho omplien tot. Com que es considerava que no hi ha buit, els espais entre esferes estarien ocupats per petits fragments dels altres elements. Per Descartes, la llum no seria més que una variació de pressió a través de l'aire subtil, que es transmet amb una velocitat infinita (ell deia que «no pren temps en el seu passatge»). Descartes comparà la reflexió al rebot d'una bala sobre un mur i la refracció al pas d'un projectil a través d'una tela tensada. Com més resistència trobe, més se separarà de la normal. Va deduir, per tant, que l'aire oposa més resistència al pas de la llum que el vidre o l'aigua.

Fermat (1601-1665), però, pensava que és absurd dir que l'aire oposa més resistència que l'aigua o el vidre al pas de la llum. Es proposà deduir la llei de la refracció a partir del que actualment, i convenientment modificat, s'anomena *principi de Fermat*: «La llum segueix un camí òptic tal, que pren el mínim temps en el seu trajecte». Per *camí òptic* s'entén el producte del camí geomètric en un medi pel seu índex de refracció, i és de destacar la fita conceptual que re-

presenta. A partir d'aquest principi, Fermat va poder deduir que la llei de la refracció es verifica si s'admet que l'índex de refracció siga inversament proporcional a la velocitat de la llum, que naturalment haurà de ser finita. En la seua època, aquest resultat no va ser acceptat per raons diverses. Una raó va ser la formulació quasi teològica del seu principi; una altra, que suposava que la velocitat de la llum era finita, en contra del que s'admetia generalment a l'època.

1.1.2. *La velocitat de la llum*

Com podem saber si la velocitat de la llum és finita o infinita? Galileu (1564-1642) va suggerir un procediment per mesurar-la. Imaginem dues persones que se situen a certa distància durant la nit. En un moment, una d'elles encén un llum i simultàniament engegua un cronòmetre. Quan l'altra persona observa la llum de la primera, n'encén un altre. La primera persona para el seu cronòmetre quan veu la llum de la segona. Havent mesurat la distància entre les dues persones, hom pot deduir la velocitat de la llum. Els resultats eren (són) compatibles amb una velocitat infinita.

Descartes va idear altre mètode basat en l'observació dels eclipsis de la Lluna. Si la llum tardara un cert temps Δt en viatjar de la Terra a la Lluna, un eclipsi s'observaria amb un retard $2\Delta t$ a partir del moment de la conjunció Sol-Terra-Lluna, puix que en el moment de la conjunció encara hi ha llum viatjant cap a la Lluna i que es reflecteix cap a la Terra. Descartes conclou que, no havent-se observat cap retard, la velocitat de la llum ha d'ésser infinita.

En 1676, Römer (1644-1710) tingué la idea d'observar els eclipsis dels satèl·lits de Júpiter, en els quals intervenen distàncies més grans. Si la velocitat de la llum és finita, s'observarà una diferència en la durada dels eclipsis dels satèl·lits de Júpiter, segons siga la distància entre la Terra i Júpiter. A partir de les diferències mesurades obtingué una velocitat de 215.000 km/s, que encara que siga finita és una velocitat enorme: la llum necessita unes centmil·lèsimes de segon per recórrer un kilòmetre, o un segon per recórrer la distància Terra-Lluna. Aquests temps no podien ser apreciats per Galileu o per Descartes (i difícilment poden ser observats actualment) i per això els seus procediments condueixen a resultats compatibles amb una velocitat de la llum infinita. Recordem que el valor de la velocitat de la llum en el buit mesurat actualment és de

300.000 km/s. Ja veurem més tard la importància de la mesura de la velocitat de la llum per decidir sobre la seua naturalesa.

1.1.3. *La difracció*

Grimaldi (1618-1663) es va proposar estudiar la naturalesa de la llum amb la lloable intenció de no «tenir en compte l'autoritat dels mestres, però multiplicant els experiments i interpretant-los». Va començar per considerar si la propagació de la llum és o no rectilínia. Utilitzava la llum que entrava en una habitació a través d'un petit forat fet en la finestra. Col·locava diversos objectes al pas del feix de llum i observava l'ombra projectada en una pantalla. L'ombra no és neta sinó que, com a resultat de les mides finites del forat i de l'objecte, apareix una penombra, resultat d'una projecció geomètrica. Aleshores Grimaldi tingué la idea de fer un forat petitíssim i d'analitzar l'ombra d'un cabell. El que observà era completament nou: l'ombra del cabell no està ni perfectament definida, ni rodejada de penombra, sinó que està limitada per franges de colors.

Grimaldi varià les condicions de l'experiment i obtingué figures invariables de qualsevol objecte opac col·locat al feix de llum. Tan sols quan l'objecte era molt gran no observava franges. Grimaldi anomenà *difracció* a aquest nou fenomen. De fet, no cal col·locar cap objecte per produir difracció: un forat o una escletxa il·luminats donen lloc a una projecció en una pantalla que no respon a la seua projecció geomètrica, sinó que apareixen franges, tal com s'il·lustra en la figura 2 pel cas d'un forat il·luminat.

1.2. ONA O CORPUSCLE?

Respecte a la naturalesa de la llum, bàsicament són dues les concepcions que entren en joc al llarg de la història: ones i corpuscles. Els antics pitagòrics afirmaven que els elements estan formats per partícules amb formes geomètriques regulars, i a la partícula de foc (i per tant, a la de la llum) li atribuïen la forma d'un tetràedre. Els atomistes clàssics deien que els elements estan formats per àtoms en el buit, i consideraven que l'àtom de foc és esfèric. Aristòtil (384-322 aC) donà una descripció quasi ondulatòria de la

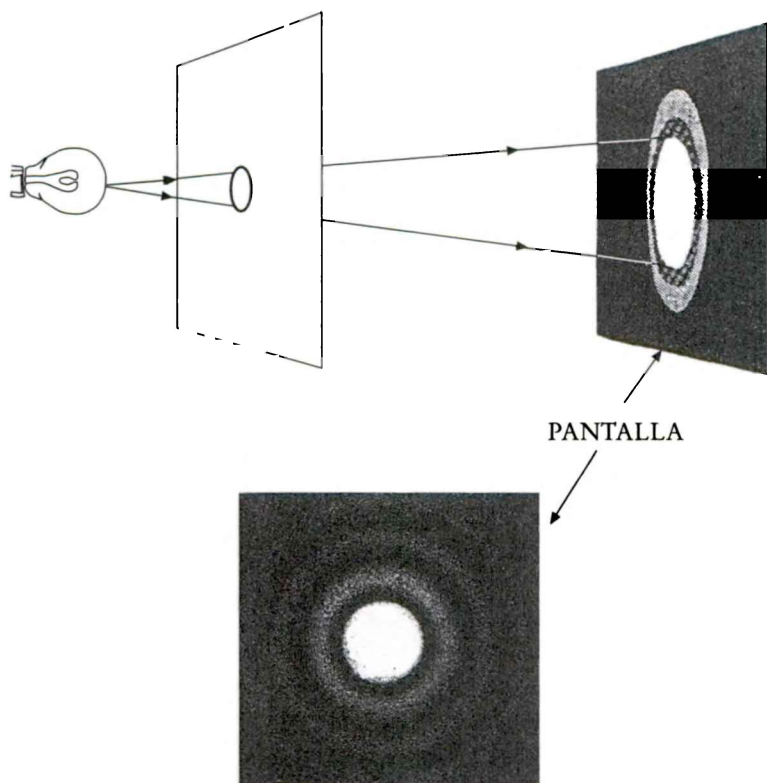


FIGURA 2. Difracció d'un forat.

llum: els objectes lluminosos vibren i fan vibrar un medi indefinit (el *diàfan*) entre l'objecte i l'ull, que provoca el moviment d'hums presents en l'ull. Alhazen (965-1039) sembla pensar en termes de partícules quan descriu la reflexió i la refracció. Grosseteste (1168-1253) o Bacon (1214-1284), seguint Aristòtil, pensen en la llum en termes d'ones. Al segle XVII, Descartes parla de *partícules*, mentre que Galileu (1564-1642) o Hooke (1635-1703) semblen preferir el terme *ones*. Però totes aquestes afirmacions, creences o intuïcions no estan sostingudes per cap teoria que expliqui els experiments i a partir de la qual es puguin deduir fets contrastables. D'això s'encarregaran Newton (1642-1727) i Huygens (1629-1695), que plantejaran el debat ona/partícula en termes de la ciència moderna.

1.2.1. *Característiques de partícules i d'ones*

Hi ha dos conceptes bàsics que la física utilitza per descriure els fenòmens: *partícules* i *ones*. Com a exemple de partícula, podem pensar en una pedra. Una pedra ocupa sempre una regió específica de l'espai, i encara que la llancem, mai no omplirà tot l'espai. En el seu moviment, hi ha matèria que es desplaça. La trajectòria que segueix la pedra es pot deduir si es coneixen les forces que hi actuen, així com la seua posició i velocitat en un instant determinat (tal és el contingut de l'anomenada *segona llei de Newton* de la dinàmica). Com a exemple d'ones, podem pensar en les que es produeixen en la superfície de l'aigua quan es deixen caure gotes contínuament. Al cap d'una estona, les ones ocupen tot l'espai disponible en qualsevol instant. Les partícules fan, doncs, referència a un fenomen localitzat, mentre que les ones són un fenomen deslocalitzat. En el cas que considerem, les gotes d'aigua pertorben el punt de la superfície sobre el qual cauen, i aquesta pertorbació es propaga a tots els punts: observem cercles concèntrics de punts que estan en el mateix estat de pertorbació. Però en aquesta propagació no hi ha cap transport de matèria. N'hi ha prou amb l'observació d'un suro flotant en l'aigua: encara que es propaguen ones, el suro queda sempre en la mateixa posició. Conèixer com es propaga la pertorbació (o com es propaga el moviment ondulatori) és tècnicament més complicat que en el cas d'una partícula, i depèn, entre altres factors, del tipus d'ona considerada. El que és important de saber ací és que la velocitat de propagació de les ones en un medi, depèn de la densitat i de les propietats elàstiques del medi.

1.2.2. *La teoria corpuscular de Newton*

Newton parteix d'un postulat inicial: suposa que la llum està formada per corpuscles que es propaguen a una velocitat enorme. Com que la llum pot travessar gasos, líquids i sòlids transparents, dedueix que tots els cossos, qualsevol que siga el seu estat, estan formats per parts disjunctes, que s'atrauen per gravetat. La trajectòria rectilínia de la llum s'explica per la simple inèrcia dels seus corpuscles. Vegem ara com Newton explicava les lleis de la reflexió i de la refracció amb aquest postulat.

La reflexió és el resultat d'un rebot en arribar la llum a la superfície de separació de dos medis. Hi ha una força, dita *refrigent*,

uniformement repartida per la superfície, que actua sobre els corpuscles de la llum sense necessitat de tocar-los, i que és perpendicular a la superfície de separació. La mateixa força és responsable de la reflexió i de la refracció. Tot és ara qüestió de fer un càlcul. En una regió centrada en la superfície i d'un cert gruix, actuarà eixa força constant, tal com s'indica en la figura 3, on es mostren les condicions del càlcul pel cas de la refracció. La llum incident descriu una trajectòria rectilínia en les regions 1 i 2, puix que els corpuscles no s'hi veuen sotmesos a cap força. En la regió ombrejada la trajectòria és parabòlica, com a resultat de la força constant (igual que la trajectòria seguida per un objecte llançat sobre la superfície de la Terra, a causa de l'acció de la força de la gravetat, que és constant en la superfície). La regió d'actuació de la força refringent ha de tenir un gruix molt petit, perquè en l'observació tenim la impressió que el raig es trenca en un punt. El càlcul mostra que el quocient $\sin i / \sin r$ és igual a una constant que depèn dels efectes de la força, que al seu torn dependrà de les propietats dels medis. Queda així deduïda la llei de la refracció, a partir d'unes hipòtesis generals.

Si la força refringent s'oposa al moviment dels corpuscles, el raig se separa de la normal, i la velocitat dels corpuscles serà menor en el segon medi que en el primer. Per contra, si la força refringent

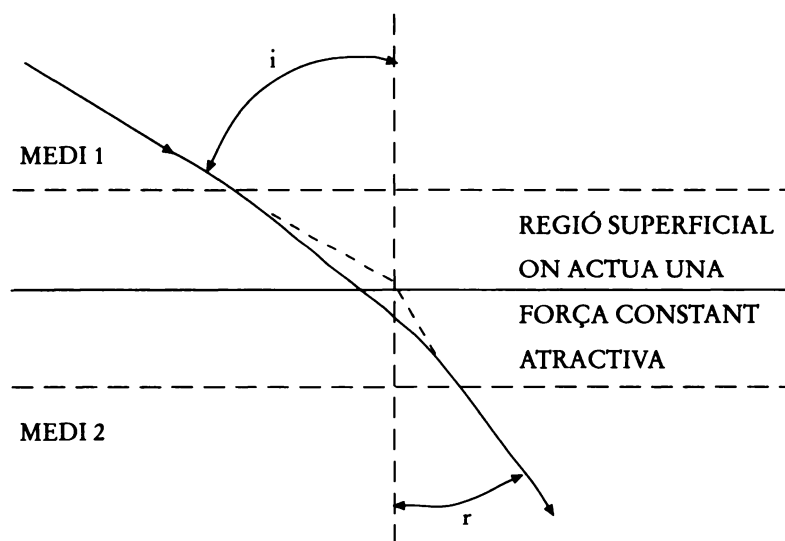


FIGURA 3. La refracció segons Newton.

va en el sentit del moviment, la velocitat serà major i el raig s'acostarà a la normal. Per tant, segons la teoria corpuscular, la velocitat de la llum és necessàriament més gran en el vidre que en l'aire, on al seu torn és major que en el buit. Aquestes conclusions semblen donar la raó a Descartes i refutar Fermat. Finalment, si la força refringent s'oposa al moviment i és prou gran, pot impedir als corpuscles de llum travessar la superfície de separació i aleshores tenim la reflexió sense refracció.

Newton va analitzar també altres aspectes de la llum: va estudiar els colors produïts amb llum solar incident sobre un prisma i va demostrar que la llum blanca està formada per diferents colors. Aquesta descomposició de la llum blanca en colors és la que es produeix, per exemple, en les gotes d'aigua en l'atmosfera i la que origina l'arc de Sant Martí. Segons Newton, a cada u dels colors de la llum li correspon un corpuscle diferent. Com que la força refringent és la mateixa i els corpuscles són desviats de forma diferent per un prisma, els corpuscles han de tenir masses diferents: la massa major és la dels corpuscles vermells i la menor, la dels corpuscles violeta. Així pot explicar, al menys qualitativament, el fenomen de la difracció. La força refringent actua en les proximitats dels cossos. Què passa quan la llum arriba tangencialment a un objecte com un cabell? Que els corpuscles patiran una desviació tant més gran com més a prop passen del cabell. Però la desviació depèn de la massa, i serà tant major com menor siga aquesta. En conseqüència, s'hauran d'observar franges de color en tot límit de l'ombra d'un objecte il·luminat.

Per explicar que tota refracció s'acompanya sovint d'una reflexió parcial, Newton va haver de postular l'existència de l'èter. El raonament en esquema seria el següent: estudiant la formació de colors en bombolles de sabó i en lents planoconvexes, Newton va observar que la formació de colors depèn només del gruix travessat (més exactament, del camí òptic, tal com el va definir Fermat) i que la tonalitat que apareix per un gruix determinat es torna a trobar en gruixos múltiples del primer. En la figura 4 es mostra un esquema amb la formació dels anells en una lent planoconvexa. Existeix, per tant, una periodicitat en la llum, característica per a cada color, periodicitat que Newton va relacionar amb l'existència de certes vibracions. Aquestes vibracions no poden ser degudes a les parts constituents dels cossos, perquè de les propietats elàstiques dels cossos no es podria mai obtenir una velocitat tan enorme com la de

la llum. Per això va postular l'existència d'un medi, que anomenà *èter*, «incomparablement més subtil, més elàstic i més actiu que l'aire», que penetra tots els cossos i ocupa «la vasta extensió dels cels». En arribar a un medi, els corpuscles creen en l'èter contingut pel medi una ona, que es propaga més ràpidament que aquests corpuscles. Aquesta ona actua sobre els propis corpuscles i pot haver-hi oposició al moviment (la qual cosa resulta en una reflexió) o acord amb el moviment (la qual cosa resulta en una refracció). A més a més, aquesta reflexió depèn del tipus de corpuscle, i es pot explicar amb el mateix efecte la formació de colors en bombolles de sabó o en lents.

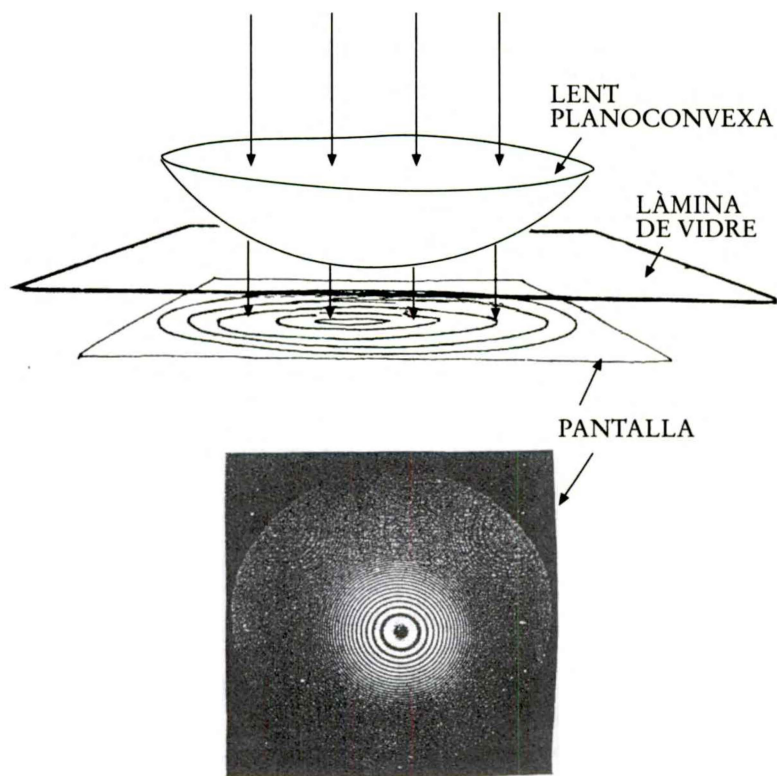


FIGURA 4. Anells de Newton.

1.2.3. La teoria ondulatòria de Huygens

Huygens considera que la teoria corpuscular de la llum no pot explicar la seua propagació rectilínia. I ho raona així. Suposem que hi ha dos fluxos de partícules seguint trajectòries rectilínies que es tallen en un punt. Hi haurà corpuscles que xocaran entre si, cosa que produirà que se separen de la trajectòria rectilínia inicial i que disminuesca el nombre de corpuscles que segueixen la trajectòria inicial. Però el que s'observa amb dos raigs de llum que es creuen és que no hi ha ni desviació ni disminució de la intensitat, contràriament al que caldria esperar amb corpuscles. Ara bé, un moviment ondulatori es caracteritza perquè no hi ha transport de matèria, i dues ones poden creuar-se sense que es modifiquen la seua propagació ni les seues intensitats. La llum seria més bé un moviment ondulatori. Una ona produeix vibracions en un medi; però quin és el medi on es propaga la llum? Huygens es va veure obligat a postular l'existència d'un èter on es propaguen ones lluminoses, i llavors hagué de demostrar que el moviment ondulatori origina una propagació rectilínia de la llum.

El raonament es prou abstracte, però queda clar seguint la figura 5, que pot fer-se amb ajut d'un compàs. Suposem que en l'instant t_0 el punt A és centre de vibracions, que s'emeten en totes les direccions amb una velocitat constant. En el instant t_1 les vibracions hauran arribat al front esfèric HI , i en el instant t_2 al front esfèric DF . Però els punts del front HI són també emissors de vibracions, i en el instant t_2 les seues vibracions hauran arribat als fronts esfèrics KL . Tots aquests fronts secundaris són tangents al front DF . Per tant, tots els punts intermedis són centres d'ones secundàries que es reforcen en la seua envolupant comuna, coincidint amb l'ona principal produïda per A . Aquest resultat es coneix ara per *principi de Huygens*. Per veure com aquest principi explica la propagació rectilínia, col·loquem ara un diafragma (part inferior de la figura 5). Cada partícula de l'èter en el front esfèric limitat pel diafragma es converteix en una font secundària de vibracions. L'envolupant comuna en l'instant t_2 està dintre del sector CE . Les ones secundàries es reforcen dintre d'aquest sector, i és menyspreable l'energia lluminosa fora d'aquest. Per tant, la intensitat lluminosa és només apreciable dintre del con amb vèrtex en A i limitat pel diafragma BG , amb la qual cosa queda justificada la propagació rectilínia, malgrat que siguen ones esfèriques les que es propaguen.

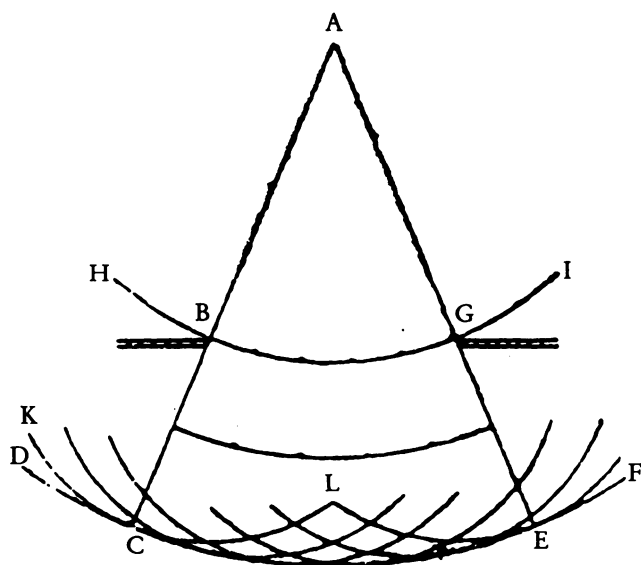
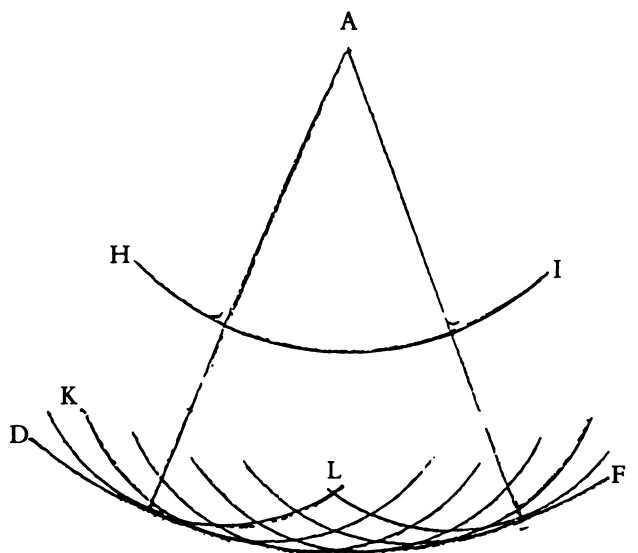


FIGURA 5. El principi de Huygens.

Huygens aplicà aquest principi per explicar les lleis de la reflexió i de la refracció. Ací ens limitarem a considerar la refracció. Ara no hi ha xocs, sinó centres de vibració. Per considerar la refracció, Huygens ha de suposar, com ho va fer Newton, que els cossos tenen una estructura discontinua i que l'èter circula lliurement entre les parts constituents dels cossos. Aleshores, les vibracions de l'èter es veuran frenades per la presència de les parts constituents, i com a conseqüència, segons la teoria ondulatoria, la velocitat de propagació de la llum en l'èter serà major que en qualsevol cos: la llum es mou més ràpidament en l'èter que en un gas, més en un gas que en un líquid, o més en un líquid que en un sòlid. La demostració de Huygens de les lleis de la reflexió i la refracció es fa també amb ajut d'un regle i un compàs. La seua expressió per la llei de la refracció és: $\sin i / \sin r = v_1 / v_2$, on v_1 i v_2 es refereixen a les velocitats de la llum en els medis 1 i 2.

1.2.4. *Amb quina teoria ens quedem?*

Hem vist que al segle XVIII hi havia dues teories alternatives sobre la llum, formulades de manera més rigorosa que les intuïcions prèvies. Ambdues teories tenen les seues deficiències o inconsistències i hi ha fets que no poden explicar. Per exemple, Huygens no té explicació per als colors i escriu que «les hipòtesis del senyor Newton són molt probables». Per la seva banda, Newton diu que ha refet certs experiments de Huygens sense trobar els mateixos resultats (posteriorment es va veure que les mesures de Newton eren errònies).

La qüestió ara és que dues teories diferents, partint d'hipòtesis diferents, poden explicar des d'un punt de vista lògic les mateixes lleis empíriques de la reflexió i la refracció. Amb quina teoria ens quedem? Hem vist que hi ha una predicció on les teories difereixen completament: segons la teoria corpuscular, la velocitat de la llum en l'èter és menor que, per exemple, en el vidre. La predicció de la teoria ondulatoria és la contrària. Existeix, per tant, un experiment *crucial* que decidirà entre totes dues: la mesura directa de la velocitat de propagació de la llum en medis diferents. Aquest experiment va trigar uns quants anys en poder ser realitzat de manera prou precisa.

1.3. ÉS UNA ONA!

Al llarg del segle XVIII i la primera meitat del segle XIX, la teoria newtoniana era la més generalitzada. Poc a poc, però, aparegueren noves observacions i nous experiments, que eren incompatibles amb les seues prediccions i que portaren a l'acceptació general de la teoria ondulatòria, encara que en termes molt diferents respecte de la formulació original de Huygens. Per exemple, com que segons la teoria corpuscular la dispersió és directament proporcional a l'índex de refracció, Newton va afirmar que seria impossible construir objectius acromàtics (que no produeixen imatges irisades), i per això va idear un telescopi amb mirall, conegut actualment per *sistema de Newton*. Euler (1707-1783) va demostrar que això no era cert, i en 1757 ja es construïren objectius acromàtics, superposant lents polides en vidres diferents i convenientment tallades.

1.3.1. Interferències amb la llum

Thomas Young (1773-1829) s'interessà en l'estudi dels colors en bombolles de sabó. Considerava empipadora l'explicació de Newton, que combina l'acció dels corpuscles amb les d'una ona (les vibracions en l'èter). Li resultava més senzill suposar que sempre hi ha reflexió: una ona lluminosa es reflectiria en la cara interior de la bombolla, una altra es reflectiria en la cara exterior, i totes dues se superposarien camí de l'ull, fent que certes vibracions pogueren anul·lar-se totalment i produir la sensació de color. En efecte, si dues vibracions idèntiques se superposen, s'anul·len quan la seua diferència de camí és igual a mitja longitud d'ona (o múltiple de mitja longitud d'ona), mentre que es reforcen si la diferència és igual a una longitud d'ona (o múltiple d'una longitud d'ona). Young anomena *interferència* a aquest fenomen de composició d'ones, i creu haver demostrat que «hom pot generar l'obscuritat superposant la llum a la llum». Tots hem observat que una taca d'oli sobre l'aigua té un aspecte irisat. Això es produeix a causa de les interferències dels diferents raigs reflectits i refractats en la capa d'oli. En la figura 6 s'il·lustra aquest fenomen. La diferència de camins òptics entre els raigs 1' i 2' és igual a la suma de les distàncies AB més BC multiplicada per l'índex de refracció de l'oli.

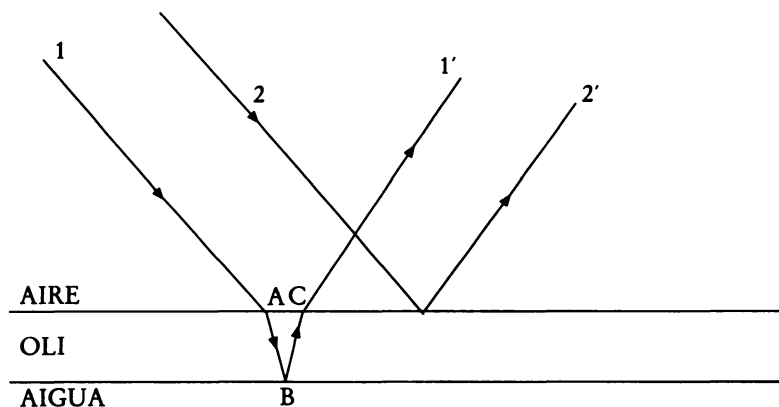


FIGURA 6. Interferències en una capa d'oli sobre aigua.

Young considera l'experiment dels anells de color amb una lent planoconvexa (el que està representat en la figura 4). Igual que Newton, col·locà aigua entre les cares del dispositiu, i va observar que els anells es comprimeixen cap al centre. Un anell correspon a un cert valor del retard entre dues ones que interfereixen. Si en introduir aigua cal un gruix menor per obtenir el mateix retard és perquè la velocitat de la llum és menor en l'aigua que en l'aire. Arribà així a la mateixa conclusió que Huygens, però per un camí diferent: la velocitat de la llum és inversament proporcional a l'índex de refracció. Finalment, Young imaginà un experiment que ningú no havia pensat abans i que ha esdevingut cèlebre amb el nom de *experiment de Young*. Hom il·lumina una pantalla que tinga una petita esclatxa. Aquest forat es comporta com una font puntual i emet un feix divergent. Col·loquem una segona pantalla amb dues petites esclatxes. Els dos feixos transmesos se superposen en una regió on s'han d'observar interferències. Young ho verifica: apareixen franges rectilínies alternativament clares i fosques allà on les esperava. Si tapa una de les esclatxes, les franges desapareixen. No hi ha contestació possible: llum més llum pot donar obscuritat. Young publicà els seus treballs en 1802 i 1804, amb no molt bona fortuna: fou o bé ignorat o bé violentament atacat, i els seus treballs no seran reconeguts fins uns anys més tard.

1.3.2. Els treballs de Fresnel

Fresnel (1788-1827) va arribar a donar la primera formulació matemàtica detallada de la teoria ondulatòria, amb la qual va explicar molts fenòmens òptics. L'observació de les franges de difracció el deixà convençut de la validesa de la teoria ondulatòria per explicar els fets observats. Començà a fer càlculs suposant que les vibracions lluminoses són les més senzilles possibles, és a dir, ones sinusoidals. A més a més considerà que les vibracions que interfereixen es reforcen quan estan en fase (quan la diferència de camí és igual a un múltiple de la seua longitud d'ona) i les vibracions s'anul·len quan estan en oposició de fase (quan la diferència de camí és múltiple senar de mitja longitud d'ona). Després de molts dubtes, considera que les interferències es produeixen entre les ones secundàries, generalitzant el principi de Huygens: *les vibracions d'una ona lluminosa en cada u dels seus punts són iguals a la suma de tots els moviments elementals que hi enviaria en el mateix instant, i actuant aïlladament, cada petita part d'aquesta ona, considerada en qualsevulla de les seues posicions anteriors*. A partir d'aquestes hipòtesis, va poder explicar una gran quantitat d'experiments, molt variats i precisos, sobre la difracció de la llum. L'Acadèmia de París li va atorgar un premi en 1819 per aquest treball. Un dels membres del jurat (Poisson) va deduir de les fórmules de Fresnel el que considerà un resultat absurd: il·luminant un petit disc opac segons el seu eix, s'hauria d'observar il·luminada una petita regió al voltant de la projecció del seu centre en una pantalla paral·lela, com si no hi hagués disc. Fet l'experiment, es confirmà la predicció deduïda del càlcul de Poisson. No és l'únic exemple de com un detractor acaba aportant una prova d'allò que vol negar.

1.3.3. L'experiment crucial

Ja hem esmentat abans l'experiment *crucial* que ha de decidir entre les teories ondulatòria i corpuscular de la llum. Es tracta de mesurar la velocitat de propagació de la llum en diferents medis i verificar on és més gran: en l'èter o en l'aigua. En 1848, Foucault (1819-1868) i Fizeau (1819-1896), independentment, realitzen aquest experiment i troben que la velocitat de la llum és inversament proporcional a l'índex de refracció, tal com predià la teoria

ondulatòria. A partir d'ara s'abandona la teoria corpuscular, i la teoria ondulatòria de la llum esdevé la teoria *clàssica*, assumint els treballs de Young i de Fresnel. Tots els fenòmens lluminosos poden explicar-se utilitzant únicament el principi de Huygens-Fresnel.

1.3.4. Òptica i electromagnetisme

Passem ara a un altre domini de la física, el que s'ocupa de càrregues elèctriques, corrents elèctrics i imants. El que importa saber per a la nostra història és que en la primera meitat del segle XIX una sèrie d'experiments evidenciaren l'equivalència entre corrents elèctrics i imants. En 1820 Oersted (1777-1851) observà que un corrent elèctric variable pot desviar una brúixola situada en les seues proximitats. En 1820 Ampère (1775-1836) mostrà que dos fils conductors paral·lels i pròxims experimenten forces mútues quan hi passen corrents elèctrics. En 1831 Faraday (1791-1867) produí corrents elèctrics induïts en un circuit en moure adequadament un imant en les seues proximitats i també en generar variacions de corrent en un altre circuit elèctric pròxim al primer. Aquestes i altres experiències similars s'explicaren en termes de camps elèctrics i magnètics, dels quals n'hi ha prou donar ací una definició operativa. Hom diu que en una regió de l'espai existeix un camp elèctric (magnètic o gravitatori), si en col·locar-hi una càrrega elèctrica (una brúixola o una massa, respectivament) es veu sotmesa a una força. La idea darrere del concepte de camp és evitar l'acció a distància.

Maxwell (1831-1879) volia trobar una explicació general a les lleis de l'electricitat i el magnetisme. Va deduir que un camp elèctric variable en el temps genera un camp magnètic variable en el temps, que al seu torn genera un camp elèctric variable en el temps, i així successivament. Per tant, les característiques dels camps elèctrics i magnètics s'associen a la propagació d'una ona. Maxwell mostrà que l'ona electromagnètica és una ona transversal doble: una ona associada a un camp elèctric i una altra associada a un camp magnètic, totes dues perpendiculars entre si i perpendiculars a la direcció de propagació.

Per a la propagació de l'ona electromagnètica era necessari introduir un èter. Les característiques elèctriques i magnètiques de l'èter electromagnètic havien estat mesurades. Maxwell calculà la

velocitat de propagació de la pertorbació electromagnètica i trobà el mateix valor trobat per la velocitat de la llum: 300.000 km/s. Llavors Maxwell considera que «omplir l'espai d'un medi nou cada vegada que s'haja d'explicar un fenomen nou no seria un procediment molt filosòfic; al contrari, si per a l'estudi de dues branques diferents de la ciència s'arriba independentment a la hipòtesi del medi, i les propietats que s'han d'atribuir a aquest medi resulten ser de la mateixa naturalesa que les que hem d'atribuir a l'èter lluminós per explicar els fenòmens de la llum, es trobaran seriosament confirmades les nostres raons per creure en l'existència física d'un medi semblant.»

Maxwell aplicà les seues equacions de propagació d'una ona electromagnètica a diferents tipus de medis, les propietats elèctriques i magnètiques dels quals havien estat mesurades, cosa que li permetia calcular la velocitat de propagació de les ones electromagnètiques en cada medi. El resultat és que en cada medi, les velocitats de propagació de les ones electromagnètiques i de la llum són iguals. La conclusió és clara: la llum és una ona electromagnètica. El medi de propagació (èter, aire, aigua...) ja no intervé en les seues propietats mecàniques, sinó en les seues característiques elèctriques i magnètiques. Maxwell morí sense que cap de les seues conclusions fóra verificada.

En 1885 Hertz (1857-1894) va descobrir ones produïdes per una font electromagnètica. Realitzà tota una sèrie d'experiments per conèixer les seues propietats de propagació, reflexió, refracció, caràcter transversal, longitud d'ona... Es va mesurar la velocitat de propagació de les posteriorment anomenades *ones hertzianes*, i es obtenir un valor ja conegut: 300.000 km/s. Llavors, es va pensar en la teoria de Maxwell i es va verificar que els resultats trobats s'incorporen perfectament a la teoria electromagnètica. La llum és, doncs, una ona electromagnètica, formada per la propagació de dues ones, elèctrica i magnètica, perpendiculars entre si i a la direcció de propagació (és el que s'anomena una *ona transversal*).

1.4. ÉS UNA ONA I ÉS UN CORPUSCLE!!!

Sembla així que a finals del segle XIX es va cloure el debat sobre la naturalesa de la llum: la llum és una ona electromagnètica, descrita per les equacions de Maxwell. Ara veurem que les coses no són

tan senzilles. Per exemple, l'èter, el medi material on es propaguen les vibracions, ha de tenir propietats sorprenents. Ja hem mencionat que la velocitat de propagació d'una ona en un medi es relaciona amb les seues propietats elàstiques. L'èter hauria de tenir una rigidesa com la de l'acer amb una densitat d'1 mg per metre cúbic. Aquest valor tan petit de la densitat de l'èter és per una banda satisfactori (un medi tan tènue no frenaria gaire el moviment dels astres), però per una altra banda ens deixa perplexos: com és possible que un medi tan tènue siga al mateix temps tan resistent com l'acer?

1.4.1. *L'èter i la teoria de la relativitat*

L'èter hauria d'omplir uniformement l'espai, i es podria mesurar el moviment respecte de l'èter. Això tindria una conseqüència important: la possibilitat de determinar el moviment absolut. Pensem que sempre que es parla de repòs o de moviment, es fa respecte d'un sistema de referència: un objecte en repòs respecte de la Terra, es mou respecte del Sol, que a la seua vegada es mou respecte del centre de la galàxia, i així successivament. Galileu s'adonà de la impossibilitat de detectar el moviment absolut. Això es formula d'una manera més abstracta: les lleis de la física tenen la mateixa forma en tots els sistemes de referència que es moguen entre ells amb velocitat uniforme (es diuen *sistemes inercials*). Però l'èter canviaria les coses: si ompli tot l'espai de manera uniforme, el sistema de referència lligat a l'èter seria el que ens permetria distingir un moviment absolut, que seria detectat pels fenòmens electromagnètics.

Michelson (1852-1931) ideà un tipus d'experiment en el qual es mesura una quantitat directament proporcional al quadrat de v/c , on v és la velocitat suposada respecte de l'èter i c és la velocitat de la llum en l'èter. Es tracta de dividir un feix de llum en dos, fer-los recórrer camins diferents i ajuntar-los per produir interferències. Es pot utilitzar la llum provinent d'una estrella, prenent les mesures en dues ocasions, segons que la Terra s'acoste o s'allunye de l'estrella. L'experiment fou realitzat en 1881, refet per Morley en 1884 i repetit posteriorment per altres autors i en diferents condicions. El resultat és sempre el mateix: no es detecta cap moviment respecte de l'èter. Això significa que la velocitat de la llum és sempre la mateixa, independentment que ens moguem cap a la font de llum o ens n'allunyem.

En 1905, Einstein (1879-1955), que aparentment ignorava aquests experiments, va publicar un treball intitulat *Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment*, on analitzava certes deficiències de la teoria de Maxwell i suggeria solucions. Aquest treball va suposar el naixement de la teoria de la relativitat. Bàsicament, podríem resumir el seu raonament així: les equacions de Maxwell canvien quan es fa una transformació clàssica de coordenades que tinga en compte una velocitat relativa uniforme (això és el que feia pensar en la possibilitat de detectar el moviment absolut). Però sembla raonable acceptar que totes les lleis físiques hagen de ser les mateixes en sistemes de referència inercials. Si les equacions de Maxwell canvien en fer el canvi d'un sistema a un altre, possiblement això vullga dir que les transformacions utilitzades no siguen les adequades. Per tant, Einstein va postular la impossibilitat de detectar el moviment absolut, ni per medis mecànics ni per medis electromagnètics (principi de la relativitat anomenada *especial* o *restringida*). Analitzant les conseqüències del postulat, va arribar a dues conclusions: 1) S'ha de postular la invariància de la velocitat de la llum: la llum es propaga sempre en el buit amb certa velocitat c independentment de l'estat de moviment de la font lluminosa; 2) s'ha de rebutjar la idea de l'èter: l'èter esdevé superflu pel fet que la nostra concepció no fa cap ús d'un «espai absolut en repòs» dotat de propietats particulars.

L'anàlisi de la teoria de la relativitat necessitaria un altre seminari, i com és evident no ho farem ací. Ens acontentarem d'assenyalar dos aspectes. Per una banda, haurem d'admetre que la llum pot propagar-se en el buit, i les anomenades *propietats electromagnètiques* de l'èter no seran més que una mesura de la intensitat de les forces electromagnètiques en el buit. Per una altra, encara que les conseqüències de la teoria de la relativitat puguin xocar amb les nostres idees intuïtives, estan confirmades àmpliament pels resultats experimentals.

1.4.2. L'efecte fotoelèctric

No hem acabat de parlar d'Einstein. També el 1905 va publicar un treball sobre l'anomenat *efecte fotoelèctric*, que va suposar una altra revolució. Quan Hertz realitzà el seu experiment per detectar ones electromagnètiques va observar un fenomen que no va poder

explicar: una placa metàl·lica il·luminada adequadament pot emetre electrons. Aquest és l'efecte fotoelèctric, que va ser analitzat posteriorment per altres autors. El resum dels experiments és que l'emissió és tant més important com major siga la freqüència de la llum, però existeix una freqüència l·lindar, per sota de la qual no s'arranquen electrons. A més a més, independentment de la intensitat del feix, l'emissió d'electrons és instantània si la freqüència està per sobre el valor l·lindar. La teoria ondulatòria és incapaç d'explicar els fets experimentals. Els electrons estan lligats al metall, i per extreure'ls cal comunicar-los una certa energia, cosa que pot fer-se escalfant el metall (efecte termoelèctric) o il·luminant-lo. La llum transporta energia, que pot ser absorbida pels electrons. Si aquesta energia és petita, tot seria qüestió d'esperar un temps suficient perquè els electrons pogueren absorbir l'energia necessària. Tal com hem esmentat abans, això no és així: existeix una freqüència l·lindar i, quan es produeix, l'emissió és instantània. Totes dues observacions són incompatibles amb la teoria ondulatòria.

Einstein proposà una explicació en termes de corpuscles. Cal dir que al final de segle, Planck havia utilitzat una hipòtesi nova per explicar les propietats de la radiació emesa pels cossos calents. Aquesta hipòtesi fa referència al fet que les ones electromagnètiques estacionàries a l'interior d'una cavitat no tenen qualsevol valor de l'energia, sinó solament valors múltiples d'una certa quantitat mínima d'energia hf , on f és la freqüència de l'ona i h és una constant (*la constant de Planck*). El que inicialment era considerat com un artifici matemàtic per reproduir certs resultats experimentals, va ser transformat per Einstein en un postulat amb un profund significat físic: la llum de freqüència f està constituïda per corpuscles (anomenats ara *fotoons*) amb energia hf . En l'efecte fotoelèctric, un fotó pot ser absorbit per un electró, i si l'energia és superior a un cert valor l·lindar, l'electró podrà escapar del metall. En 1906, Millikan va començar una sèrie d'experiments sembla que amb la sana idea inicial de contradir aquesta hipòtesi. El que va obtenir va ser la confirmació quantitativament (i amb molta precisió) de les prediccions d'Einstein. En particular, va determinar la constant de Planck de manera independent i en un sistema completament diferent del que va fer Planck. Juntament amb els treballs de Bohr, estenent aquesta hipòtesi de quantificació a l'estudi de l'àtom, s'obrí el camí a un nou camp de la física: la descripció de les propietats del món microscòpic requereix unes noves lleis, descrites pel que s'a-

nomena *mecànica quàntica*. De nou, arribem a un punt en el qual hem de tallar, puix caldria un altre seminari per parlar dels fenòmens quàntics. Ja veiem com es complica la cosa: parlant de la llum ens hem trobat amb la relativitat i la física quàntica, els dos pilars d'allò que alguns anomenen la «física moderna».

1.4.3. *La dualitat ona/corpuscle*

Reprenent la nostra història de la llum, les preguntes que ens podem fer ara són: hem fet marxa enrere?; hem d'acceptar la teoria de Newton?; com s'expliquen, doncs, els fenòmens típicament onduladoris, com per exemple les interferències? Tractaré de donar ara una mera descripció del que passa.

Tornem a considerar l'experiment de Young amb dues esclatxes, paradigma de l'observació d'interferències. Hi ha una font, una pantalla amb dues esclatxes i una pantalla amb detectors (que són sensibles a l'energia que arriba per unitat de superfície i per unitat de temps, el que tècnicament es coneix per *intensitat*). Anem a descriure què és el que passa quan es fan una sèrie d'experiments amb partícules i amb ones, considerant tres casos, segons que obrim una de les dues esclatxes o totes dues.

A la part superior de la figura 7 es mostra el resultat en el cas de partícules (per exemple, utilitzant un canó que llança boletes). Les característiques essencials són les següents: 1) les partícules arriben d'una en una (sentim el colp) i estan localitzades (no tenim mitja partícula en un detector i mitja en un altre); 2) les partícules passen per una esclatxa o per l'altra, però no per les dues alhora (hi ha una trajectòria definida); 3) l'energia comunicada al detector és proporcional al nombre de partícules i, per tant, la intensitat amb les dues esclatxes obertes és igual a la suma de les intensitats per separat $I_1(x) + I_2(x)$. Les corbes discontinües de la figura corresponen al nombre de partícules detectades quan només s'ha obert una esclatxa, mentre que la corba contínua indica el nombre detectat quan s'han obert les dues esclatxes.

A la part inferior de la figura 7 es mostra el resultat en el cas d'ones. Per exemple, produint ones en la superfície de l'aigua, i utilitzant com a detectors una sèrie de flotadors, l'altura dels quals ens dóna una mesura de la intensitat. Les característiques essencials són les següents: 1) les ones arriben a tota la regió de detectors, amb

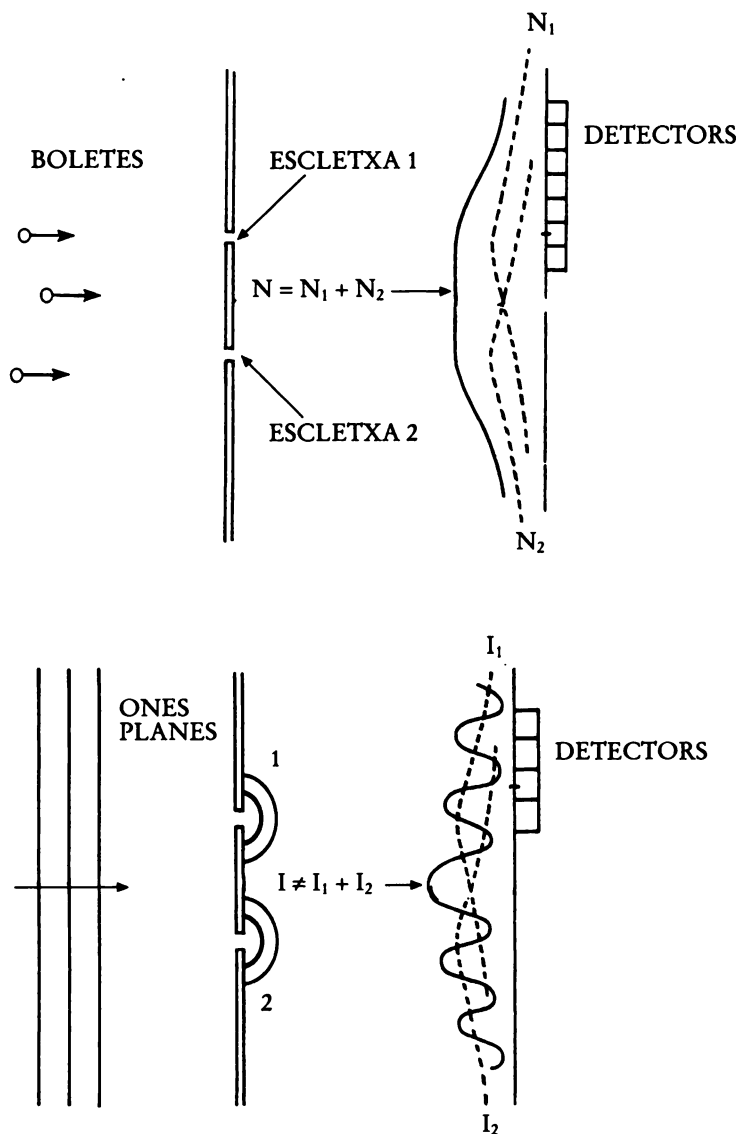


FIGURA 7. Experiment de les dues esclertes per partícules i per ones.

la qual cosa no hi ha localització; 2) les ones passen simultàniament per les dues esclatxes i no hi ha trajectòria; 3) com que la intensitat és proporcional al quadrat de l'amplitud ja no s'acompleix que la intensitat amb dues esclatxes obertes siga la suma de les intensitats per separat (el quadrat d'una suma no és igual a la suma dels quadrats). De nou, les corbes discontinües de la figura corresponen a les intensitats detectades quan només s'ha obert una esclatxa, mentre que la corba contínua indica la intensitat detectada quan s'han obert les dues esclatxes.

Veiem així que el que caracteritza les interferències és que amb dues esclatxes obertes no es té la suma de les intensitats obrint una i l'altra esclatxa per separat. Young produí interferències amb la llum, d'on es dedueix que la llum és un fenomen ondulatori. Què fem amb la hipòtesi dels fotons? Podríem pensar que les interferències amb partícules són degudes a cert tipus d'interacció entre si. Per verificar-ho podríem imaginar un experiment en el qual la intensitat de la llum es baixi a valors tan petits que puguem assegurar que en tot instant només hi ha un fotó entre la font i els detectors. Si les interferències foren degudes a interaccions entre fotons, no hauríem d'observar cap interferència. En la figura 8 es mostra el resultat d'un experiment així. Es produeixen interferències fent passar la llum per una pantalla amb moltes esclatxes. El que es representa en la figura és el que s'observa en la pantalla segons siga el temps d'exposició: el cas *a*) correspon al menor temps i el cas *f*), al major. Al principi (cas *a*), observem impactes discrets (hom estaria temptat de dir que *veu* el fotó; en realitat calen uns quants fotons per produir la imatge fotogràfica). A mesura que augmenta el temps d'exposició, apareixen més impactes que semblen repartir-se aleatòriament. Però al cap del temps (i sempre amb la mateixa intensitat petita), apareixen les típiques franges d'interferència. Per tant, les interferències no són degudes a interaccions entre fotons. Hom estaria temptat de dir que cada fotó *sap* on ha d'anar perquè apareguen franges d'interferència.

Els fotons tenen un comportament estrany, però no són els únics objectes que es comporten així. En general, tots els objectes del món microscòpic (electrons, neutrons, protons, etc.), tenen el mateix comportament estrany: tots aquests objectes interaccionen com a corpuscles i es propaguen com a ones, i per això hom parla d'un comportament dual ona/corpuscle. Segons el tipus d'experiment que es considere, es manifesta l'un o l'altre dels aspectes de la

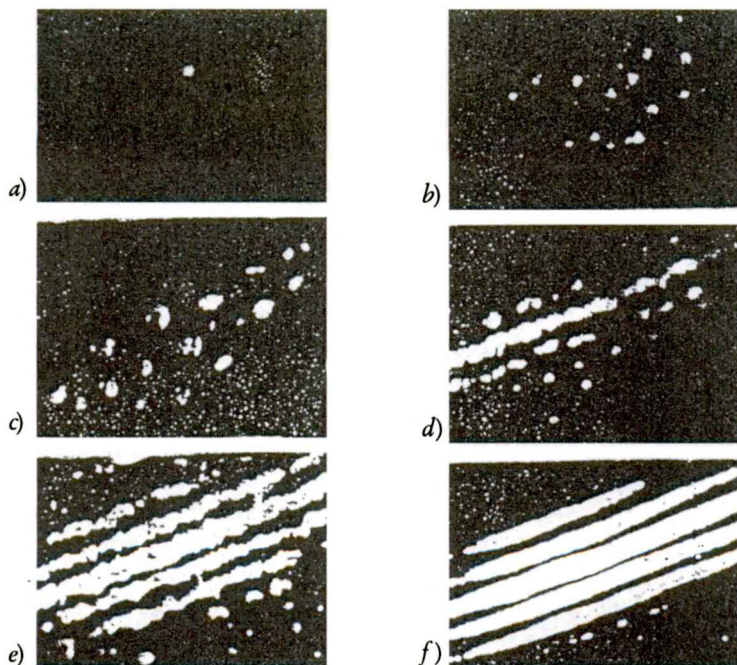


FIGURA 8. Experiment d'interferències variant la intensitat de la llum.

dualitat. La caracterització d'un d'aquests objectes es fa mitjançant el que s'anomena *funció d'ona*, que es calcula sense cap tipus d'ambigüïtat amb les lleis de la mecànica quàntica, la teoria que ens permet d'explicar les propietats íntimes de la matèria.

1.5. CONCLUSIÓ

Després d'aquest llarg periple, estem ja en condicions de precisar quines són les idees de la física actual sobre la naturalesa de la llum. Observem que d'alguna manera hem hagut de passar per tots els camps de la física, encara que no haja insistit en alguns casos per no allargar massa aquesta ja llarga exposició. Finalment, arribem a dir que la llum és una ona electromagnètica, de la mateixa naturalesa que les ones de ràdio, les ones de televisió, els raigs X o la radiació gamma. Aquestes ones difereixen en la seva longitud d'ona (o

equivalentment, en l'energia o en la freqüència). El nostre ull és sensible a les ones electromagnètiques amb longituds d'ona entre unes quatre i vuit deumilionèsimes de metre (colors violat i roig, respectivament), i aquesta part de l'espectre electromagnètic s'anomena *llum visible*, evidentment. Les radiacions infraroges, les ones de televisió, de ràdio o de radar tenen longituds d'ona majors, mentre que les radiacions ultraviolades, els raigs X o les radiacions gamma tenen longituds d'ona menors que les corresponents a l'espectre visible. Per interpretar la majoria de fenòmens que observem en la vida corrent, a escala humana podríem dir-ne, és suficient aquesta descripció. L'electromagnetisme explica tots els fenòmens relacionats amb la propagació de la llum, i altres propietats que no hem considerat ací, com ara la polarització de la llum.

Hi ha, però, altres fenòmens que només poden explicar-se considerant l'aspecte corpuscular. És a dir, aquestes ones són una mica especials: també son partícules, anomenades *fotons* i per això es diu que la llum, com d'altres objectes, té un comportament dual d'ona i de partícula. Aquest és el *misteri central* de la física quàntica. Molts físics s'han mostrat insatsfets amb aquesta dualitat, i s'han preguntat si aquest comportament il·lògic no significa que encara no s'ha assolit una explicació completa. És una possibilitat, però tot el que podem dir és que la física quàntica ha superat tots els tests experimentals que s'han imaginat fins ara.

No puc evitar de pensar en Keats, el poeta romàntic anglès que recriminava a Newton perquè en explicar l'arc de Sant Martí li havia llevat la seua poesia. Al meu parer, una cosa no exclou l'altra, i espere que els lectors estiguen d'acord amb la meua opinió. Per acabar, vull agrair al professor J. Ros per la seua inesgotable paciència en llegir els successius projectes de manuscrit, així com pels seus valuosos comentaris.

2. LA PERCEPCIÓ DEL COLOR

Carme Junqué i Plaja* i Pere Vendrell i Gómez*

2.1. VEURE EL MÓN «EN COLOR»

A qualsevol de nosaltres no ens estranya que el món sigui ple de colors. La visió acolorida de les coses que ens envolten sovint apareix com a sinònim d'optimisme i de ganes de viure. Enfront d'aquesta visió «en color», la visió «en gris», mancada de color, va associada simbòlicament al pessimisme i a la desgràcia. Veure-ho tot negre és evidentment una manera de dir que no tenim res clar i també de reconèixer que aquest estat de manca de coneixement és sinònim de la foscor. Sembla, doncs, que el nostre llenguatge atorga al color la qualitat d'esdevenir una font important de coneixement i també que per a la nostra vida fruir de la visió dels colors reforça la confiança en nosaltres mateixos i genera una visió més alegre i confiada de tot el que ens envolta.

2.2. ON COMENÇA LA VISIÓ DELS COLORS?

El sentit de la vista rau, com tots sabem, en aquest òrgan especialitzat que és l'ull. La part de l'ull capaç de captar la informació que porta la llum, base de la visió, és la retina. Efectivament, la retina, en el fons del globus ocular, està formada per un conjunt altament especialitzat de cèl·lules nervioses que codifiquen els primers estadis de la percepció del color. Les cèl·lules de la retina que reaccionen amb l'energia lumínica són els fotoreceptors i n'hi ha de

* Departament de Psiquiatria i Psicobiologia Clínica. Universitat de Barcelona.

dues classes: els cons i els bastonets. Els primers estan implicats en la visió del color i els segons, en la visió sense color. Els cons s'activen durant la visió diürna, perquè necessiten una intensitat lumínica alta per funcionar, i els bastonets, durant la visió nocturna, ja que posseeixen una sensibilitat major.

2.3. DE NIT TOTS ELS GATS SÓN GRISOS

El que acabem de dir comporta que la visió policromàtica, de colors, només és possible durant el dia, quan la intensitat de la llum és suficient per activar els cons; en canvi, de nit la nostra visió es monocromàtica. Els cons i els bastonets no es troben repartits a la retina de manera uniforme, sinó que els primers ocupen la part central, anomenada *fòvea*, on la visió és més precisa, mentre que els bastonets se situen més a la perifèria.

Veiem, doncs, que la visió policromàtica va associada a una major capacitat discriminativa, a una major precisió visual, i que és la visió típica de la llum diürna, quan la intensitat lluminosa és més alta. La visió monocromàtica es dona durant la nit, quan la llum és escassa i només els bastonets tenen la sensibilitat suficient per reaccionar a baixos nivells d'il·luminació.

De fet, capacitat de discriminació i sensibilitat a nivells baixos d'intensitat de llum són dos fenòmens dissociats a causa de la particular disposició dels cons i els bastonets a la superfície de la retina, com hem comentat abans. Si de nit mirem el cel estelat sense fixar la vista en cap estel concret, en veurem desenes de milers, però si provem de fixar-hi la mirada en un, veurem com tot seguit desapareix. En efecte, la visió general del cel estelat utilitza l'alta sensibilitat dels bastonets situats a la perifèria de la retina, però quan intentem fixar-nos en un de concret amb la intenció de discriminar-lo millor, fem que la seva llum incideixi sobre la *fòvea*, i en aquesta zona només hi ha cons que són incapaços de reaccionar amb un estímul lluminós d'escassa intensitat. La conseqüència és que l'estel s'esvaeix de la nostra visió.

2.4. EL SISTEMA BLAU-VERD-ROIG

La llum visible no és res més que una part de l'espectre de radiacions electromagnètiques, en concret, la que posseeix una longitud

d'ona entre 380 i 760 nanòmetres (un nanòmetre és la milmilionèsima part del metre). Més avall d'aquest interval trobem els raigs ultraviolats i els raig X, i més amunt, els raigs infrarojos i les ones de ràdio. Hi ha animals que són capaços de veure radiacions que nosaltres no podem percebre, com per exemple les abelles, que poden captar els raigs ultraviolats. Dintre de l'espectre visible, la llum blava correspon a la part més baixa i la vermella, a la més alta, mentre que la verda ocupa un lloc intermedi.

Si analitzem la resposta dels fotoreceptors a la llum, veurem que hi ha tres classes diferents de cons: els que tenen la seva màxima resposta a longituds d'ona curta (els cons del blau), els que la tenen a longituds mitjanes (els cons del verd) i a l'últim els que responen a longituds d'ona llarga (els cons del roig). Els bastonets responen a longituds d'ona intermèdies entre els cons del blau i els cons del verd. Els fotoreceptors, cons i bastonets, es reparteixen, per tant, les diverses longituds d'ona de l'espectre visible. Des d'aquesta primera etapa del processament de la llum fins a la visió acolorida del món de què parlàvem al començament cal la intervenció de molts altres mecanismes nerviosos.

Com poden sorgir tots els colors que podem percebre amb les múltiples seves tonalitats a partir de la informació sobre els tres colors bàsics que els fotoreceptors ens proporcionen? Molt abans de conèixer amb precisió el funcionament de les cèl·lules nervioses que processen la percepció del color s'havien proposat diverses teories explicatives.

El 1802, Thomas Young, físic i metge britànic, va proposar la denominada *teoria tricromàtica de la percepció del color*. Es fonamenta en l'experiència que qualsevol color pot ser reproduït amb la mescla de determinades quantitats de tres colors primaris. Cal advertir, però, que el resultat és distint si el que realment mesclem són pigments (pintures) o fonts de llum. Així, si mesclem pigments grocs i blaus la mescla resultant és verda. En canvi, si projectem un raig de llum roja i un altre de llum verda sobre una pantalla blanca, el que veurem serà llum groga. Si mesclem llum groga i blava, obtindrem llum blanca.

El fisiòleg alemany Ewald Hering (1905-1965) va suggerir un altre factor important en la percepció del color: els colors estarien representats en el sistema visual en forma de colors oposats; hi hauria dos parells de colors oposats que serien el verd i el roig, d'una banda, i el blau i el groc, d'una altra.

Com hem vist, els fotoreceptors que constitueixen el primer nivell de processament del color, operen d'acord amb la teoria de Young. La sensació produïda per qualsevol color es deu a l'activació en les proporcions adequades dels tres tipus de cons. Els cons, igual que els bastonets, posseeixen una substància química, els fotopigments, compostos de dos components, una proteïna denominada *opsina* i un aldehyd derivat de la vitamina A, el *retinal*. Hi ha diversos tipus d'opsines: la del blau, la del verd, la del roig i també la dels bastonets, cada una reactiva a la seva longitud d'ona específica. Ja que el retinal se sintetitza a partir de la vitamina A, es diu que les pastanagues, riques en aquesta vitamina, són bones per a la vista. La llum de la longitud d'ona adequada pot trencar una quantitat determinada de molècules dels fotopigments específics, separant l'opsina del retinal. Hi ha milions de molècules de fotopigments dins de cada fotoreceptor. El trencament de la molècula del fotopigment genera un canvi elèctric en la membrana del fotoreceptor que influeix sobre un segon tipus de cèl·lules de la retina, unes cèl·lules nervioses o neurones anomenades *cèl·lules bipolars*, les quals connecten amb un altre tipus de neurones, les *cèl·lules ganglionars*, que constitueixen el tercer graó del processament de la llum i que mitjançant els seus axons transporten la informació visual fora de la retina.

2.5. EL SISTEMA BLAU-VERD-ROIG-GROC

A les cèl·lules ganglionars de la retina, el codi de tres colors canvia al sistema d'oposició de colors de manera semblant a la suggerida per Hering. Així, unes cèl·lules ganglionars s'exciten amb el vermell i s'inhibeixen amb el verd, mentre que la resta s'excita amb el groc i s'inhibeix amb el blau. Aquest comportament de les cèl·lules ganglionars es produeix de forma oposada en el centre que en la perifèria del camp perceptiu que capta cada cèl·lula. Les cèl·lules que responen oposadament al groc-blau, per exemple, si s'exciten amb el groc i s'inhibeixen amb el blau en el centre, en la perifèria es comportarien de forma contrària, és a dir, s'excitarien amb el blau i s'inhibirien amb el groc.

Aquesta manera de codificar el color de la retina explica fàcilment l'existència de moltíssimes tonalitats d'un determinat color. Així, per exemple, el groc pot tenir un to verdós o rogenc i el blau pot ser també verdós o rogenc. En canvi, hi ha determinades tona-

litats que no són possibles, perquè el sistema d'oposicions de contraris no ho permet. No podem aconseguir un verd rogenc, ni tampoc un blau groguenc.

La creença general que els colors bàsics són blau, verd, roig i groc queda plenament justificada pels mecanismes fisiològics de la visió. També són colors bàsics el blanc i el negre, encara que els percebem com a incolors. Hi ha cèl·lules ganglionars que no responen diferencialment a la informació dels tres tipus de cons i es limiten a codificar lluminositats relatives en el centre i la perifèria. Aquestes cèl·lules serveixen de detectors del blanc i el negre.

2.6. ELS SISTEMES MAGNOCEL·LULAR I PARVOCEL·LULAR

Com hem dit, les cèl·lules fotoreceptores influeixen elèctricament sobre les neurones bipolars i aquestes, sobre les ganglionars. Els axons de les cèl·lules ganglionars porten la informació visual a la resta del cervell. La primera estació fora de l'ull són els nuclis geniculats laterals, que formen part d'un conjunt compacte de nombrosos nuclis que constitueixen una massa de cèl·lules nervioses de l'interior del cervell que s'anomena *tàlem*. El *tàlem* rep en primera instància la majoria de les entrades sensorials que arriben al cervell, i també rep la informació visual. Els nuclis geniculats estan formats per sis capes cel·lulars; les dues internes estan formades per neurones de mida més gran que les quatre externes, i per aquesta raó s'anomenen *magnocel·lulars*, mentre que les de neurones més petites són les *parvocel·lulars*. La informació de les cèl·lules ganglionars sensibles al color arriba a les capes parvocel·lulars del nucli geniculat lateral. Des d'aquí aquestes neurones prenen el relleu per portar la informació fins a l'escorça cerebral occipital. L'àrea visual primària, la part de l'escorça cerebral occipital que rep la informació procedent dels nuclis geniculats, està situada al voltant de la cissura calcarina, una cissura horitzontal localitzada en la part posterior medial del lòbul occipital. En aquesta part de l'escorça visual, anomenada també *escorça estriada*, la informació es traspassa a uns conjunts especials de cèl·lules anomenats *blobs*. Els *blobs* estan formats per conjunts de neurones que formen columnes de forma oval, perpendiculars a la superfície cortical, un diàmetre de 150×200 micròmetres i espaiades a intervals de 0,5 mil·límetres.

El sistema magnocel·lular es troba en tots els mamífers, mentre que el sistema parvocel·lular es troba únicament en els primats. Aquests dos sistemes reben informació de diferents tipus de cèl·lules ganglionars, les quals estan connectades a diferents tipus de cèl·lules bipolars i fotoreceptores. Només les cèl·lules del sistema parvocel·lular reben informació sobre la longitud d'ona de la llum a partir dels cons i per això poden analitzar informació relativa al color. Les cèl·lules d'aquest sistema mostren també una alta resolució espacial i una baixa resolució temporal. Són capaces de detectar els detalls molt fins, però la seva resposta és lenta i duradora. Per contra, les neurones del sistema magnocel·lular són cegues al color, no són capaces de detectar detalls fins i responen molt breument als estímuls visuals. Malgrat això, aquestes neurones són capaces de detectar contrastos de llum i foscó molt petits i són especialment sensibles al moviment. Així, la percepció del color i del moviment es troben separats en dos sistemes independents i paral·lels. El sistema que pot captar el color (parvocel·lular) és cec al moviment, mentre que el sistema que pot captar el moviment (magnocel·lular) és cec al color.

Si fem desplaçar un punt verd sobre un fons vermell de la mateixa luminància, perquè no puguin ser distingits pel contrast de llum, no podem percebre la seva trajectòria de manera continua, sinó que sembla que el punt es troba en un lloc distint de l'anterior, però sense sensació de desplaçament. Naturalment aquesta situació no es dona a la natura i per això el sistema de processament en paral·lel resulta immensament eficaç.

Les neurones de l'escorça estriada envien els seus axons a l'escorça preestriada, la regió de l'escorça visual que envolta l'escorça estriada i que manté segregats grups de neurones que responen al color o a altres característiques de la visió.

2.7. LA CONSTÀNCIA DEL COLOR

En l'escorça estriada dels primats, inclòs l'home, els *blobs* envien informació sobre el color a una àrea específica de l'escorça preestriada denominada V4. Les neurones d'aquesta àrea responen també selectivament als colors, però les característiques de les seves respostes són molt més complexes. Podem dir que aquestes neurones responen específicament als colors, però no necessàriament a la

seva longitud d'ona. Aquest fenomen, aparentment contradictori, és el que permet que puguem veure els objectes d'un mateix color independentment de l'escena circumdant. Així l'aparença del color dels objectes roman igual tant si els veiem amb llum artificial, un dia núvol o a ple sol. És més, si il·luminem un objecte d'un determinat color amb una potent font de llum d'un altre color, nosaltres seguirem veient l'objecte del seu color real encara que la longitud d'ona de la llum reflectida per l'objecte sigui una altra. Així, les neurones de V4 no responen a les longituds d'ona com ho fan els fotoreceptors, les cèl·lules bipolars o les ganglionars, sinó que són capaces d'extraure les longituds d'ona de la llum procedent de l'escena en què es troba l'objecte de la que és pròpia d'aquest.

2.8. QUI VEU MÉS COLORS?

La capacitat per veure els colors depèn tal com hem vist en primera instància dels fotopigments dels fotoreceptors de la retina. Els fotoreceptors estan compostos, com hem dit, d'unes proteïnes, les opsines, i d'un aldehyd, el retinal. Les opsines, com totes les proteïnes, estan compostes per una cadena d'aminoàcids. La informació de la seqüència exacta d'aquests, imprescindible perquè les proteïnes siguin funcionals, es troba en l'ADN (àcid desoxiribonucleic) en un segment específic que anomenem *gen*. Perquè una espècie animal tingui la possibilitat de codificar els colors de forma tricromàtica cal que tingui els gens necessaris per codificar les opsines dels cons. En aquest sentit només els primats, entre els mamífers, som capaços de percebre els colors derivats de les tres opsines. La resta de mamífers, incloent-hi els braus, els gossos o els gats, són dicromats, que no és equivalent a no ser capaços de percebre els colors. Posseeixen l'opsina del blau i una segona opsina en l'interval de longitud d'ona entre el verd i el roig, aproximadament amb una absorció mitjana de 555 nanòmetres, la qual cosa els pot permetre veure l'espectre de colors que resulta de la combinació d'aquests dos colors fonamentals. Fora dels mamífers hi ha aus amb notables capacitats perceptives dels colors i també hi ha casos entre els invertebrats: alguns insectes perceben un ampli espectre de colors, alguns fins i tot imperceptibles per als ulls dels primats.

2.9. LA VISIÓ DEL COLOR, UNA CAPACITAT FEMENINA?

Com és sabut, els gens es troben agrupats en els 23 parells de cromosomes, en el cas de l'espècie humana. D'aquest total de 23 parelles, 22 són autosomes i una parella correspon als denominats *cromosomes sexuals* designats amb una X i una Y. Els mascles tenen en el seu codi genètic el parell XY, mentre que les femelles tenen el parell XX. Els gens que codifiquen les opsines del verd i el vermell es troben precisament en el cromosoma X, la qual cosa fa que els defectes de la percepció del color s'heretin lligats a aquest cromosoma sexual. Com és conegut, de cada parell de cromosomes que heretem un correspon a la mare i un altre al pare. En el cas dels mascles el cromosoma Y correspon necessàriament al pare i, per tant, un defecte en la visió del color l'heretarà de la seva mare. En el cas de les dones, teòricament, poden heretar el defecte perceptiu tant del cromosoma matern com patern, però a la pràctica les dones tenen una probabilitat de patir un defecte d'aquests moltíssim menor (0,5 % de les dones per un 8 % dels homes). Això és perquè encara que tinguin el gen d'un cromosoma X defectuós, l'altre cromosoma compensa el defectuós. Perquè una dona patís el defecte caldria que heretés els dos cromosomes X anòmals. Això fa que els defectes de la percepció del color siguin molt més freqüents entre els homes, perquè, en tenir un sol cromosoma X, heretat de la mare, si és defectuós, no en tenen un altre per compensar-lo. Així, la situació més corrent en els defectes perceptius del color és que la mare sigui portadora del gen anòmal, encara que no patirà el trastorn, i que aquest passi al fill, que manifestarà el fenotip defectuós.

En el cromosoma X es troben només els gens que codifiquen les opsines del verd i el vermell, per la qual cosa els defectes que originen produeixen la confusió d'aquests dos colors. L'anomalia perceptiva que porta a la confusió del verd i el vermell es coneix habitualment amb el nom de *daltonisme* i pot estar originada per un defecte en les opsines del verd o del vermell. El nom de *daltonisme* ve del químic i físic anglès John Dalton (1766-1884), que patia aquesta anomalia i en va fer la descripció.

L'opsina del blau és codificada per un gen que es troba en un autosoma, concretament en el cromosoma 7, per això el defecte de la percepció del blau, que és molt més rar, es dona amb la mateixa incidència en homes que en dones. L'opsina dels bastonets, ano-

menada *rodopsina*, és codificada també per un autosoma, el cromosoma 3.

Des d'un punt de vista evolutiu, sembla que les opsines de longitud d'ona curta (blau) i dels bastonets són les més arcaiques, mentre que les opsines del verd i el roig són més modernes, especialment les d'aquest darrer. En aquest sentit és interessant veure les diferències que es donen entre els primats del Vell Món (catarins), entre els quals es troba l'home, i els primats del Nou Món (platirins), que s'han desenvolupat separatament en els darrers trenta-cinc milions d'anys. Els primats catarins, inclòs l'home, tenen el mateix sistema de visió del color basat en la tricromàcia. La similitud entre els aminoàcids de les opsines dels cons i l'opsina dels bastonets és del 40 %, i l'opsina del verd i la del roig són idèntiques en un 97 % de la seqüència dels seus aminoàcids; però, en canvi, l'opsina del blau i les del verd i roig només comparteixen un 40 % de la seva seqüència.

En contrast amb la tricromàcia constant que presenten els catarins, totes les espècies de platirins manifesten una important variabilitat en la seva visió del color. Els pigments dels bastonets i el del blau presenten la mateixa herència autosòmica; però, en canvi, només tenen un únic *locus* en el seu cromosoma X per a tres variants (al·lels) dels gens de les altres opsines, el del verd, el del verd-roig i el del roig. Això fa que tots els mascles siguin dicromàtics, encara que poden presentar tres possibles varietats (blau i verd, blau i verd-roig, blau i roig) i que, en canvi, algunes femelles puguin presentar tricromàcia (blau, verd, roig o blau, verd, verd-roig o blau, verd-roig, roig) amb un gen de longitud mitjana o alta diferent en cada cromosoma X. En una mateixa cèl·lula només s'expressa un únic gen del parell de cromosomes (patern i matern) que hi són presents, mentre que l'altre està inactiu. Aquest fenomen, que es coneix amb el nom de *lyonització*, es produeix a l'atzar, de manera que la meitat de les cèl·lules expressarà un del dos gens, mentre que l'altra meitat n'expressarà l'altra. Per tant, és possible que les femelles portadores de cromosomes X amb al·lels diferents n'expressin un en uns cons i un de diferent en els altres, comportant-se a tots els efectes com a tricromats.

Sembla que evolutivament la percepció del color sobre la base de tres fotopigments distints es més fàcil que es produeixi en les femelles dels primats. Si bé entre els catarins, inclòs l'home, ha aparegut un segon *locus* en el cromosoma X que permet que també els

mascles posseeixin una visió tricromàtica, ens podem preguntar si encara així les femelles no gaudiran d'una capacitat perceptiva més desenvolupada. Existeixen femelles tetracromates? L'existència d'un cert polimorfisme (diverses variants al·lèliques d'un mateix gen) dels gens de les opsines del verd i del roig sembla estar present en els humans, la qual cosa podria produir en les dones una capacitat perceptiva dels colors superior a la dels homes. Encara que probablement moltes de les capacitats perceptives dels colors que exhibeixen les dones poden obeir a raons culturals no podem descartar una base genètica específica per a aquesta superioritat.

2.10. DE L'ULL AL CERVELL

Com hem vist abans, les cèl·lules ganglionars de la retina abandonen l'ull i es dirigeixen cap als nuclis geniculats en el tàlem. Surten de l'ull formant un gruixut paquet de fibres que constitueix el nervi òptic. El lloc de la retina per on emergeix el nervi òptic està impossibilitat de tenir cap cèl·lula fotoreceptora i per aquest motiu en aquest punt, anomenat *punt cec*, no hi tenim visió, som cecs. Estem acostumats (el nostre cervell ho està) a suplir aquesta informació amb la visió circumdant i per això normalment no ens n'adonem. Si volem posar en evidència l'existència del punt cec, simplement hem de dibuixar una creu i un punt, per exemple, en un full de paper amb una separació d'uns deu centímetres. A continuació, tanquem un ull i amb l'altre mirem un dels dos signes que hem dibuixat. Allunyant i acostant el paper, trobarem un punt on el signe que no tenim enfocat, però que tanmateix vèiem, desapareix. En aquest moment el signe que no veiem es reflecteix sobre el punt cec de la retina.

Els dos nervis òptics de cada ull es creuen en un punt anomenat *quiasme òptic* abans d'arribar als nuclis geniculats laterals del tàlem. Aquest creuament no és complet; però es fa de tal forma que al costat dret del cervell arriba la informació visual de la meitat esquerra de l'escena que estem contemplant (el que s'anomena *hemicamp visual esquerra*), mentre que a la banda esquerra del cervell arriba l'altra meitat de l'escena, és a dir, la que es troba en l'*hemicamp visual dret*. D'aquesta manera la part esquerra i la part dreta del cervell tenen informació dels dos ulls, però d'un sol hemicamp visual. Com es fa aquest creuament dels nervis òptics perquè succeeixi això? Molt simple. La retina, en el fons del globus ocular, evidentment, no és

plana, sinó que presenta una superfície còncaua. Quan mirem frontalment, les parts de la retina que estan més a prop del nas (hemiretines nasals) capten l'escena del mateix costat que l'ull. L'hemiretina nasal dreta rep imatges de l'emicamp visual dret i l'hemiretina nasal esquerra, de l'emicamp visual esquerre. En canvi, l'altra meitat de la retina (hemiretina temporal) es troba situada a la banda més externa de l'ull i a causa de la seva curvatura no enfoca el mateix hemicamp visual, sinó el de l'altre costat. Així, tenim que, en sortir de l'ull, algunes fibres del nervi òptic porten informació de l'emicamp visual del mateix costat que l'ull i unes de l'altres, de l'altre hemicamp. En el quiasme, les fibres que porten informació de l'emicamp visual contrari (hemiretina temporal) no es creuen i segueixen el seu camí cap al nucli geniculat extern; en canvi, les fibres que porten informació visual del mateix hemicamp visual que l'ull (hemiretina nasal) es creuen a l'altre costat. D'aquesta manera es reuneix en el mateix costat la informació complementària de les dues hemiretines dels dos ulls que capten un mateix camp visual.

Aquesta divisió de la informació visual es manté de la mateixa manera en el trajecte dels nuclis geniculats fins a l'escorça cerebral occipital. Això fa que l'escena visual de cada hemicamp sigui vista per l'occipital contrari i, per tant, només una meitat del cervell, un hemisferi cerebral, té la informació que procedeix de cada banda de l'escena. L'existència d'una important connexió entre tots dos hemisferis cerebrals, que s'anomena *cos callós*, permet en darrera instància comunicar la informació a l'altre hemisferi cerebral. Com és lògic, si es lesionen les fibres òptiques després del quiasme, el nucli geniculat o la mateixa escorça visual primària, es produirà un defecte visual, una ceguesa, que afectarà les escenes de l'emicamp visual contrari a la lesió.

2.11. VEURE SENSE VEURE: L'AGNÒSIA VISUAL

El terme *agnòsia* deriva del grec i significa 'absència de coneixement'. Va ser proposat pel pare de la psicoanàlisi, Sigmund Freud, el 1891, per designar l'afectació del reconeixement d'un estímul, tot diferenciant-lo del desconeixement del seu nom o *anòmia* (manca del nom) o de la manca de la seva visió o *ceguesa*.

L'agnòsia és una afectació específica de la capacitat de reconèixer estímuls prèviament apresos que ocorre en absència de trastorns de

la percepció, del llenguatge o de la intel·ligència i que és el resultat d'una lesió cerebral adquirida. L'agnòsia és un malfuncionament del reconeixement que es limita a uns determinats estímuls presentats per un canal sensorial i no pels altres. Així, algú que pateix aquesta alteració, pot no ser capaç, per exemple, de reconèixer visualment que l'objecte percebut és una clau; però, en canvi, sí d'identificar-lo pel tacte, talment com ho faria un cec. La diferència rau en el fet que el pacient que pateix agnòsia visual veu l'objecte, però no el pot identificar. Podem pensar que la seva visió, allò que percep, no aconsegueix suscitar cap altra experiència que l'acosti al coneixement de l'objecte. L'agnòsia, a més d'afectar el reconeixement dels estímuls prèviament apresos, altera la capacitat d'aprendre'n de nous de la modalitat sensorial que hi està implicada. Aquest fet fa que, a més de no poder rescatar la informació de què disposava anteriorment sobre l'objecte a través de la visió, per exemple, tampoc pugui en el futur adquirir-ne de nova per tornar-lo a identificar com a tal.

L'agnòsia pot afectar estímuls aïllats dins d'una categoria o, per contra, pot afectar tota la categoria (uns animals concrets o bé tota mena d'animals, per exemple). La percepció de l'estímul pot alterar-se de forma diferencial, afectant de forma específica els objectes reals o representats, o bé els estàtics o els que estan en moviment. També diferents categories de reconeixement poden deteriorar-se de forma específica per lesions cerebrals concretes. Així, l'afectació pot implicar de forma específica les cares humanes (*prosopagnòsia*), els objectes, els colors, les paraules o els números.

Quan l'agnòsia afecta de forma específica la percepció del color, es denomina *agnòsia cromàtica*, i pot comportar diversos nivells de complexitat segons la localització de la lesió cerebral.

2.12. MECANISMES NEURONALS DEL PROCESSAMENT VISUAL

La presència d'òrgans específics per captar la llum ens informa que els animals que en posseeixen hi veuen. Algunes de les característiques d'aquest òrgans sensorials ens aporten dades sobre la seva capacitat discriminativa de l'espectre lumínic. Però la percepció del món és bastant més que veure-hi, perquè la nostra capacitat de percebre, visual i no visual, està relacionada amb la totalitat de la nostra interacció, amb tot allò que ens envolta. Des de la subsistència

alimentària fins a la superació dels enemics o la conducta reproductiva, o fins i tot el refinament cultural, se sustenten en la capacitat per captar, processar i produir respostes adaptatives als estímuls que arriben fins al nostre cervell a través de sistemes més o menys sofisticats de processar-los.

La percepció visual és la més coneguda a causa de l'enorme volum d'investigació animal bàsica que s'ha produït en els laboratoris dels premis Nobel D. H. Hubel i T. N. Wiesel, investigadors que han treballat essencialment amb gats, i de M. Mishkin i els seus col·laboradors, que han treballat amb mones.

Sintetitzaren, breument, les troballes bàsiques més significatives sobre el sistema visual, que permeten comprendre la simptomatologia humana, quan es produeixen lesions cerebrals focals que ocasionen efectes tan paradoxals com la incapacitat de reconèixer la pròpia dona, mentre que es conserva la capacitat de reconèixer les seves ulleres o arrecades.

Considerem, per exemple, la percepció d'una copa de cava. En l'àmbit dels fotoreceptors, les cèl·lules codifiquen només la presència de llum sobre l'objecte determinat. La copa de cava causarà un patró complex d'activació, que dependrà de la seva posició, orientació, forma, mida i il·luminació. Existeixen altres cèl·lules, en un nivell més alt, que en codificaran la textura, el volum i la curvatura. Finalment, altres neurones tindran al seu càrrec la transformació de la informació que permetrà passar de les característiques concretes de l'objecte que s'està percebent a una abstracció més general, que possibilita identificar l'objecte percebut com una copa de cava, al marge de les seves particularitats d'il·luminació, posició, mida, etc.

En el sistema visual, existeixen poblacions cel·lulars que actuen com a filtres. Per exemple, dintre de les tres classes de cons, la sortida de la informació que processen està en funció de la intensitat de l'estímul i de la longitud d'ona. Les tres classes de cons, com ja hem explicat anteriorment, tenen diferents sensibilitats espectrals, que només se solapen de forma parcial. Un estímul espectral determinat pot causar una única tríada de respostes de cada població de cons i el sistema visual pot extreure diversos centenars de diferents matisos de colors i brillantor. Els cons són influenciats només per dues variables de l'estímul, la intensitat i la longitud d'ona. Per contra, les cèl·lules de l'escorça estriada, en els lòbuls occipitals, són sensibles a molts més tipus d'estímuls, com l'orientació, el color, el contrast, la disparitat, la mida i la freqüència espacial.

Les cèl·lules de la retina i les del nucli geniculat lateral tenen propietats de resposta similars. Representen el primer estadi de transformació dels valors directes d'intensitat codificats pels fotoreceptors a representacions basades en les característiques de l'objecte. Malgrat que la representació del color i de la forma en el nucli geniculat lateral és una mica diferent del que es produeix a la retina, la major transformació ocorre en l'escorça estriada. L'escorça estriada conté aproximadament 250 milions de cèl·lules en comparació a les 1-1,5 milions del nucli geniculat lateral. Les cèl·lules de l'escorça estriada es poden classificar en simples i complexes. Les cèl·lules simples actuen com a detectors de línies i d'eixos d'orientació particular i de localització, les cèl·lules complexes generalitzen la detecció de línies i eixos per a la percepció de l'objecte.

Com hem dit anteriorment, algunes àrees de l'escorça estriada estan especialitzades en la percepció del color, però d'altres ho estan en la percepció de l'orientació i la forma. Existeixen també neurones que responen selectivament a patrons facials. L'especificitat neuronal pot ser molt elevada. Així, per exemple, els registres unicel·lulars en mones han demostrat que una determinada neurona descarrega davant la visió del perfil d'una mona, però no davant l'esquema global d'aquest perfil sense les seves característiques particulars, ni davant la visió de la cara de la mateixa mona de cara, ni davant de parts del mateix perfil.

2.13. COMPONENTS DE LA PERCEPCIÓ VISUAL: VIES SEPARADES PEL COLOR, LA FORMA, EL MOVIMENT I LA PROFUNDITAT

La introspecció ja suggereix que la percepció visual pot ser subdividida en diversos subprocessos. Si es demana a algú que llisti els components de percepció visual, fàcilment referirà la forma, el color, la profunditat, el moviment i la textura. Aquests diferents aspectes de la percepció, o vies per a la visió, poden ser processats en paral·lel. Efectivament, cada ull projecta a una capa magnocel·lular i a una o dues capes parvocel·lulars. Aquests dos conjunts de capes geniculades projecten a dues subdivisions de la capa IVc de l'escorça cerebral i les dues vies estan separades en l'àrea 17 de Brodmann (àrea visual primària) i mantenen la seva segregació en zones més complexes de l'escorça preestriada. Una és l'àrea V4, que, com

ja hem dit, està implicada en la percepció de característiques complexes del color, i l'altra és la zona MT, implicada en la percepció del moviment i la profunditat.

Les observacions anatòmiques i fisiològiques en mones indiquen que el sistema visual del primat consisteix en diverses subdivisions separades i independents que analitzen diferents aspectes de la mateixa imatge retinal. Les cèl·lules en les àrees visuals corticals 1 i 2 (V₁, V₂) i les àrees visuals superiors estan segregades en tres subdivisions interdigitades que difereixen en la seva selectivitat pel color, la profunditat, el moviment i l'orientació.

2.14. ESTUDIS LESIONALS EN HUMANS

L'estudi de les conseqüències de les lesions cerebrals focals en el cervell humà havia documentat, prèviament a l'experimentació animal, la presència de la separació dels sistemes visuals. Així, en neuropsicologia humana és corrent observar la pèrdua de la percepció del color, que contrasta amb la conservació de la percepció de la forma. Els estudis neuropsicològics i neurofisiològics conclouen en l'existència d'un «centre del color» situat en la circumvolució fusiforme en l'home, que és l'homòleg de l'àrea V₄ en la mona macaca. S'ha descrit el cas d'un pacient que tenia lesionada de forma selectiva la via parvocel·lular. El pacient era incapaç de detectar ni un sol color, en canvi, tenia conservada la visió de la profunditat, brillantor, textura, forma, localització i moviment. Respecte a la forma, en les mones, les cèl·lules de V₁ són sensibles als angles i a les línies i, en canvi, les de V₂ ho són a la percepció dels contorns. En l'home, les lesions provocades per intoxicació deguda a la inhalació de monòxid de carboni poden produir importants dèficits en la percepció de les formes. Un pacient, després de quaranta anys de patir una lesió per aquesta causa, segueix presentant els mateixos dèficits. La seva percepció de formes està tan greuement afectada que fins i tot no reconeix figures simples com un hexàgon. No obstant això, pot reconèixer objectes reals fonamentant-se en la informació referent al color i a la mida. Tampoc no té afectat el reconeixement de cares, lletres o paraules i no té alterada la imaginació visual, ni tampoc es desorienta en l'espai.

2.15. SELECTIVITAT NEURONAL I ORGANITZACIÓ COLUMNAR EN ÀREES PRIMÀRIES I ASSOCIATIVES

Les neurones amb selectivitat similar, encara que lleugerament diferent, es reuneixen en columnes verticals perpendiculars a la superfície cortical. Tant la regió occipital (primària) com la temporal (secundària o associativa), estan organitzades en mòduls columnars. Aquesta organització columnar suggereix que una característica de l'objecte no està representada per l'activitat d'una sola cèl·lula, sinó per l'activitat de diverses cèl·lules en un mateix mòdul columnar, en el qual la selectivitat varia cèl·lula a cèl·lula. El conjunt de cèl·lules amb selectivitat solapada, però lleument diferent, treballa per absorbir els canvis en la il·luminació, angle de visió, etc., procedents de la retina.

2.16. SISTEMES VISUOESPACIAL I VISUOPERCEPTIU

El 1982, L. G. Ungerleider i M. Mishkin van proposar un model que postulava l'existència de dos sistemes corticals complexos d'anàlisi visual. Ambdós sistemes o vies s'originen en l'escorça estriada occipital. La via inferior es dirigeix ventralment al lòbul temporal i és essencial per al reconeixement dels objectes. La via superior es dirigeix dorsolateralment al lòbul parietal i és crucial per a la percepció espacial i l'execució visuomotora. Respectivament, s'han denominat *la via del què* (identificació d'objectes i persones) i *la via de l'on* (identificació espacial o posicional).

L'evidència de la separació d'aquests dos sistemes procedeix de la conseqüència de les lesions focals parietals i temporals en mones i les observacions sindròmiques en humans (*agnòsia visual* i *síndrome de Balint*). Les lesions de l'escorça inferior temporal causen dèficits en múltiples tasques de discriminació d'objectes, però no alteren les visuoespacials. Per contra, les lesions parietals posteriors no afecten les tasques de discriminació visual, però ocasionen una execució defectuosa de les que impliquen la posició de l'objecte, és a dir, tasques de tipus visuoespacial. La percepció del color pertany a *la via del què* o *via visuoperceptiva*.

2.17. ACROMATÒPSIA I AGNÒSIA CROMÀTICA

L'*acromatòpsia*, o alteració cortical de la percepció del color, va ser descrita per Verrei el 1888. Les lesions que l'ocasionen s'observen en les circumvolucions lingual i fusiforme en l'escorça prees-triada d'ambdós hemisferis, i és la darrera la regió més crítica. Si les lesions són unilaterals es produeix una hemiacromatòpsia, o pèrdua de la visió del color, en un sol hemicamp visual. Evidentment, si la lesió, a més de la circumvolució fusiforme, implica també la cissura calcarina, on hem dit que hi ha l'àrea visual primària, es produeix una ceguesa de l'hemicamp contralateral que no permet delimitar o comprovar l'acromatòpsia. En l'acromatòpsia es perd la visió del color i el pacient veu els objectes en tons grisos, encara que pot aparellar colors guiat per la seva llüissor.

El terme *agnòsia cromàtica* es refereix a la incapacitat de denominar i designar colors, encara que el pacient pugui resoldre proves de percepció del color, com el test d'Ishihara, de forma normal. Existeixen dos tipus d'agnòsia cromàtica. Una va associada a l'alèxia pura (un tipus de pèrdua de la capacitat de llegir) i a l'hemianòpsia (pèrdua de la visió d'un hemicamp visual), i és deguda a la desconexió del l'escorça visual dreta dels centres del llenguatge, situats a l'hemisferi esquerre. En aquesta modalitat, el pacient respon bé en tasques verboverbals del tipus «de quin color és un plàtan?» i en tasques visuovisuals consistents a acolorir amb llapis de colors objectes concrets que acostumen a tenir un color propi. L'altra varietat va associada a lesions parietals esquerreres i s'acompanya d'afàsia (pèrdua de la capacitat del llenguatge). En aquests casos, els pacients fan malament les tasques de pintar objectes amb el color corresponent i tampoc resolen bé les qüestions verbals sobre el color dels objectes, és a dir, fallen en tasques visuovisuals i verboverbals.

Les àrees visuals de l'escorça occipital s'activen també en resposta a qüestions que requereixen imaginació del color. Per exemple, davant d'una pregunta com aquesta: «quin color verd és més fosc, el de la gespa o el de les fulles de pi?» En general, les lesions que afecten la percepció del color afecten també la capacitat d'imaginar-lo. Aquest fet fa que alguns pacients puguin resoldre normalment tasques que comportin saber de quin color són les coses, però no si per dir el color se l'han d'imaginar. Així, poden dir, per exemple, que la sang és vermella, però no ser capaços de dir de quin color són les cireres.

Al començament dèiem que el món que ens envolta està ple de colors extraordinàriament variats i que la visió de les coses plenes de color era sinònim d'optimisme i de seguretat. Sembla que l'evolució ha dotat els primats d'un sistema perceptiu del color que efectivament ens ha fet ser més capaços de moure'ns en el nostre ambient, de reconèixer els perills i d'identificar els fruits saborosos. Tot sembla més real quan hi ha llum i podem veure les coses com són, amb el color que la llum, els nostres ulls i el nostre cervell els ha donat.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTÀRIA

- DAMASIO, A. R.; DAMASIO, H. (1983). «Localization of lesions in achromatopsia and prosopagnosia». A: KERTESZ, A. *Localization in Neuropsychology*. New York: Academic Press, p. 417-428.
- HUBEL, D. H. (1988). *Eye, Brain and Vision*. New York: Scientific American Library.
- LIVINGSTONE, M.; HUBEL, D. (1988) «Segregation of form, color, movement, and depth: Anatomy, physiology, and perception». *Science*, 240, p. 740-749.
- TANAKA, K. (1993). «Neuronal mechanisms of object recognition». *Science*, 262, p. 685-688.
- TOVEE, M. J. (1994). «The molecular genetics and evolution of primate colour vision». *Trends Neurosci*, 17, p. 30-37.
- UNGERLEIDER, L. G.; MISHKIN, M. (1989). «Two cortical visual systems». A: BOLLER, F.; GRAFMAN, J. [ed.]. *Handbook of Neuropsychology*. Vol. 2. Amsterdam: Elsevier, p. 549-586.
- ZEKI, S. (1995). *Una visión del cerebro*. Barcelona: Ariel Psicología.

3. SEMIOLOGIA DEL COLOR

Lluís Prat i Clarós*

L'objectiu d'aquest capítol és introduir una perspectiva semiològica sobre el color. Atesa l'amplitud i la complexitat de la temàtica, així com la brevetat d'aquest escrit, cal insistir fonamentalment que es tracta d'una *introducció*. Adoptarem, a més a més, una perspectiva epistemològica, sense desenvolupar aspectes metodològics.¹

3.1. SEMIOSI

Des de la perspectiva semiològica, el color esdevé el suport d'una altra cosa diferent, i aquesta altra cosa és el seu *valor significatiu*, el seu *sentit*, el seu *valor semàntic*. Aquests valors del *pla del contingut* es relacionen amb les formes significants i/o perceptives del *pla de l'expressió*. La correlació entre ambdós plans és anomenada *funció semiòtica* o, si emfasitzem més el procés que no pas els resultats i/o les codificacions prèvies, *semiosi*.

Les variables que entren en la semiòsi de qualsevol missatge visual són molt nombroses i no formen, generalment, cap sistema tancat i simbòlicament codificat de signes, tal i com esdevé amb els missatges lingüístics. El color és justament una de les variables possibles de qualsevol missatge visual. Evidentment, també és possible de codificar arbitràriament (convencionalment) certs colors i d'emprar-los en un microsistema de comunicació preestablert, per

* Estudis de Comunicació Audiovisual. Universitat Pompeu Fabra. Barcelona.

exemple, en sistemes de senyalització. Però ens limitarem al color en tant que és una variable significativa lliure, és a dir, independentment de codificacions clarament explicitades i convencionalment compartides pels emissors i pels receptors dels esmentats missatges com, per exemple, els cartells de propaganda política, la pintura, la publicitat, el cinema, la televisió, així com altres formes de comunicació, com són el disseny dels productes de consum (vestimenta, electrodomèstics, etc.), els embolcalls, les imatges corporatives d'empresa, l'interiorisme, etc.²

El valor semàntic d'un discurs s'organitza en una *sintaxi* que permet distints nivells de profunditat formal des del pla del contingut fins al pla de l'expressió o sintaxi de manifestació. La correlació entre ambdós plans no és, per tant, directa, com les simples etiquetes semàntiques d'uns vestits significants, sinó que és mediada *sintàcticament*: l'organització i l'estructuració sintàctiques són les que correlacionen ambdós plans, alhora que els fan efectivament indissociables: no hi ha organitzacions discursives materials que no impliquin una certa organització lògica de la seva intel·ligibilitat, ni organitzacions lògiques desproveïdes d'una manifestació material.³

En el cas de la semiosi d'un missatge visual amb variables lliures, la sintaxi de manifestació encara es fa més important que per a aquells missatges que empren signes convencionalment codificats, tal i com són, per exemple, els signes lingüístics. En qualsevol cas, la semiosi no és quasi mai la simple acumulació o suma de micro-significacions, sinó una *interacció* significativa en què el mateix sentit de les variables (lliures, però també dels signes codificats) depèn de l'esmentada interacció.⁴

3.2. EL COLOR COM A VARIABLE DEL PLA DE L'EXPRESSIÓ

La semiologia del color, encara que molt diferent dels estudis físics, fisiològics, perceptius i químics, manté un estreta relació amb els coneixements relatius al color obtinguts per aquestes disciplines científiques per la raó següent: un fenomen físic, fisiològic i perceptiu es transforma en un fenomen discursiu, textual i comunicatiu, i, per tant, semiològicament pertinent. La semiologia del color transforma aleshores els paràmetres físics, fisiològics i perceptius en *significants*, en variables sígniques del pla de l'expressió.⁵ Aquest pla de l'expressió

adquireix una funció semiòtica amb el pla del contingut, amb valors significatius, semàntics. La investigació sobre la manifestació perceptiva del color i les correlacions amb els fenòmens físics i fisiològics aporten, per tant, dades fonamentals perquè la semiologia estableixi rigorosament els diversos paràmetres significants del color.⁶

3.3. EL COLOR RETÒRIC

El color és un principi de *valor perceptiu natural* per a l'home, com ho és per a la resta d'espècies animals. En conseqüència, el color s'inscriu naturalment en les coses i ajuda la percepció humana a distingir i articular el seu entorn. No és l'home l'única espècie animal en què el color representa un paper fonamental en la percepció, però sí que és l'única en què el color no es limita a unes funcions genèticament programades.

Atès que l'entorn humà és històric, social i cultural, els límits entre la percepció del color i la seva significació social i cultural no són clars. El color no és més que un cas particular del que s'esdevé, de forma més general, entre percepció i significació humanes.⁷

En aquest capítol ens limitarem al color com a variable significant de missatges visuals, i no tractarem de les seves funcions o significacions en les nombroses activitats laborals en què el color de les percepcions naturals té un paper fonamental, per exemple, en el sector agrícola i alimentari.

Aquesta delimitació pressuposa una distinció entre *color natural* (per a l'home) i *color retòric*, és a dir, aquells colors emprats en l'intercanvi de missatges entre els humans. Només tractarem del color retòric. *A fortiori*, queda exclosa la significació del color en altres espècies animals o en l'àmbit del regne vegetal, aspectes que pertanyen a altres disciplines (ecologia, zoologia, etc.).

Cal remarcar, tanmateix, que la correlació entre l'entorn natural de l'home i els colors que naturalment s'hi inscriuen provoca una de les principals constriccions significatives del color retòric. El color s'associa molt fàcilment amb els referents naturals que el vehiculen, fins i tot quan deixa de ser el color d'aquests referents. Moltes denominacions lingüístiques del color conserven el seu vincle «objectual» (com el *taronja*), i és corrent de precisar lingüísticament un color i les seves microvariables (saturació, lluminositat, tonalitat, etc.) amb una referència objectual.

3.4. INTERACCIONS EXTRADISCURSIVES EN LA SEMIOSI DEL COLOR

Ja hem vist com, en el pla de l'expressió, la semiologia empra parcialment els resultats dels estudis físics, fisiològics o perceptius del color. També en el pla del contingut la semiologia necessita sovint altres ciències, aquest cop de caràcter social, per estudiar la semiòsi cromàtica en àmbits socials que escapen al simple missatge, discurs o acte comunicatiu.

Recentment s'ha establert la distinció terminològica, originàriament plantejada dins la filosofia del llenguatge anglosaxona, entre *significació* i *sentit*: la *significació* fa referència al valor semàntic que deriva de forma immanent d'un discurs, mentre que el *sentit* és el valor semàntic comunicatiu que adquireix el discurs mitjançant tots els paràmetres contextuais, psicològics, sociològics i d'altres de la seva utilització i la seva recepció efectiva. Arran d'aquesta distinció i de la seva importància neixen la *pragmàtica*, centrada en l'estudi del *sentit* comunicatiu, així com la *sociolingüística* i altres estudis pluridisciplinaris sobre el *sentit* i la *significació*. Fins i tot el *significat* (inherent al discurs) s'estudia en relació amb l'ús i l'enunciació. El *significat* no només transmet un missatge, sinó que també fa alguna cosa (persuadir, avisar, prohibir, seduir, etc.). En conseqüència, les interaccions significatives han esdevingut més importants i el model semiòtic estructuralista dels anys seixanta, centrat exclusivament en associacions còdiques similars a una lexicologia, s'ha mostrat progressivament més insuficient.⁸

A més del *significat* que el color retòric adquireix en gèneres i contexts comunicatius diversos, les diferents civilitzacions i cultures han acumulat històricament tot un *simbolisme difós* del color que deriva de diverses institucions i pràctiques socials. També la literatura i la cultura transmeten de forma molt variable i evolutiva l'esmentat simbolisme. Fins i tot els mateixos individus, dins l'heterogeneïtat cultural de les ciutats actuals, atorguen valors simbòlics, afectius i associatius diversos als colors.⁹

Tots aquests simbolismes socioculturals del color permeten una anàlisi del seu *sentit* en què les variables pròpiament semiològiques s'articulen amb altres variables sociològiques, culturals, antropològiques, històriques, psicològiques, psicoanalítiques, etc. Totes aquestes associacions simbòliques també s'afegeixen com a variables del pla del contingut. Mentre que certes variables són cla-

rament comunes i socialment o institucionalment compartides, d'altres són més suggestives, afectives i personals. Aquest marge més personal relacionat amb la significació del color implica un cert marge aleatori en la recepció significativa d'un color: el color sempre manté el que s'ha anomenat un cert *marge idiolectal* en el pla del contingut.¹⁰

També evitarem les referències pluridisciplinàries en l'àmbit de les ciències socials i ens mantindrem en una presentació de la funció que fa el color en el pla de l'expressió dels missatges visuals. En altres termes, ens restringirem a la perspectiva estrictament semiològica.

Cal constatar, tanmateix, que la psicologia ha evidenciat la important dimensió *afectiva* del color. Segons certs investigadors, el valor afectiu del color és immediat i constitueix sempre la primera reacció. Però cal matisar que l'afectivitat té un espectre molt gran i que s'estructura segons eixos i oposicions semàntiques (calor/fred, trist/alegre, energètic/relaxat, inquietant/tranquil·litzant, misteriós/intel·ligible, etc.). En altres termes, l'afectivitat també forma part del pla del contingut, malgrat que pugui implicar un major marge idiolectal.

3.5. UNIVERSALISME VS INTERACCIÓ DE LA SEMIOSI CROMÀTICA

La tesi bàsica que voldríem presentar com a constitutiva d'una aproximació semiològica al color retòric és que aquest, en tant que és una variable lliure d'un missatge visual, no té cap significat inherent i universal, tan sols constriccions significatives més o menys fortes segons el missatge visual que l'empri. Es tracta d'una variable expressiva que interactua amb moltes d'altres i el significat i el sentit de la qual depenen d'aquesta interacció concreta.

Aquesta tesi s'oposa frontalment a una concepció universalista del significat del color, tal i com ha estat sistematitzada, per exemple, per Goethe en el seu famós *Tractat del color* (1801), segons eixos temàtics de la tradició grecocristiana.¹¹ La psicoanàlisi, la psicologia i fins i tot la neurobiologia també han intentat, posteriorment, fonamentar de diverses maneres aquesta concepció universalista del significat del color i, encara actualment, nombrosos manuals de disseny i altres formes de literatura pressuposen una espècie de diccionari definitiu sobre el sentit dels colors.

Malauradament, ja que això complica molt la perspectiva semiològica sobre el color, no sembla pas que hi hagi cap diccionari definitiu i universal que resolgui una vegada per totes el sentit del color retòric. Fins i tot en el cas (molt poc probable) que es demostrin, per exemple, certes tendències afectives indissociables de certs valors cromàtics, no deixarien de ser resultats molt relatius, atesa la variabilitat i la sobredeterminació que pot tenir la circulació sociocultural dels missatges visuals susceptibles d'emprar el color.

3.6. INTERACCIONS DISCURSIVES EN LA SEMIOSI DEL COLOR

Si prescindim de totes les variables contextuals de caràcter sociològic, antropològic, etc., així com del consegüent simbolisme difós que se'n desprèn, les covariables discursives que codeterminen el significat del color en un missatge visual concret poden ser esquematitzades en dues categories diferents. D'una banda, la tipologia de gèneres i sotsgèneres en què el missatge s'inscriu. El color no és emprat de la mateixa manera segons es tracti d'un anunci, d'un programa d'entrevistes televisiu, d'una pintura contemporània, d'un embolcall comercial, d'un objecte de consum o de la imatge corporativa d'una empresa.

Aquestes variables genèriques remetent, tal i com dèiem suara, a una tipologia dels gèneres en què pot emprar-se el color retòric, però cal afegir que no hi ha una tipologia definitiva ni única, ja que els gèneres poden combinar-se segons diversos criteris de jerarquia i estan sotmesos a variables institucionals, sociològiques i històriques. Tanmateix, els gèneres no són exteriors al missatge, sinó que s'hi inscriuen: qualsevol missatge preveu sempre la seva identificació genèrica i, en conseqüència, el tipus de receptor al qual es dirigeix.¹²

D'altra banda, hi ha les variables que, junt amb el color, constitueixen el pla de l'expressió d'un missatge visual concret. En aquestes variables, cal distingir dos nivells diferents; el nivell icònic i el nivell plàstic. El primer nivell, l'icònic, remet a les formes que reconeixem en la mesura que són formes representades, reals o imaginàries: els objectes, les coses, les persones, o qualsevol altra figura que reconeixem per semblança amb la realitat o mitjançant la tradició cultural. El significat d'un color retòric depèn molt, evi-

dentment, d'aquest nivell icònic, ja que li provoca unes constriccions que predeterminen la seva expressivitat. Tanmateix, no només aquestes constriccions deixen un ampli marge a l'ús del color mitjançant les microvariables que el constitueixen, sinó que un color retòric sempre pot transgredir les expectatives del nivell icònic per motius molt variats. Un exemple senzill de transgressió podria ser l'anunci que la marca de xocolata Milka va elaborar amb una vaca del mateix color violeta-lila característic dels embolcalls d'aquesta xocolata.

A més del nivell icònic, tot missatge visual també implica el nivell plàstic, que remet justament al color, a la composició, a la textura material que se'n desprèn, etc. Mentre que el nivell icònic sempre implica el plàstic, aquest últim pot prescindir de la iconicitat, tal i com s'esdevé, per exemple, en la majoria d'imatges corporatives o en la pintura anomenada abstracta. En aquests casos, la composició de figures icòniques és substituïda per una composició de formes abstractes en una gradació des de la màxima geometrització al màxim informalisme.¹³

3.7. LA INTERACCIÓ DISCURSIVA DEL COLOR SEGONS ALBERTS

El pintor Josep Alberts, que va especialitzar-se en el que ell mateix va anomenar la *interacció del color* (prescindint del nivell icònic), considera que el significat de qualsevol color depèn de les variables següents:

- La forma: des del moment que hi ha diversos colors són inevitables unes certes formes.
- La col·locació o la disposició dels colors.
- La quantitat: repeticions, recurrències, superfície ocupada, etc.
- La qualitat: les microvariables constitutives d'un color (saturació, lluminositat, brillantor, barreges tonals, etc.).
- L'accentuació: els límits i fronteres que uneixen i separen les tonalitats cromàtiques.¹⁴

Alberts posa de manifest, seguint una tradició de pintors en què caldria citar Cézanne i Matisse, entre molts d'altres, que el significat del color és totalment interactiu, fins i tot en un missatge visual exclusivament plàstic i en un gènere amb tan poques constriccions

com és la pintura abstracta contemporània, on els marges de producció i d'interpretació són molt amplis.¹⁵

Segons altres gèneres, situacions i contextos comunicatius, com també segons les diverses interaccions del pla de l'expressió, tant en el nivell plàstic com en el nivell icònic, el significat del color serà d'una manera o d'una altra, amb constriccions molt diverses, que faran que un color pugui ser alegre o trist, elegant o informal, etc. Fins i tot la clàssica oposició entre colors freds i calents és molt relativa en les barreges tonals que es poden fer de manera que s'obtingui, per exemple, un vermell fred o un blau calent.¹⁶

NOTES I COMENTARIS

1. Aquest article és per si mateix un resum del seminari que vam impartir a la Universitat Catalana d'Estiu sobre el mateix tema. Només n'hem conservat el cos nuclear i hem abandonat, en especial, les breus incursions en les relacions entre colors i llengües, en la tradició del simbolisme universal en els microsistemes de comunicació amb colors convencionalment codificats.

2. En tots aquests casos, certs colors també poden ser emprats amb clares codificacions convencionals prèvies dins de certs àmbits i contextos concrets. Per exemple, el vermell i el verd en els cartells de propaganda política, el vestit negre per al dol en certs enterraments, etc.

3. Sobre el generativisme semiòtic, vegeu A. I. GREIMAS i J. COURTÈS, *Semiòtica, diccionario razonado del lenguaje*, Madrid, Gredos, 1982.

4. L'estudi de la interacció discursiva, mitjançant l'anàlisi del discurs, la pragmàtica o el generativisme, ha substituït a poc a poc, en el camp semiològic, la perspectiva exclusivament signíca que pretenia d'establir el *sistema de signes* que empra qualsevol mitjà de comunicació.

5. Vegeu, per exemple, Grup Mu, *Tratado del signo visual*, Càtedra, 1993, p. 205-212.

6. Vegeu, entre d'altres, G. KANIZSA, *Gramática de la visión; percepción y pensamiento*, Barcelona, Paidós, 1986, p. 136-180.

7. En el cas del color, la relativitat d'aquest llindar és indissoçiable de les denominacions lingüístiques i de diverses formes de simbolisme sociocultural. Vegeu, per exemple, Serge TORNAY

(ed.), *Voir et nommer les couleurs*, Nanterre, *Labethno* (Laboratoire d'ethnologie et de sociologie comparative), 1978, 680 p.

8. Vegeu, per exemple, F. RÉCANATI, *La transparencia i la enunciació*, Buenos Aires, Hachette, 1981; VAN DIJK, *Texto y contexto: Semántica y pragmática del discurso*, Madrid, Càtedra, 1980 i, especialment centrat en la comunicació amb dominància visual, J. PERICOT, *Servirse de la imagen: Un análisis pragmático de la imagen*, Barcelona, Ariel, 1987. Des d'una perspectiva més interdisciplinària, vegeu, per exemple, M. STUBBS, *Análisis del discurso: Análisis sociolingüístico del lenguaje natural*, Madrid, Alianza, 1983.

9. Vegeu, per a un tractament més extens d'aquests aspectes, J. AUMONT, *Introduction à la couleur: des discours aux images*, París, Armand Colin, 1994 i M. BRUSATIN, *Historia de los colores*, Barcelona, Paidós, 1986.

10. Grup Mu, *vide supra*, p. 213-219.

11. En contrast amb les investigacions de Newton sobre l'espectre cromàtic, Goethe adopta una perspectiva innatista per fonamentar el seu universalisme en el pla del contingut, perspectiva encara corrent des d'aleshores, contràriament a la metafísica cosmològica que havia fonamentat aquesta posició des de l'antiguitat grega. Vegeu, en especial, AUMONT, *Introduction...* i Lino CABEZAS GELABERT «Del colorit al color i la funció de la ciència en l'art», *Temes de Disseny*, 5, Barcelona, Serveis de Publicació Elisa-va, març 1991.

12. Vegeu, per exemple, F. RASTIER, *Sens et textualité*, París, Hachette, p. 35 i s. i X. RUIZ COLLANTES, *Els cartells del PSUC: les estratègies persuasives en la propaganda electoral*, Barcelona, Nous Horitzons, 1991.

13. A més del llibre ja citat del Grup Mu, vegeu J. M. FLOCH, *Semiòtica, marketing y comunicación: Bajo los signos, las estrategias*, Barcelona, Paidós, 1991 i U. ECO, *Tratado de semiótica general*, Lumen, Barcelona, 1977.

14. J. ALBERTS, *La interacción del color*, Madrid, Alianza, 1992.

15. En una línia similar a la d'Alberts, però més recent i centrada en les transparències cromàtiques, cal citar A. GARAU, *Las armonías del color*, Barcelona, Paidós, 1992.

16. Vegeu R. ARNHEIM, *Arte y percepción visual; psicología del arte creador*, Madrid, Alianza, 1979, p. 404-407.

4. ELS COLORS DEL CEL

David Jou*

Un cicle de conferències sobre els colors no pot passar per alt els colors del cel, que susciten, si hi pensem prou, una gran diversitat de preguntes. Per què el cel és blau? Per què els núvols són blancs? Per què el sol és rogenc a l'alba i a la posta? Com es produeix l'arc de Sant Martí? Per què el cel nocturn és negre? Hi estem tan acostumats que gairebé mai no ens preguntem, per exemple, per què el cel és blau de dia i negre de nit. En canvi, aquestes i moltes altres qüestions formen part dels temes de recerca en òptica atmosfèrica. Aquesta capacitat de formular noves preguntes, de posar en qüestió les experiències més habituals, de copsar amb nova intensitat els matisos de la naturalesa, és precisament, un dels al·licients més grans de la física.

En aquest escrit, tractem les qüestions formulades anteriorment, i ens referim també a algunes qüestions d'òptica atmosfèrica relacionades amb problemes ecològics com ara el forat de la capa d'ozó o l'efecte hivernacle.

4.1. PER QUÈ EL CEL ÉS BLAU?

Quan mirem el cel, la llum que en veiem no procedeix directament del Sol, ans ha estat dispersada abans per les molècules que componen l'aire. Si no hi hagués atmosfera, mirariem el cel i el veuríem negre: cap molècula no escamparia la llum rebuda per fer-la arribar als nostres ulls. Per això, l'espai exterior a l'atmosfera, mal-

* Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Bellaterra.

grat estar ple de llum, té la negror colpidora que podem veure en les fotografies dels astronautes.

Cal preguntar-nos, d'antuvi, per la naturalesa dels colors i els mecanismes de la percepció, i per la composició de la llum del Sol. La definició dels colors no és simple, ja que hi intervenen tant elements purament físics com psicofísics. En principi, la sensació de color està associada a la longitud d'ona de la llum. La llum visible és radiació electromagnètica les longituds d'ona de la qual estan compreses entre uns 400 nm, corresponent al color blau-violat, i uns 700 nm, corresponent al vermell-taronja. Ací, 1 nm significa un nanòmetre, o 10^{-9} m, és a dir, una mil·lionèsima de metre, o una milionèsima de mil·límetre. La resta de la radiació, ultraviolada (ençà dels 400 nm) o infraroja (enllà dels 700 nm), no ens és perceptible, ja que la percepció de la llum és duta a terme mitjançant uns pigments que tenen els seus màxims de sensibilitat a les longituds d'ona de 590 nm, 520 nm i 450 nm i que no són sensibles a longituds d'ona allunyades d'aquests màxims de sensibilitat. Ara bé, la sensació de color no està unívocament relacionada amb la longitud d'ona o la freqüència. Així, la mateixa sensació de color que produeix la llum d'una longitud d'ona pot ser reproduïda mitjançant una mescla determinada en proporcions determinades de radiacions de diferents longituds d'ona.

Pel que fa a la composició de la llum del sol, cal saber que la temperatura superficial d'aquest astre és d'uns 6.000 K. Segons les lleis de la radiació del cos negre, això determina un espectre de radiació que té un màxim en la zona dels 680 nm. Això ha determinat, evolutivament, que els pigments que permeten interaccionar més específicament els éssers vius amb la llum del sol, com ara els pigments de la visió dels colors o la clorofil·la dels vegetals, siguin especialment sensibles a radiacions les longituds d'ona de les quals corresponen a les radiacions més abundoses en la llum solar. Així, la clorofil·la absorbeix preferentment la llum vermella de 680 nm i la blava de 430 nm, i fa que la llum que observem, desprovista de vermells i de blaus, quedi enriquida en els colors verds.

Les molècules de l'aire reben, doncs, totes les radiacions de la llum del sol, la suma de les quals produiria una sensació de color blanc. Una part d'aquestes radiacions són reflectides per l'atmosfera, una altra part són absorbides per les molècules de la part alta de l'atmosfera, i una altra part poden travessar les diverses capes d'aire i arribar fins a la superfície de la terra. Així, l'acció de les molècules de l'aire sobre la llum varia segons la longitud d'ona d'aquesta.

Això ens indica que, si volem comprendre els colors del cel, cal escatir les característiques primordials d'aquesta interacció.

Aquestes característiques poden ser analitzades matemàticament a partir de les equacions de l'electromagnetisme, tot estudiant l'acció d'una ona electromagnètica sobre una molècula, o sobre un petit objecte o antena de grandària més petita que la longitud d'ona de la radiació, cas que es dona en les molècules d'oxigen i nitrogen que componen majoritàriament l'aire. Cap a finals del segle XIX, Lord Rayleigh aplicà les equacions de Maxwell de l'electromagnetisme a aquest problema i trobà que el grau de dispersió (o escampament o *scattering*) d'una radiació per part d'un corpuscle és inversament proporcional a la quarta potència de la seva longitud d'ona. Com que el color blau té longitud d'ona més curta que el color vermell (en un factor 1,5, aproximadament), és més dispersat que el vermell en un factor $(1,5)^4 \approx 6$. Per tant, en mirar cap al cel, ens arriba una llum més enriquida en blaus i violats que no pas en vermells. La nostra sensibilitat superior al blau que no pas al violat fa aleshores que vegem el cel blau.

Observem, però, que el blau del cel no té a tot arreu la mateixa intensitat: el blau és més intens i profund en la part alta de la volta del cel, i es torna més blanquinós prop de l'horitzó. L'explicació d'aquest matís, ben copsat pels pintors paisatgistes, és que la llum procedent de les zones properes a l'horitzó ens arriba dispersada per un nombre més gran de partícules. Això incrementa, d'una banda, la brillantor de la llum, però, d'altra banda, torna a mesclar les radiacions de diferents longituds d'ona prèviament escampades per les molècules, i retorna a la llum una mescla de longituds d'ona que la fan esdevenir blanquinosa. Aquesta diferència en la intensitat de blavors del cel fa que les zones de la mar amb moltes ones siguin més fosques que no pas les zones de mar calmada. Això és així perquè les superfícies inclinades de les ones reflecteixen llum de la part més alta de la volta celeste, mentre que les superfícies horitzontals reflecteixen la llum més blanquinosa propera a l'horitzó.

Un altre matís que no ens és directament perceptible és el de la diferent polarització de la llum procedent de diverses parts de la volta celeste. Les abelles poden observar directament aquesta polarització i l'aprofiten com a element d'orientació especialment en els dies en què el Sol no és directament visible.

El fenomen d'escampament o dispersió de la llum explica també per què a l'alba i a la posta el Sol es veu més rogenc. És en aques-

tes hores quan la llum del sol, que arriba a les vores tangencialment a la superfície de la terra, ha de travessar un gruix més gran d'aire. En el transcurs del seu camí troba, per això, més molècules, les quals escampen, com hem dit, més el color blau que el vermell. Com a conseqüència, la llum que segueix en línia recta, és cada vegada més rica en vermells que no pas en blaus. Aquest fenomen queda incrementat si, a més de les molècules, hi ha en l'aire pols molt fina que contribueixi a aquesta dispersió, i per això el Sol és més vermellós després de grans ventades o de grans incendis.

Si el corpuscle amb què interacciona la radiació no és molt més petit que la longitud d'ona d'aquesta, les característiques de l'escampament relatiu de la llum són molt diferents del cas del corpuscle molt més petit que la longitud d'ona. El càlcul esdevé ara molt més complicat, i fou dut a terme per Mie a principis del segle XX. La característica més destacada és que ara el grau d'escampament ja no depèn de la longitud d'ona de la radiació incident: tant el blau com el vermell com tots els altres colors són escampats de forma anàloga i, per això, l'escampament ja no té un efecte selectiu que reforci uns colors i n'afebleixi els altres, sinó que conserva el caràcter de la mescla de radiacions incident. Per això, com que les gotes en suspensió en els núvols o en la boira són en general més grans que la longitud d'ona mitjana de la llum visible, els núvols són blancs.

4.2. EL CEL I ELS COLORS INVISIBLES

La interacció entre molècules de l'atmosfera i la radiació electromagnètica no es limita a la banda visible de l'espectre electromagnètic. La radiació provinent del Sol conté un 45 % de la seva energia en la banda visible de l'espectre, un 53 % en la banda infraroja i un 2 % en la banda ultraviolada. L'acció de l'atmosfera sobre els infrarojos i els ultraviolats, que nosaltres no percebem directament, i les seves conseqüències ecològiques és un tema de gran actualitat.

Pel que fa als raigs ultraviolats, l'energia de cada fotó o quàntum de llum és superior a l'energia dels fotons de la llum visible, ja que l'esmentada energia és proporcional a la freqüència de la radiació, i és prou gran com per produir ionitzacions en les molècules de les cèl·lules de la pell. Aquestes ionitzacions poden produir efectes biològics indesitjables, que poden traduir-se, en alguns casos, en mutacions diverses de les cèl·lules cutànies i en l'aparició de càncer

de pell. Afortunadament, aquestes radiacions massa energètiques són absorbides en gran part en la zona elevada de l'atmosfera per les molècules d'ozó, que són ionitzades per aquestes radiacions. Des de fa uns quinze anys, hom observa una minva important de la capa d'ozó en la zona dels pols i en àrees cada vegada més grans de l'atmosfera a causa de l'acumulació en las capes altes de l'atmosfera de molècules artificials que descomponen l'ozó. Aquesta observació, que ha valgut recentment el premi Nobel de Química als seus autors, fa témer que el nostre planeta pugui quedar relativament desprotegit d'aquesta defensa, cosa que podria traduir-se en un increment de malalties cutànies. Hom ha arribat a acords internacionals per tal de reduir la utilització d'aquestes molècules i intentar que la capa d'ozó es vagi recuperant.

Pel que fa a l'altre costat de l'espectre, la radiació infraroja, de longitud d'ona més llarga que la de la llum vermella, conté una gran part de l'energia calorífica de la radiació. La llum visible travessa l'atmosfera sense ser absorbida i, per tant, sense escalfar-la. En arribar a la terra, és absorbida pel sòl i en fa augmentar la temperatura. El sòl, al seu torn, emet radiació electromagnètica, però com que la seva temperatura és més baixa que la del Sol, la longitud dona dominant de la seva radiació és més llarga que la de la llum visible, i es troba en la part infraroja de l'espectre. Aquesta radiació sí pot ser absorbida per determinades molècules, com ara el vapor d'aigua, l'anhidrid carbònic i el metà. Aquestes molècules capturarien, doncs, la radiació infraroja i farien augmentar la temperatura de l'atmosfera, en l'anomenat *efecte hivernacle*.

Un altre factor de preocupació ecològica en física atmosfèrica ha estat un increment de la concentració de CO_2 en l'atmosfera degut a emanacions d'oxigen industrial, cosa que faria, en principi, que la temperatura anés augmentant. No és encara clar quin és el valor d'aquest increment i quines en són les conseqüències, i depèn dels models utilitzats en l'estudi i de les dades que hom prengui en consideració. En tot cas, és una qüestió que es debat, tant en l'àmbit científic com polític i sociològic, i que pot tenir incidència en les polítiques energètiques a mitjà termini, en especial pel que fa a les fonts energètiques per a la industrialització a gran escala de la Xina o dels països de Tercer Món.

Les característiques de la interacció entre la llum i els núvols són un tema de gran interès pel que fa a aquesta evolució de la temperatura de l'atmosfera. En efecte, un increment de temperatura de l'atmosfera faria que augmentés l'evaporació i, en conseqüència, la nu-

volositat. Ara bé, els núvols tenen un doble efecte sobre la temperatura: d'una banda, absorbeixen radiació infraroja i fan pujar la temperatura atmosfèrica (per això, les nits ennuvolades són menys fredes que les nits de cel clar). D'altra banda, reflecteixen la radiació que arriba del Sol i contribueixen, doncs, al refredament de la terra. Quin d'aquests dos factors predomina és crucial per a l'evolució de la temperatura atmosfèrica. El problema no és senzill, ja que la reflexibilitat dels núvols depèn de la superfície total de les gotes. Així, dos núvols amb la mateixa quantitat d'aigua, però un format per moltes gotes molt petites i l'altre, per menys gotes però més grosses, no tindran el mateix efecte: el primer reflectirà més radiació que no pas el segon.

Segons alguns autors, aquest fenomen podria proporcionar un mecanisme d'autoregulació de la temperatura terrestre en què hi intervindrien factors biològics. Així, un increment de la temperatura faria que augmentés la població de plàncton en el mar. El plàncton, però, emet determinades substàncies que actuen com a nuclis de condensació de les gotes. Així, una quantitat més gran de nuclis de condensació provoca un increment en el nombre de gotes i, per tant, en la reflexibilitat dels núvols, de manera que un increment a curt termini de temperatura provocaria a la llarga un cert refredament que compensaria l'escalfament anterior. La complexitat del problema augmenta pel fet que la reflexibilitat i les característiques òptiques dels núvols també depenen de l'alçada a la qual aquests es formen, i que aquesta pot dependre de la temperatura de l'atmosfera.

4.3. ELS COLORS DE L'ARC DE SANT MARTÍ

Un dels fenòmens més espectaculars de l'òptica atmosfèrica és l'arc iris o arc de Sant Martí. L'origen d'aquest fenomen es basa en la refracció de la llum en les gotes d'aigua en suspensió a l'atmosfera. La refracció consisteix en la desviació d'un raig de llum en passar d'un medi a un altre. La magnitud d'aquesta desviació depèn dels índexs de refracció dels medis, els quals, al seu torn, depenen en general de la longitud d'ona de la llum. Per aquest motiu, un prisma descompon la llum blanca, que conté totes les longituds d'ona, en feixos de llums de colors.

Suposem, doncs, que arribi llum blanca a una gota d'aigua en suspensió a l'atmosfera. El raig de llum es refractarà en entrar-hi, es reflectirà a la superfície posterior de la gota, i es tornarà a refractar

en sortir-ne. La desviació del raig en la refracció depèn, com hem dit, de la longitud d'ona, és a dir, del color, motiu pel qual aquesta doble refracció descompondrà la llum blanca en colors. Un estudi geomètric acurat d'aquest fenomen, dut a terme per primera vegada per Descartes, posa de manifest que hi ha una direcció en la qual aquesta descomposició ateny un màxim d'intensitat: és la direcció que forma un angle de 42° amb la direcció del raig de llum incident. L'arc iris està compost pels raigs de llum de moltes gotes d'aigua diferents. El fet que l'índex de refracció en aigua és més petit per a la llum vermella que per a la llum violada o blava explica, a partir d'una anàlisi geomètrica, que l'exterior de l'arc correspongui al color vermell i l'interior, a la llum blava i violada.

Així, un observador veurà l'arc iris en la direcció en què la visual (línia de l'arc fins a l'ull de l'observador) formi un angle de 42° amb la direcció de la llum solar. Així, no hi ha pròpiament un arc de Sant Martí objectiu, sinó que cada observador veu un arc diferent, en funció de la seva posició. Una altra conseqüència és que els arcs més grans es produeixen quan el Sol està baix, és a dir, cap al crepuscle, i són més grans encara si l'observador es troba en el cim d'una muntanya.

Com que cada vegada que la llum arriba a la superfície de la gota hi ha una part de la llum que es reflecteix i una altra que es refracta, és possible que no tota la llum que arriba a la paret de la gota per a la segona refracció n'arribi a sortir, sinó que una part es pot tornar a reflectir vers l'interior, abans d'experimentar la darrera refracció i sortir de la gota. Aquest fenomen fa que es produeixi un segon arc de Sant Martí, com a conseqüència de raigs que han sofert dues refraccions i dues reflexions. Com que en cada reflexió es perd intensitat, la intensitat d'aquest arc secundari és més petita que la de l'arc primari o principal, i per això resulta més difícil de ser observat. Aquest segon arc té una obertura angular d'uns 51° : per això es troba a l'exterior de l'arc principal i és més gran que aquest. A més, la reflexió addicional fa que l'ordre dels colors sigui invertit respecte a l'ordre amb què aquests es presenten en l'arc principal.

4.4. PER QUÈ EL CEL NOCTURN ÉS NEGRE?

Sembla una obvietat que el cel nocturn hagi de ser negre, excepte pel que fa a la presència de les estrelles. Com que la llum del sol

no arriba a la part de l'atmosfera que estem contemplant, és lògic que aquesta no dispersi gens de llum i, per tant, sigui negra. Però aquesta resposta no tanca definitivament la qüestió.

En efecte, si l'univers fos infinit i etern, cada visual toparia, més tard o més d'hora, amb una estrella o una galàxia. És cert que la lluminositat d'una font decreix de manera proporcional al quadrat de la distància d'aquesta a l'observador, motiu pel qual podríem suposar que l'efecte de les galàxies llunyanes seria negligible. Tanmateix, si la densitat de galàxies fos uniforme a gran escala, el nombre de galàxies a una certa distància de la terra augmentaria proporcionalment al quadrat d'aquesta distància, ja que el volum d'una closca esfèrica és proporcional al quadrat del seu radi. Per aquest motiu, en multiplicar el nombre de fonts lluminoses per la lluminositat, la contribució de cada capa esfèrica de qualsevol radi a la lluminositat del cel seria constant, ja que els efectes del radi es cancel·larien. En sumar les contribucions de totes les capes, la contribució total hauria de ser infinita, i el cel hauria de ser no pas negre sinó enlluernador i roent.

El color negre de la nit és, doncs, també una font de preguntes. Fou el metge i astrònom Olbers, de Bremen, qui va formular amb més claredat aquesta reflexió i va contribuir a difondre la paradoxa. Els intents de resposta han estat diversos. El primer fou suposar que una pols intergalàctica absorbia la radiació de les galàxies llunyanes. Aquest argument no és satisfactori, ja que la pols s'hauria d'anar escalfant i emetria la seva pròpia radiació. Una altra explicació és l'edat finita de l'Univers, que els models cosmològics actuals xifren en uns 15.000 milions d'anys. Si és així, no ens pot arribar la llum produïda per totes les galàxies, sinó només la llum de les galàxies situades en una regió el radi de la qual sigui igual a la velocitat de la llum per l'edat de l'Univers.

Tot i això, l'espai exterior es troba ple de radiació de microones, a una temperatura d'uns 2,7 K, que constitueix una mena de relíquia fòssil de la radiació incandescent que omplí l'Univers en èpoques primitives. Així, abans que l'Univers tingués uns 300.000 anys, la llum interaccionava fortament amb la matèria, ja que aquesta estava completament ionitzada a causa de l'elevada temperatura. Quan, en davallar la temperatura com a conseqüència de l'expansió de l'Univers, anà disminuint el grau de ionització de la matèria, la llum interaccionà cada vegada menys amb aquesta, fins que matèria i radiació van quedar pràcticament sense interactuar

mútuament. La descoberta d'aquesta radiació de fons, el 1965, suposà, si més no per ara, la victòria del model cosmològic del Big Bang per damunt del paradigma competidor de l'Univers estacionari.

La radiació de fons de microones conté informació cosmològica molt valuosa, i per això s'ha estudiat amb una cura extremada. En particular, el 1992 el satèl·lit COBE posà de manifest petites fluctuacions de temperatura, de l'ordre de tres milionèsimes de graus, en aquesta radiació de fons, d'altra banda extraordinàriament isotròpica. Aquestes fluctuacions, buscades molt de temps, podrien indicar les fluctuacions primordials que donaren lloc posteriorment a les galàxies. Tanmateix, la seva grandària és massa petita com per poder explicar la formació de les galàxies sense acudir a nuclis de condensació relativament exòtics, com ara defectes topològics de l'Univers, o acumulacions de matèria fosca de naturalesa desconeguda.

En definitiva, en considerar el color del cel trobem nombrosos temes de gran interès. Constatem l'harmonia entre els pigments fotosensibles d'animals i plantes i la temperatura superficial del Sol. Aprenem a mirar amb més profunditat els matisos del blau del cel i els colors de l'arc de Sant Martí. La negror de la nit ens indica que l'edat de l'Univers és finita i que les estrelles són mortals. La blancor dels núvols fa que ens preguntem per l'evolució futura de la temperatura de l'atmosfera.

REFERÈNCIES

- JOU, D.; BAIG, M. *La naturaleza y el paisaje*. Barcelona: Ariel Ciencia, 1994.
- MEINEL, A. i M. *Sunsets, twilights and evening skies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- TARÁSOV, L.; TARÁSOVA, A. *Charlas sobre la refracción de la luz*. Moscou: MIR, 1985.
- TIPLER, P. A. *Física*. Volum 2. Barcelona: Reverté, 1994.

5. EL COLOR A LA NATURA: ESTRATÈGIES DELS ANIMALS

Albert Masó* i Manuel Pijoan**

5.1. INTRODUCCIÓ

El color dels ésser vius no és un element superflu, ja que intervé directament i essencial en llur supervivència. En efecte, llur capacitat d'adaptació i integració a un ecosistema i llurs possibilitats d'evolució depenen del fet que disposin d'una coloració adequada. Això s'observa en tot el regne animal —i evidentment en el vegetal—, i es pot entendre especialment bé en el cas dels lepidòpters, a causa de les ales acolorides, que són una autèntica tela sobre la qual s'expressen els colors seleccionats per les tendències evolutives de cada espècie. Per això —i per centrar el tema— la il·lustració es basa en els imatges d'aquest grup.

Val a dir que, a vegades, el color que veiem nosaltres no és el que perceben les espècies directament implicades a les quals va «dirigit» el missatge cromàtic. Per exemple, la freqüència de les flors vermelles a la pluvisilva cal entendre-la en funció del que vegin els ocells —diceids, troquilids (colibrís) i d'altres— o els insectes que hi acudeixen, el quals precisament capten millor altres colors, de manera que sovint detecten taques i dissenys que nosaltres no distingim. Un cas molt clar d'això el tenim en les flors blanques que són visitades per papallones. Aquestes capten preferentment en la franja ultraviolada de l'espectre, és a dir, el no visible per a l'home; per tant, quan nosaltres veiem moltes espècies de plantes amb flors blanques similars, els lepidòpters

* Departament d'Ecologia. Facultat de Biologia. Universitat de Barcelona.

** Divulgador científic i escriptor.

les veuen diferents perquè distingeixen els dibuixos de «color ultraviolat».

Una situació extrema de la incorrecta interpretació que hom pot fer dels colors que nosaltres «veiem que tenen els animals» és el color dels que viuen sota l'aigua com, per exemple, els bentònics: corall, esponges... Frequentment, en observar-los en terra ens preguntem per què tindran aquest color vermell tan llampanant. Doncs bé, aquest color vermell sovint no existeix, ja que aquesta radiació no els arriba. En efecte, l'aigua actua de filtre selectiu de la llum solar, disminuint progressivament les longituds d'ona altes, és a dir, la presència dels tons càlids: aproximadament a cinc metres de fondària gairebé ja no hi ha radiació vermella, a deu desapareix la taronja i a quinze ja no arriben els grocs. Per tant, qualsevol organisme que miri un corall «vermell» a més de cinc metres el veurà fosquíssim o negre, ja que reflectir aquesta franja de l'espectre allà significa no reflectir-ne cap, o sia, ser negre. Potser no caldria rebatre l'observació d'alguns submarinistes que diuen que és un color real, perquè no solament fora de l'aigua, sinó que, il·luminats amb torxes *in situ*, també es veuen vermells. Òbviament, els qui viuen allà no poden il·luminar.

Hom no pot parlar de color sense fer referència als camaleons, paradigma del canvi cromàtic en el món científic i en el popular (fotogr. 1). Ho assenyalen aquí perquè la creença que aquests animals adopten els colors del lloc on estan no és del tot certa. A vegades ho pot semblar, però és més per una casualitat que per una voluntat d'aconseguir precisament això. És cert que es poden donar coincidències sorprenents, com el cas descrit d'un camaleó africà (*Chamaeleo africanus*) que imità el disseny a quadres d'una cortina de tela escocesa. Tanmateix, encara que és molt atractiva la hipòtesi de la reproducció del substrat, la realitat és molt més complexa i no es coneix del tot. En un estudi de 1.300 exemplars del camaleó ibèric (*Chamaeleo chamaeleo*) es varen trobar cent quatre patrons de coloració diferents: des del groc clar fins al negre carbó, passant per tots els colors del verd, del bru i del blau. Una conclusió obtinguda és que no sempre que canvia de substrat, canvia de color, ni molt menys. El que sí està aclarit és que varia quan es modifica la il·luminació i la temperatura ambiental, i també quan canvia l'estat anímic del protagonista; per exemple, actituds d'agressivitat, de submissió, d'excitació o de por comporten els patrons de color més foscos.

L'explicació biològica dels colors d'un animal pot ser de força

senzilla a molt complicada, gairebé sempre interpretable i a vegades controvertida. Per exemple, una espècie presa pot tenir color apagat perquè així és més fàcil que passi desapercebuda i els depredadors se la menjaran menys que si tingués colors llampants. Així, la selecció natural afavoreix aquests exemplars, de manera que, quan n'apareixen d'altres menys camuflats, no es reproduïen tant perquè són eliminats pels depredadors. Paral·lelament, un depredador tindrà més èxit si té un color semblant al del medi que l'envolta. Per això un lleó té «color lleonat», és a dir, el de la sorra i l'herba seca de la sabana on viu.

Tanmateix, per què una abella o una serp verinosa posseeixen una combinació de colors tan conspícua? Doncs, perquè advertint de llur perillositat són més respectades que si es confonguessin amb altres espècies. Ara bé, com se selecciona positivament quan l'exemplar acolorit és tòxic i només actua quan és digerit dins l'estómac del depredador? L'explicació no és tan senzilla; la trobareu al capítol 5.3. I per què una mosca o una papallona inofensives adopten els colors llampants d'una vespa o d'una abella? La resposta és encara més complicada i la intentarem donar al capítol 5.5. L'existència de grups d'espècies molt semblants entre si és analitzada al capítol 5.4.

Per interpretar correctament una coloració cal considerar-la sempre en relació al seu entorn, ja que un color pot ser críptic a un ambient i aposemàtic (llampant) a un altre. Fins i tot varia l'efecte segons si es mostra més o menys i segons el lloc concret on se situï. Això queda molt ben il·lustrat amb alguns ocells selvàtics: per una banda, són brillants quan volen ésser identificats pels seus congèneres en la territorialitat (entre mascles) i en el vol nupcial (els mascles vers les femelles), i, per altra banda, poden passar perfectament desapercebuts entre la densa vegetació brillant esquitxada per la llum solar procedent del sostre selvàtic. A més, en aquest entorn, les coloracions brillants de les plomes poden resultar disruptives i, per tant, críptiques (vegeu el capítol següent). Entre les interpretacions més difícils i polèmiques (diversos autors mantenen posicions no coincidents i fins i tot enfrontades) hi ha les dels mimetismes mullerià i batesià, la protecció i selecció de l'espècie o del grup, així com la valoració de l'eficiència de determinats patrons de coloració i llur importància en l'evolució. Això serà tractat en els capítols 5.3 i 5.6.

5.2. CRIPSI

La cripsi (del grec *kryptos*, que significa ‘amagat’) consisteix a adoptar formes i colors que resultin poc visibles en l'entorn on viu l'espècie. En molts grups d'animals, com el grup emblemàtic dels lepidòpters, la majoria d'espècies viuen sobre el sòl, l'escorça d'un arbre, la fullaraca..., i per això la immensa majoria de colors críptics solen ser marró o gris foscos i apagats, amb zones encara més fosques.

Es tracta probablement del sistema de defensa més estès i un dels més eficients; per a la supervivència d'un animal presa, hi ha res millor que no ésser vist? També es coneix aquest fenomen amb els noms de *homotípia* i *camuflatge*, i, quan es basa en el color, rep el nom de *homocromia* (fotogr. 2). És la situació més freqüent amb gran diferència. Si, a més, l'animal adopta formes del medi, se'n diu *homomorfia* (fotogr. 3). Un cas molt clar d'això és el de la papallona que viu als Països Catalans, *Gastropacha quercifolia*, lasiocàmpid d'activitat nocturna que, en posició de repòs, sembla un pilonet de fulles de roure. No és rar trobar en la literatura aquests fenòmens qualificant-los de «mimetismes», però no convé fer-ho en llenguatge científic perquè l'autèntic mimetisme no és críptic i té un funcionament totalment diferent, com veurem en els capítols 5.4 i 5.5.

Moltes espècies necessiten colors vius per a advertir, espantar o trobar parella, entre d'altres possibilitats, però no per això renuncien al camuflatge. Aleshores, han de tenir unes parts del cos amb uns colors conspicus, les quals es mantenen tapades per altres de colors apagats. Això s'observa en molts grups. Per exemple, els tritons dels gèneres *Triturus* i *Euproctus* i moltes sargantanes del gènere *Podarcis* tenen una part preponderant del cos de tipus críptic i una altra, molt llampant. Aquesta pot restar coberta i mostrar-se només quan l'animal vol sorprendre un possible depredador: això fa la salamandra de llunetes (*Salamandrina terdigitata*) aixecant la cua i cargolant-la cap al davant, alhora que dirigeix el cap endarrere, amb la qual cosa aconsegueix deixar ben visible l'àrea inferior vermella. Encara més espectacular pot ser el flaix que proporcionen els gripaus del gènere *Bombina*, els quals presenten un aspecte molt camuflat, però quan són molestats arquegen la columna vertebral, aixequen el cap i la part posterior del cos, tot girant les potes de costat, de manera que queden a la vista les taques vermelles dels palmells i el dibuix molt contrastat del coll. Els iguànids del gènere

Anolis també espanten els agressors amb el coll, desplegant una mena de sac que té dibuixos molt vistosos a la pell, entre les escames. La part aposemàtica pot estar encara més amagada, com és el cas de la serp mocassí (*Agkistrodon piscivorus*), ofidi nord-americà que té una lliurea fosca, però quan vol espantar algun intrús obre la boca, que és blanca com el cotó (d'aquí el nom de *cottonmouth*) i contrasta força, de manera que augmenta l'efecte sorpresa. Semblant però més espectacular és el mitjà defensiu del llangardaix australià *Trachydosaurus rugosus*, que és molt críptic i amenaça obrint la boca i ensenyant una llampant «combinació blaugrana» (sense possible interpretació futbolística) entre el vermell de carmí de la mucosa i el blau de cobalt de la llengua.

Aquesta estratègia és molt clara en els lepidòpters. Els ropalòcers, d'activitat diürna, pleguen les ales verticalment. Per això els colors llampants són a l'anvers de les ales, mentre que el revers (el que es veu en posició de descans) és críptic, i especialment el de les ales posteriors, que són les que se superposen damunt les anteriors.

Les nocturnes, en canvi, pleguen les ales horitzontalment al substrat, de manera que han de tenir un altre patró de coloració. Efectivament, el revers no sol tenir un color massa definit perquè el que es veu és l'anvers. En aquest sí que es poden manifestar els colors adequats: diversos grups tenen les ales posteriors de color vermell, groc, etc. i fins i tot ocelees —com veurem més endavant—, mentre que les anteriors són ben críptiques perquè cobriran les altres en repòs. Per aquests motius, els patrons de coloració d'unes i altres són ben diferents i força característiques de moltes famílies. Hom pot observar tot això en la fotografia 4, on hi ha les espècies ibèriques *Vanessa atalanta* (diürna) i *Smerinthus ocellata* (nocturna). D'altres grups de nocturnes tenen altres combinacions de color.

Un disseny eminentment críptic és l'anomenat *disruptiu*, és a dir, que trenca la silueta per tal de dificultar la seva localització. El cas més espectacular és el de les zebres (fotogr. 5), entre les preses, i del tigre (fotogr. 6), entre els depredadors. Molts altres felins tenen taques que també resulten disruptives. Entre les erugues destacarem les del gènere *Cerura* (fotogr. 7) i, entre els adults, els geomètrids (fotogr. 9). Moltes espècies d'aquesta família imiten la textura i tons del substrat amb línies en ziga-zaga i dibuixos disruptius que trenquen el contorn de l'animal, de manera que algunes de les seves parts s'integren i/o barregen visualment amb elements del fons.

Altres espècies de mida petita, amb poc marge per fer dibuixos massa complicats, simplement tenen un color uniforme, per exemple, «de palla», i abracen amb les ales les tiges de gramínies, sobre les quals es col·loquen verticalment. Així doncs, el color críptic constitueix un procediment simple —«si no em veuen, no se'm mengen»— i eficient. La clau del seu funcionament rau en el seu caràcter directe i preventiu: millor que haver de resoldre un problema és evitar-lo.

5.3. APOSEMATISME I PROTECCIÓ DE GRUP

Una espècie és aposemàtica quan posseeix una coloració que destaca en el medi en què viu. Tanmateix, en alguns casos seria lícit parlar de *aposematisme absolut*, ja que es fa difícil imaginar un ambient on resultessin críptics els mantèlids, grup de granotes de Madagascar que destaquen pel seu viu color vermell (fotogr. 10). Acabem d'explicar en el capítol anterior que nombroses espècies tenen àrees de colors llampants, però que només les mostren quan els interessa, essent predominantment i habitual críptiques. En aquests casos no se sol parlar de *animals aposemàtics*, sinó que aquesta denominació es reserva per a aquells que normalment són fàcils de distingir perquè presenten aposematisme generalitzat, és a dir, que estan en la situació oposada a la cripsi. La causa d'això pot estar associada a la protecció pel que fa a l'espècie o pel que fa al grup. El cas més clar i entenedor d'aquest sistema és el de la toxicitat: si un animal presa és tòxic, perquè el depredador ho detecti se l'haurà de menjar, o al menys intentar-ho. Un cop ingerit, el depredador pot tenir problemes, però la presa normalment ja serà morta (o queda tan malmesa que no arribarà a reproduir-se). Aleshores, de què li serveix? A l'individu, evidentment, res, però a l'espècie sí, perquè el depredador, quan hagi provat un o pocs exemplars, ja entendre la causa de la seva intoxicació i respectarà l'espècie. La rapidesa d'aquest procés dependrà de la intel·ligència del predador i del grau de senyalització que tingui la presa. En això darrer intervé de manera fonamental el color: si és poc vistós, el depredador es confondrà força, mentre que si és ben llampanant, serà molt més recordat i reconegut i, per tant, respectat. Si la presa posseeix coloracions combinades que particularitzin l'espècie, el resultat encara és millor. Tot això constitueix una causa fonamental de l'existència d'animals amb colors aposemàtics. Per a més explicacions, vegeu Masó i Pijoan (1997).

Val a dir que la toxicitat, en un cert percentatge de casos, pot resultar directament protectora ja en el primer atac; això succeirà quan aquest no resulti mortal. Per altra banda, nombroses espècies aposemàtiques presenten un comportament gregari i, a més, mostren una clara tendència a formar grups de parents. Això, d'antuvi, pot incrementar l'efecte advertidor però, a llarg termini, també beneficia el patrimoni genètic de l'individu, perquè afavoreix els que comparteixen en gran proporció el seu bagatge genètic; hom podria dir que d'alguna manera «l'individu sacrificat es reproduïx una mica a través dels seus parents que han resultat protegits». Per altra part, hi ha depredadors que coneixen de manera innata la toxicitat de determinats animals, però són molt freqüents els que ho aprenen per experiència pròpia o per ensenyament dels pares, com és el cas dels ocells insectívors.

Cal advertir al lector que el tema de la selecció en l'espècie o en el grup ha estat molt debatut des dels anys seixanta i que actualment nombrosos biòlegs dubten de la seva existència. A més, diversos experiments han demostrat que alguns casos d'aposematisme es poden explicar solament amb la selecció individual (Waldbauer, 1988; Wiklund i Jarvi, 1997). Recentment, ha aparegut un article en castellà sobre el tema (Cordero, 1999), on s'exposa un punt de vista oposat a les idees de selecció global defensades per S. J. Gould *et al.* (1979, 1982) i Odum (1992), el qual encara diu que «[...] una espècie que beneficia la seva comunitat té més valor de supervivència [...]». També rebut a V. C. Wynne-Edwards, A. H. Hawley, K. Lorenz, R. Margalef i d'altres. En general estem d'acord que cal defugir de les consideracions dels ecosistemes com una mena de macroorganismes, a què s'atribueix una mena de qualitats que no tenen, i no diguem ja de tractar la Terra com a tal. En tot cas, aquests hipotètics atributs s'haurien de demostrar. També denunciem que amb massa freqüència diversos biòlegs apliquen a la natura escales de valors humans, com una mena d'herència de l'antic i popular concepte de «la mare Natura». Hawley (1991) encara segueix considerant que l'adaptació és més un procés col·lectiu que individual i arriba a dir que «[...] una relació que funcioni amb el medi s'assoleix no per individus, ni tan sols per espècies, sinó mitjançant una activitat concertada a través d'una organització de llurs diverses capacitats, és a dir, constituint un sistema comunal».

Situant-nos, doncs, clarament lluny d'aquestes posicions, tampoc no volem caure en l'altre extrem, que porta a Cordero a acon-

sellar-nos «desconfiar de qualsevol argument basat en la selecció de grup». Pensem que rebutjar-ho tot *a priori* és exagerat; abans caldrà veure de quin grup es parla, i després analitzar els arguments. No és el mateix parlar d'ecosistemes o de tota la Terra (a veure qui la diu més grossa!) que parlar d'espècies, subespècies, poblacions o grups de parents. Potser sí que es pot parlar de processos de selecció a algun d'aquests nivells. Tampoc no s'ha de perseguir tot allò que faci «olor» de grup, perquè s'acaba interpretant erròniament el que alguns autors diuen i fins i tot citant-los equivocadament. En aquest sentit, Cordero assenyala que Masó i Pijoan (1997) titulen un capítol del llibre «Selección a nivel de especie», i això no és cert. El títol és «Protección a nivel de especie» (vegeu p. 188), que no és pas el mateix! Precisament en el llibre es tracta reiteradament la selecció individual (cal llegir-ho tot i no solament una frase extreta del seu context) i només es refereix al cas dels lepidòpters. Sí s'admet —i ho ratifiquem en el present article— que un patró de coloració advertidor de la toxicitat serà més eficient si és comú no ja entre els individus de l'espècie, sinó amb altres espècies (de fet, en això es basa el mimetisme mullerià, capítol següent). No estem dient que la *selecció* es produeixi a aquest nivell, sinó que tots els individus de l'espècie (i no solament els parents) reben —o poden rebre— una protecció quan un depredador intoxicat decideix no atacar més determinat patró de coloració. I això ens sembla indiscutible. El mateix Cordero admet (p. 616) que «aquest fet també permet l'evolució dels animals mimètics que, sense ésser verinosos, es beneficien d'una coloració similar a la dels aposemàtics». Aquí l'autor posa «aposemàtics» quan hauria de dir «amb toxicitat o qualsevol sistema de defensa», ja que els mimètics també són aposemàtics. Però, a part d'aquest error menor, està reconeixent una protecció entre espècies que afecta llur evolució. Aleshores, per què no admetre la protecció entre els individus de la mateixa espècie i que això afecta positivament la seva evolució?

En el mateix sentit volem recordar el que diu Margalef (1981): «[...] la reserva de variabilitat que tota aquesta acumulació d'espècies dóna a l'ecosistema pot resultar beneficiosa en el futur, segons com canviïn les condicions ambientals. Fins a cert punt, és el mateix que succeeix amb la variabilitat genètica dins d'una població. No tota és utilitzada, i bona part pot semblar deletèria, però gràcies a la variabilitat genètica l'espècie conserva una major adaptabilitat en el futur». Margalef no està parlant del fet que existeixi una selec-

ció en els ecosistemes, sinó simplement que aquests es veuen afavorits, igual com passa en l'espècie. Tot i amb això, volem remarcar que l'article de Cordero és clarificador i de lectura aconsellable, perquè desarma velles concepcions que encara perduren i manifestem el nostre acord amb ell en un 90 %.

Sigui com sigui, en el cas dels lepidòpters, hi ha moltes erugues tòxiques i aposemàtiques, les quals solen ingerir la toxina de la planta nutrícia. En estat adult no és tan freqüent la toxicitat. Es dona de manera generalitzada en els nimfàlids exòtics de les subfamílies dels heliconins (fotogr. 11) i danains, així com en grups presents als Països Catalans, com els àrtids (fotogr. 12) i zigènids. Aquests darrers no són ropalòcers, però volen de dia. S'ha plantejat la hipòtesi no demostrada segons la qual haurien recuperat l'activitat diürna a causa de l'eficiència del seu pronunciat aposematisme, que adverteix de la presència de derivats de cianur.

En principi, hom podria pensar que els colors aposemàtics i llurs combinacions són il·limitats. En teoria és així, però la realitat és que, en la major part de grups animals, ens trobem un nombre no massa gran de combinacions, amb coincidències en espècies d'ordres, de classes i de filums diferents. De fet, és lògic, ja que es tracta de lligar colors que resultin ben contrastats i, alhora, que destaquin del medi. Com que aquest sol ser verdós (per la vegetació), marró-roigenc o bru-grisós (pel sòl), l'evolució ha seleccionat un seguit de colors complementaris. Els més efectius i universals són:

— el groc amb el negre: serps del gènere terrestre *Bungarus*, dels gèneres marins *Hydrophis* i *Laticauda*, salamandres, granotes, heloderms —els únics llargardaixos verinosos—, abelles, dípters i altres insectes...;

— el taronja amb el negre: granotes, les serps corall, lepidòpters danains i heliconins...;

— el blau amb el marró «sorra»: els pops australians *Octopus lunulatus* i *O. maculosus*, els peixos elèctrics de les nostres costes *Torpedo torpedo*...;

— el blau amb el vermell: lepidòpters zigènids...

En general, hom podria dir que els animals aposemàtics exploren la tendència innata de força vertebrats de rebutjar preses massa llampants, i en concret aquests colors són especialment ben captats pels seus receptors fotosensibles.

La funció dels colors és d'una multiplicitat enorme, de manera que resulta impossible ésser exhaustius ni de lluny. Tan sols com a

indicació d'aquest gran abast, assenyalarem el cas dels mandrils: les femelles escullen els mascles més acolorits, els quals presenten una cara més aposemàtica com més dominants són, és a dir, com més alt és el seu rang dins del grup. Un cas extremadament curiós es dona a Panamà occidental: la granota *Dendrobates pumilio*, dins de la mateixa espècie, presenta poblacions amb molts patrons de coloració de contrast diferents, i arriba a mostrar gairebé tots els colors de l'espectre visible, del vermell al blau, i, per si no englobava tot el cromatisme, la gota que fa vessar el got és que hi ha una població de «color» blanc i negre! Sembla ben bé com si l'evolució no s'hagués decidit a triar-ne un definitiu.

5.4. MIMETISME MULLERIÀ

Rep aquest nom en honor a Fritz Müller, zoòleg que va néixer a Alemanya però va viure a Brasil al segle XIX, on va descobrir el fenomen. Consisteix en el fet que diverses espècies adopten combinacions de colors molt semblants —el mateix patró de coloració— per afavorir la seva supervivència. La interpretació que en fem és la que s'exposa en els següents paràgrafs.

Com acabem de veure, les combinacions aposemàtiques no són massa variades: solen concretar-se en un o dos colors vius sobre un fons fosc. La majoria de les que s'aparten d'aquesta pauta transmetran el missatge de perill amb menys eficiència. Per tant, quan una espècie fixa una combinació que funciona, no hi ha cap raó perquè canviï de patró i, si ho fa, el més probable és que no funcioni tan bé. En canvi, és perfectament normal que, en els conseqüents processos d'especiació, sorgeixin petits canvis de colors o d'extensió de dibuixos, de manera que obtindrem nombroses espècies diferents però molt semblants, és a dir, que «porten el mateix uniforme».

Tot això justificaria la possibilitat que existeixi aquest fenomen, però no que hagi de ser afavorit per l'evolució. I ho és pel gran avantatge que ofereix; com diria Ramon Margalef, totes les espècies que comparteixin el mateix patró de coloració «pagaran el tribut per a l'aprenentatge dels depredadors de manera solidària». És a dir, que cadascuna de les espècies del cercle sinaposemàtic (grup de taxons amb el mateix esquema o patró de colors) només contribueix amb una fracció del total d'exemplars necessaris per advertir els depredadors, i que hauria de ser complet si tingués un disseny peculiar.

Als Països Catalans el cas més clar de mimetisme mullerià és el dels zigènids. Hi ha diversos patrons que determinen cercles sinaposemàtics diferents dins d'aquesta família: un és de color verd (subfamília *Procridinae*), però el més conegut és el del gènere *Zygaena* (fotogr. 13). En efecte, moltes de les seves espècies tenen les ales posteriors vermelles i una combinació molt semblant a les anteriors, a base de taques vermelles (a vegades rivetejades de blanc) sobre fons negre o blau fosc, com per exemple, *Z. rhadamanthus* (fotogr. 14). D'altres espècies segueixen essent semblants, però han invertit els colors (*Zygaena hilaris* i *Z. ignifera*), mentre que en d'altres predomina el blau, com per exemple, en *Z. lavandulae* (fotogr. 15) i *Z. ephialtes*. En d'altres latituds hi ha serps, granotes verinoses i fins i tot mamífers (mustèlids, vivèrrids...), que podem exemplificar: molts peixos del corall de sabor desagradable, tòxics o verinosos, alguns dendrobàtids (granotes) que presenten coincidència geogràfica entre si, les serps de corall (gènere *Micrurus*, etc.) i fins i tot mamífers: algunes mofetes dels gèneres *Spilogale*, *Conepatus* i *Mephitis* presenten coincidència geogràfica (Mèxic), coloració molt semblant en blanc i negre, i fins i tot una olor força característica i similar. Per tant, podria tractar-se d'un mimetisme alhora visual i olfatiu.

Encara que, com s'ha dit, el mecanisme més habitual que genera el mimetisme mullerià és el que està lligat a l'especiació, també es donen casos d'espècies de gèneres diferents (com el cas de les mofetes, i fins i tot de famílies i d'ordres) que s'assemblen per beneficiar-se'n mútuament. Aleshores, lògicament, no tenen un origen filogenètic comú immediat. L'única condició ineludible és la coincidència geogràfica, a més que totes les espècies del cercle tinguin el seu mitjà de defensa. Aquest mitjà pot ser ben diferent, però cal que existeixi, ja que si alguna espècie no el tingués (fos perfectament comestible i indefensa), aleshores estaríem davant d'un fenomen totalment diferent: es tractaria del mimetisme batesià, que s'explica tot seguit.

Cal aclarir que a la similitud cromàtica també s'hi pot arribar per convergència evolutiva, és a dir, entre espècies que no tenen relació filogenètica ni viuen a zones molt properes, fins i tot a continents diferents, com és el cas de la gran pitó verda *Chondropyton viridis* i la boa arborícola maragda *Corallus caninus*: les dues són extremadament críptiques, de color verd amb petites taques blanques, les dues tenen cua prènsil i les dues es cargolen sobre una

branca per a descansar. La primera pertany a la família *Pytonidae* i viu a Nova Guinea, mentre que l'altra es classifica dins dels *Boidae* i és sud-americana.

5.5. MIMETISME BATESIÀ

A mitjan del segle XIX, el gran naturalista anglès Henry Walter Bates (1825-1892), en companyia d'Alfred Russel Wallace (1823-1913) —el coautor de la teoria de l'evolució junt amb Charles Robert Darwin—, viatjà a la selva amazònica i l'explorà durant onze anys. Allà, observant diverses espècies de lepidòpters, va descriure «un curiós fenomen d'engany biològic»: papallones perfectament comestibles s'assemblaven molt (fins al punt de canviar el seu aspecte típic de la família a què pertanyen) a d'altres que eren tòxiques. Aquestes podien presentar mimetisme mullerià entre si, de manera que s'afavorien mútuament, però les primeres s'aprofitaven descaradament del respecte que els depredadors mostraven per aquells colors. Es tractava, doncs, d'una altra estratègia de defensa que, en honor seu, rebé el nom de *mimetisme batesià*. Després s'observà que molts insectes inofensius adopten els dissenys i també el comportament d'altres (fins i tot d'ordres diferents) que presenten molt diferents sistemes de protecció: no solament toxicitat o mal gust, sinó agressivitat o fiblons inoculadors de verí.

Aquest fenomen, fruit d'una llarga evolució, s'ha anat detectant en nombrosos grups d'animals. Entre els rèptils destaquen les serps, ja que les verinoses posseeixen un envejable sistema de defensa. A gran part del continent americà i no sols a la zona tropical, sinó també a l'Amèrica del Nord i a l'Argentina septentrional, és ben coneguda la imitació que sofreixen les serps corall (elàpids verinosos del gènere *Micrurus*) per part de diversos colúbrids inofensius dels gèneres *Lampropeltis*, *Simophis*, *Cemophora*... Una mateixa espècie pot ser copiada per més d'una. Per exemple, *Micrurus fulvius*, del sud dels Estats Units, és mimetitzada per *Lampropeltis triangulum elapsoides* i per *Cemophora coccinea*.

Des del punt de vista filogenètic, l'espècie protegida i la còpia poden estar molt allunyades i pertànyer a famílies i fins i tot a ordres i classes diferents. Dins d'una mateixa família, hom pot citar els cas dels nimfalíds danains africans del gènere *Amauris*, que són tòxics i els mimetitzen els nimfalins dels gèneres *Hypolimnias* i

Pseudacrea, perfectament comestibles. Entre famílies diferents hi ha l'exemple del papiliònid *Papilio dardanus*, les femelles del qual (de formes i colors variables) imiten diverses espècies de nimfàlids danains, en un fenomen que es coneix per plurimorfisme sexual. Entre ordres diferents trobem mimetisme batesià per part dels sèsid i alguns esfíngids diürns (tots ells lepidòpters) que s'assemblen molt a vespes, abelles i altres himenòpters, amb la qual cosa s'aprofiten del conegut sistema defensiu d'aquests. Als Països Catalans, un dels casos més clars és el de la papallona *Sesia apiformis* (fotogr. 16) i el d'altres sèsids i diversos dípters que s'assemblen a himenòpters (fotogr. 17). Finalment, entre classes, l'eruga del lepidòpter africà *Phorma pegon* sembla una aranya grossa.

Lògicament, el mimetisme batesià sol detectar-se en el seu aspecte visual i sens dubte aquest és el més important, però també existeix mimetisme sonor, olorós i de comportament. Tenim un cas molt evident al nostre país: els sèsids no solament han perdut escames alars per poder ser transparents i han adquirit colors groc-negres, sinó que, per augmentar la similitud amb els himenòpters, han adoptat un tipus de vol molt rar en les papallones: el vibrat o estacionari. Aquesta semblança etològica no es queda aquí, ja que també acudeixen a les mateixes flors i es barregen amb les espècies mimetitzades. També fan una remor semblant a la de vespes i abelles: *mimetisme sonor*.

Quan H. W. Bates descobrí aquest mimetisme amb unes papallones que s'assemblaven, segurament no podia imaginar l'abast del fenomen i les múltiples facetes que podia adoptar. Un mitjà de defensa extremadament eficaç per als grups que ho poden fer és el vol ràpid. Doncs bé, un comportament tan important no podia alliberar-se de ser mimetitzat. En efecte, uns corcós (coleòpters) d'Amèrica central tenen una forma i unes marques brillants que els fan molt semblants a unes mosques de vol rapidíssim. Així, tot i ser totalment capturables, dissuadeixen l'atac de molts depredadors perquè aquests saben per experiència que no podrien atrapar les mosques. El mateix fan diverses espècies de papallones mal voladores de Costa Rica, les quals adopten colors, disseny i comportament en repòs semblants a d'altres lepidòpters de vol ràpid.

El mimetisme batesià troba els seus límits en la biogeografia i la dinàmica de les poblacions. Lògicament, la distribució de l'espècie mimètica ha de coincidir (estar inclosa) més o menys amb la de la mimetitzada. També ha de conservar una certa proporció numèri-

ca, en el sentit que ha de ser menys abundant, ja que si no els depredadors tindrien més probabilitat de trobar-se amb la còpia i descobririen l'engany. Finalment, en les espècies que tenen un període de presència (insectes que volen a la primavera o a l'estiu, per exemple), la còpia sol aparèixer més tard que l'original. Tanmateix, aquesta situació general pot trobar-se modificada per diversos factors: que ocupin nínxols ecològics diferents, que tinguin comportaments dissociats en el temps (activitat diürna, crepuscular o nocturna), etc.

5.6. COLOR, EVOLUCIÓ I SISTEMES DE DEFENSA

Amb tot el que s'ha explicat, resulta evident que el color influeix en la supervivència de les espècies. Si l'adopció d'un determinat color significa algun avantatge per als individus, el més probable és que sobrevisqui amb més facilitat. Si l'augment de la supervivència es tradueix en un increment de la seva reproducció, aleshores aquesta coloració se selecciona positivament respecte a les altres, és a dir, en la següent generació augmentarà la proporció dels exemplars que tenen aquest nou cromatisme. I si això es manté al llarg del temps, la població o l'espècie globalment canviarà, o sia, haurà evolucionat.

Fixem-nos que perquè hi hagi evolució és imprescindible que s'incrementi la probabilitat de reproduir-se. Si no és així, encara que un canvi impliqui algun avantatge, mai no serà seleccionat. Per això és fàcil de comprendre la importància que té la selecció sexual. Són molt coneguts els casos de selecció dels mascles per part de les femelles. Entre els milers d'exemples hom pot recordar el de les fragates (amb l'enorme pap vermell) i el dels mandrils, en els quals, a més, les coloracions de la cara tenen un valor jeràrquic dins del grup. El rostre del uacari, el mico sud-americà de cara vermella, és molt acolorit i quan està excitat brilla més. Molts iguànids anolins (llangardaixos) tenen colors aposemàtics a la bossa gular que serveixen, a més de per a la selecció sexual i la jerarquia, per advertir als mascles rivals que el territori està ocupat.

Tots els casos indicats als capítols anteriors demostren clarament la relació que hi ha entre l'evolució i els sistemes de defensa, i en concret que moltes espècies són factor de selecció per a d'altres, ja que s'influencien entre si a base de senyals, cripsis i mimetismes

de diversos tipus, de manera que sovint es pot parlar d'una autèntica coevolució. Com diu el Dr. Ramon Margalef (1981), l'evolució requereix el seu temps. Potser per això els exemples més avançats de coevolució apareixen preferentment en ecosistemes que s'han conservat més o menys invariables durant molt de temps. Així, els casos més sorprenents de crípsis i mimetismes es troben sobretot a les selves tropicals plujoses, als esculls coral·lins i a altres indrets que gairebé no s'han modificat substancialment durant força milions d'anys.

En tots els casos, l'evolució afavoreix un bon sistema de defensa, és a dir, evita l'eliminació d'exemplars, de manera que actua en el sentit d'alentir el flux d'energia d'un graó de la cadena tròfica al següent. A més, en els ecosistemes més antics el nombre d'espècies tendeix a augmentar, a produir organismes molt especialitzats i a generar un gran nombre de relacions complexes entre les espècies. Actualment, algunes d'aquestes relacions són neutres (no aporten cap benefici ni perjudici a les espècies), però persisteixen mentre no impliquin un autèntic inconvenient per a llur supervivència. Una bona comparació d'aquest funcionament és la que fa Cott (1949): una ciutat plena de cotxes en la qual la finalitat no fos aconseguir una major fluïdesa del trànsit, sinó el màxim retard possible de la circulació. L'evolució intentaria «gastar la mínima quantitat de combustible» i, contràriament al que plantegen les fàbriques de vehicles i una certa lògica, acumular més i més cotxes.

Com hem dit, la selecció natural —i per tant l'adaptació— pot actuar a diversos nivells, no solament al d'individu, població i espècie, analitzats aquí. Recordem que no ha quedat mai demostrat, tot i que s'ha proposat per alguns autors, que actuï en nivells superiors. De fet, ja hem tractat la polèmica de la selecció de grups. Si considerem establert que ho poden fer en els nivells inferiors a l'individual (Dawkins, 1989), però això escapa a les intencions del present article.

En qualsevol cas, la relació entre evolució i sistemes de defensa —exemplaritzada en el mimetisme batesià— ja fou analitzada de manera força precisa per Charles Darwin (1859) en el seu llibre *L'origen de les espècies*, concretament al capítol «Similituds analògiques». Hi cita el cas dels lepidòpters nimfàlids itomins, que presenten toxicitat i són mimetitzats per altres papallones inofensives i comestibles del gènere *Leptalis*, que es barregen en els eixams de les primeres. A vegades, la similitud és tan gran, que costa de distingir

l'espècie mimetitzada de la mimètica, fins i tot en estudi i quan es tracta de diferent família. Probablement, entre els lepidòpters es distingeixen més fàcilment gràcies als colors ultraviolats que nosaltres no veiem. El mateix Darwin assenyalava la dificultat que tenia Henry W. Bates, després d'estar anys a l'Amazònia, per a discernir en el camp entre l'original i la còpia.

5.7. MITE I REALITAT

Amb totes aquestes explicacions, però, pot passar que quan veiem una semblança clara entre dues espècies, de seguida pensem en sistemes de defensa i mimetismes, i no sempre és així. A vegades, l'eficiència d'algunes estratègies és, com a mínim, dubtosa. Per exemple, l'eruga del notodòntid català, *Stauropus fagi* (fotogr. 8), té un color críptic evident, però ja no és tan segur que l'aspecte realment estrany que té espanti els seus depredadors. Un altre cas és el de la crisàlide d'un licènid de les pluvisilves americanes, *Spalgis lemolea*: es col·loca a la part superior d'una fulla de tal manera, que de lluny simula els excrements d'un ocell. Només aquest aspecte, no pas atractiu per a ésser ingerit, ja dissuadeix molts depredadors. Fins aquí correcte, però resulta que, vista de prop, la crisàlide en qüestió recorda estranyament la cara d'un mico. Per a alguns, això podria tenir valor defensiu. Nosaltres preferim pensar que, en tot cas, es tracta simplement d'un efecte sorpresa com succeeix amb tants altres patrons de coloració. Quelcom semblant passa amb una papallona nocturna present a tots els Països Catalans: l'*Acherontia atropos*. Té diversos noms vulgars: *cap de mort*, *esfinx de la calavera*, *papallona de la mort*, etc., els quals ja fan intuir quin dibuix té a la part dorsal del tòrax: una calavera groguenca sobre fons negre. Certes interpretacions que li atribueixen capacitat espadidiosa són ingènues, subjectives i antropocèntriques, car cap animal, a part de l'home, pot espantar-se amb la visió del símbol dels pirates. I sí espantava l'home, ja que a l'edat mitjana l'entrada d'aquest esfíngid a una església era auguri de mals presagis. Aquesta creença es veia reforçada pel fet que, quan se l'agafa, emet un xiulet esgarriós «com d'ultratumba».

Un altre error freqüent consisteix a confondre els mimetismes amb les convergències evolutives. Millor encara que amb el cas abans citat de la boa i la pitó verdes, que estan molt allunyades geo-

gràficament, aquesta diferència s'il·lustra amb l'exemple de la papallona borinot (esfíngid d'activitat diürna) i els colibrís (troquí-lids), els quals viuen en els mateixos indrets. Realment ambdós grups d'animals presenten una morfologia i un comportament molt semblants. A més, els dos utilitzen els mateixos recursos trò-fics i tenen el mateix tipus de vol: l'anomenat *vibrat* o *estacionari*, el qual és molt rar tant entre els lepidòpters com entre els ocells. Aquest sistema de volar els permet quedar-se quiets en l'aire com els helicòpters i així poden alimentar-se del nèctar de moltes flors que són inaccessibles per a gran quantitat d'insectes, perquè es do-bleguen quan un pes petit se'ls col·loca al damunt. Tanmateix, totes aquestes similituds són coincidències, les quals, per moltes que si-guin, no fan que hi hagi mimetisme de l'un respecte a l'altre. I no n'hi ha perquè la convergència evolutiva precisament consisteix en el fet que cada espècie ha evolucionat per la seva banda sense co-piar-se mútuament, entre altres coses perquè no n'haguessin tret cap avantatge. Es tracta, senzillament, que, en ocupar un mateix nínxol ecològic, és lògic que hagin adoptat morfologies i compor-taments semblants; això sí, a vegades massa!

BIBLIOGRAFIA

- AYENSU, E. S. [ed.] (1980). *The life and misteries of the jungle*. Washington, DC: Smithsonian Institution; Nova York: Cres-cent Books; Marshall Editions Limited. 200 p.
- ARAÚJO, J. (1987). «Conducta amorosa». A: *El reto de la vida: En-ciclopedia Salvat del comportamiento animal*. Barcelona: Salvat Editores. 103 p.
- ARNOLD, E. N.; BURTON, J. A. (1982). *Guía de Campo de los Rep-tiles y Anfibios de Europa*. Barcelona: Omega. 276 p.
- BATES, H. W. (1863). *El naturalista por el Amazonas*. Laertes, 1985.
- BEHLER, J. L.; KING, F. W. (1985). *The Audubon Society Field Guide to North American Reptiles & Amphibians*. Nova York: Alfred A. Knopf. 743 p.
- BREWER, J. (1978). *Butterflies*. Nova York: Harry N. Abrams.
- COLLINS, M. [ed.] (1991). *Las últimas selvas tropicales del mundo*. Barcelona: Folio. 200 p.
- CORDERO, A. (1999). «Adaptación, selección natural y la falacia de «la supervivencia de la especie»». *Bol. S. E. A.*, 26, p. 613-617.

- COTT, H. B. (1949). *Adaptative coloration in animals*. Londres: Methuen & Co. [Reimpressió, 1966]
- DARWIN, C. (1859). *The Origin of Species*. Vegeu versió de Leakey.
- DAWKINS, R. (1989). *The selfish gene*. Oxford: Oxford University Press.
- DOMÍNGUEZ, M. (1990). «La coloración de los insectos». *La Vanguardia: Ciencia y Tecnología* [Barcelona], 30 de juny.
- FERRER, J. A.; MARTINS, A.; PIJOAN, M. [et al.], (1988). *Historia Natural Océano*. Barcelona: Océano.
- FOY, S. [et al.] (1982). *The Grand Design, form and colour in animals*. Nova Jersey: Prentice-Hall: Englewood Cliffs.
- GOULD, S. J.; LEWONTIN, R. C. (1979). «The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme». *Proc. R. Soc. Lond. B.*, 205, p. 581-598.
- GOULD, S. J.; VRBA, E. S. (1982). «Exaptation, a missing term in the science». *Paleobiology*, 8, p. 4-15.
- HAWLEY, A. H. (1991). *Teoría de la ecología humana*. Madrid: Tecnos. 198 p.
- KLAUSNITZER, B. (1983). *Beetles*. Nova York: Exeter Books (Simon & Schuster).
- LEAKEY, R. E. (1983). Versió abreujada de DARWIN, Charles. *El origen de las especies*. Barcelona: Ediciones del Serbal. 304 p. [4a reimpressió, 1994.]
- MARDEN, J. H. (1992). «Newton's second law of butterflies». *Natural History*, 1/92.
- MARGALEF, R. (1981). *Ecología*. Barcelona: Planeta. 253 p.
- (1992). *Ecología*. 5a edició. Barcelona: Omega. 960 p.
- MASÓ, A. (1997). *Kalahari. El desierto rojo*. Barcelona: Àmbit. 144 p.
- (1998). «Patrones de coloración en las mariposas». *Mundo Científico (la Recherche)* [Barcelona], 188, p. 52- 55.
- MASÓ, A.; PÉREZ, J. J.; VALLHONRAT, F. (1985). *La vida de les papallones, iniciació a la biologia dels lepidòpters*. Barcelona: Ketres Editora. 316 p. (Col·lecció Ventall).
- MASÓ, A.; PIJOAN, M. (1997). *Observar mariposas*. Barcelona: Planeta. 320 p.
- MERTENS, R. (1959). *La vie des amphibiens et reptiles*. París: Horizons de France. (La Nature vivante).
- NÖLLERT, A.; NÖLLERT, C. (1995). *Los anfibios de Europa*. Barcelona: Omega. 399 p.

- ODUM, E. P. (1992). «Great ideas in ecology for the 1990s». *BioScience*, 42, p. 542-545.
- VANE-WRIGHT, R. I.; ACKERY, P. R. (1984). *The Biology of Butterflies*. Londres: Academic Press: Harcourt Brace Jovanovich.
- VILLEGAS, B.; URIBE, C. [ed.] (1990). *La selva húmeda de Colombia*. Bogotá: Villegas. 198 p.
- WALDBAUER, G. P. (1988). «Aposematism and Batesian mimicry. Measuring mimetic advantage in natural habitats». *Evol. Biol.*, 22, p. 227-259.
- WALLACE, A. R. (1869). *Viaje al archipiélago malayo*. Laertes. [Reimpressió de 1984].
- WIKLUND, C.; JARVI, T. (1982). «Survival of distasteful insects after being attacked by naive birds: a reappraisal of the theory of aposematic coloration evolving through individual selection». *Evolution*, 36, p. 998-1002.
- WILSON, E. O. (1992). *The Diversity of Life*. Harvard University Press. 496 p.



FOTOGRAFIA 1. El camaleó és el símbol del camuflatge i del canvi cromàtic. A la fotografia, *Chamaeleo parsoni*, el camaleó gegant, endèmic de Madagascar, que pot assolir mig metre de longitud. (Fotografia: Albert Masó i Elizabeth Gallo)



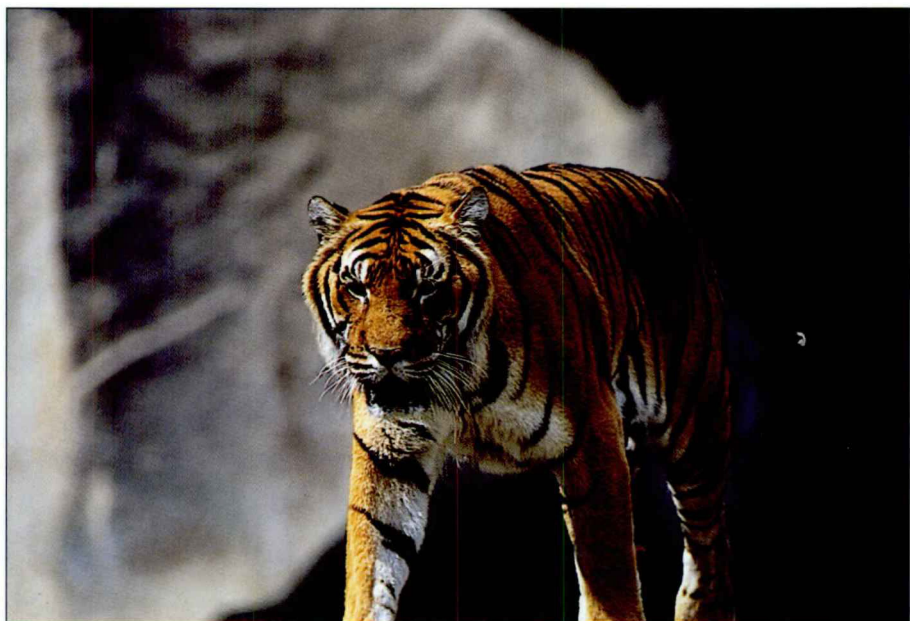
FOTOGRAFIA 2. Eruga del satúrnid ibèric *Graellsia isabellae* (Josep Ylla), que presenta homocromia amb les fulles del pi roig on viu. (Fotografia: Albert Masó)



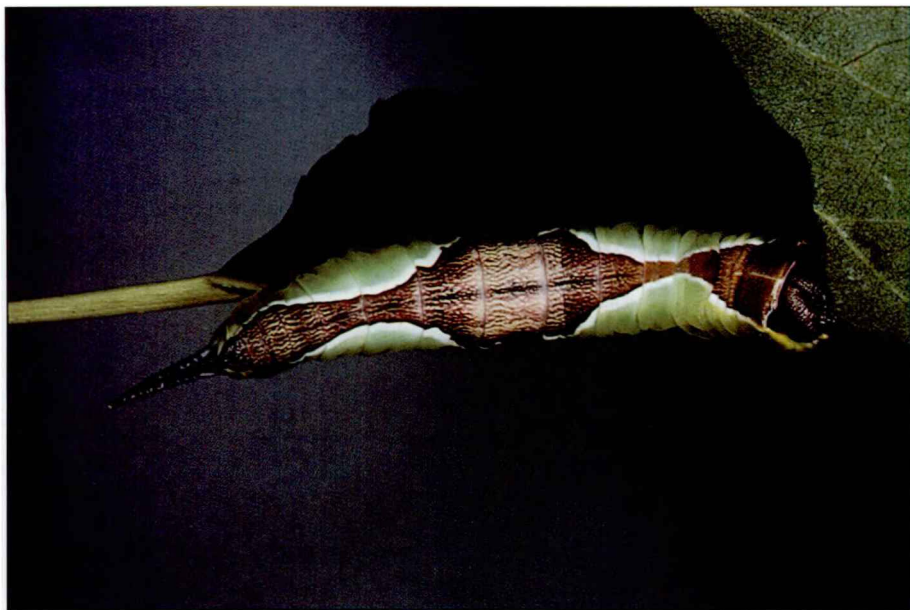
FOTOGRAFIA 3. Imago del lasiocàmpid ibèric *Gastropacha quercifolia* (Pere Ribas leg.), que presenta homomorfia amb les fulles de roure, com el seu nom indica, per la qual cosa incrementa la semblança amb la disposició de les ales, que simulen un pilonet de fulles. (Fotografia: Albert Masó)



FOTOGRAFIA 4. Cripsi i defensa. En els ropalòcers (diürns) (*Vanessa atalanta*, esquerra), la part més acolorida és l'anvers de les ales anteriors. Això permet el reconeixement i la comunicació entre individus. La zona més críptica és el revers de les ales posteriors (al mig), l'única visible en posició de repòs (a baix). En moltes espècies nocturnes (*Smerinthus ocellata*, dreta), que pleguen les ales horitzontalment, la part més aposemàtica és l'anvers de les ales posteriors, que mostren per espantar l'agressor (al mig). L'anvers de les anteriors és el més críptic i cobreix les posteriors en posició de repòs (a baix). (Fotografia: Albert Masó)



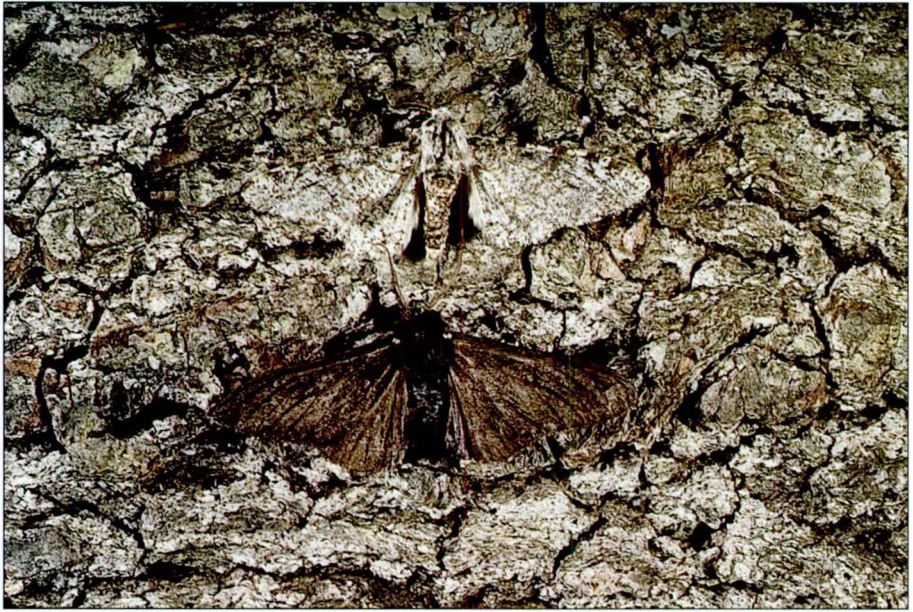
FOTOGRAFIES 5 I 6. El disseny disruptiu és la coloració críptica que trenca la silueta per tal de dificultar la localització de l'animal, cosa que utilitzen tant les preses (zebra comú, *Equus burchelli*), com els depredadors (tigre, *Panthera tigris*). (Fotografies: Albert Masó i Elizabeth Gallo)



FOTOGRAFIA 7. Els dibuixos disruptius són presents en tot tipus d'animals, com ara en les erugues del notodòntid ibèric *Cerura vinula* (Lluís Simó leg.), que dificulten així la localització per part dels depredadors (per exemple, els ocells) mentre resten amagades entre la fullaraca dels arbres. (Fotografia: Albert Masó)



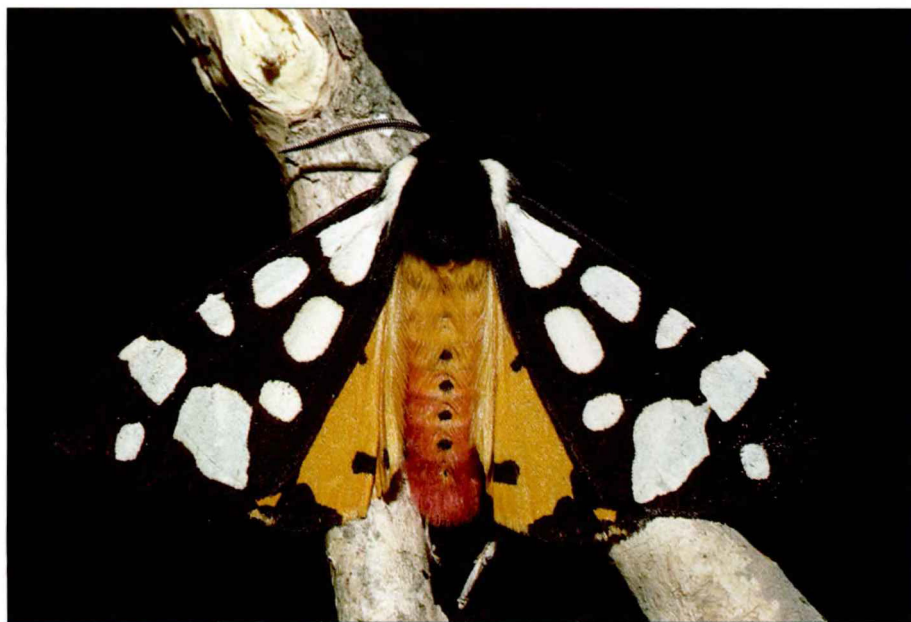
FOTOGRAFIA 8. L'eruga del notodòntid ibèric *Stauropus fagi* (Jordi Martín i Emese Borsiczky leg.) té una coloració eminentment críptica, l'eficiència de la qual s'accentua amb les postures que adopta. El que ja no sembla tan segur és que el seu aspecte (realment estrany i fins i tot espantador per a nosaltres) espanti els seus depredadors, com algunes vegades s'ha suggerit. (Fotografia: Albert Masó)



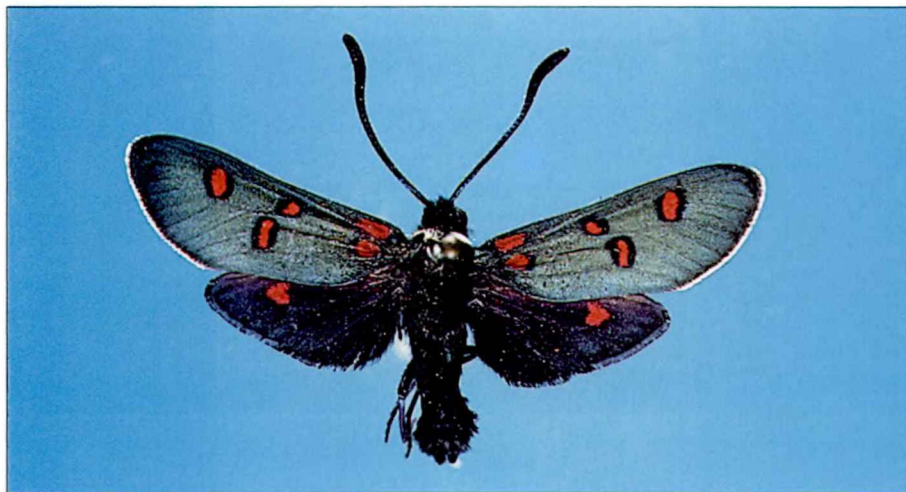
FOTOGRAFIA 9. Molts geomètrids presenten un disseny ple de punts i ratlles que incrementen la seva confusió amb el substrat. L'espècie fotografiada, *Biston betularia* (José Luis Yela leg.), a més, ha protagonitzat el «melanisme industrial», és a dir, el pas de la forma blanca (originalment críptica) a la negra en les zones contaminades, degut a l'enfosquiment dels arbres. (Fotografia: Albert Masó)



FOTOGRAFIA 10. Un cas de coloració «absolutament» aposemàtica és la dels mantèlids, les granotes verinoses de Madagascar, com aquesta *Mantella aurantiaca*. (Fotografia: Albert Masó i Elizabeth Gallo)



FOTOGRAFIES 11 i 12. La viva coloració dels nimfàlids heliconins americans (a dalt) i d'alguns àrctids ibèrics com l'*Arctia villica*, a baix (Josep Cuello leg.) és premonitòria de llur toxicitat. (Fotografies: Albert Masó)



FOTOGRAFIES 13, 14 i 15. Els zigènids són un exemple claríssim de patrons de coloració determinats pel mimetisme mullerià. A les fotografies, les espècies ibèriques *Zygaena purpuralis* (a dalt) (Julian Best leg.), *Z. rhadamanthus* (al mig) i *Z. lavandulae* (a baix). (Fotografies: Albert Masó i Elizabeth Gallo)



FOTOGRAFIA 16. El lepidòpter ibèric *Sesia apiformis* (Joaquim Vilarrúbia leg.) ha perdut el seu aspecte de papallona; per això és un bon exemple de mimetisme batesià amb els himenòpters. (Fotografia: Albert Masó)



FOTOGRAFIA 17. Possible mimetisme entre espècies ibèriques d'ordres diferents: l'himenòpter cimbicid *Cimbex quadrimaculata* (a dalt), el dípter sírfid *Volucella zonaria* (al mig) i el lepidòpter sèsid *Sesia apiformis* (a baix). L'únic que presenta perillositat és l'himenòpter; els altres són del tot inofensius i s'aprofiten del respecte que tenen els depredadors per aquests dissenys. (Fotografia: Albert Masó)

6. EL COLOR DE LES PLANTES DES DE LA PERSPECTIVA DE L'ECOLOGIA COMPARADA

Àngel Romo*

6.1. EL COLOR DES D'UN PUNT DE VISTA FUNCIONAL

El color és un atribut funcional que no ha estat objecte de gaire atenció en el món de les fanerògames o plantes amb flors. Si s'exceptua el color dels òrgans reproductors durant el període de floració, estudiats per Dafni (1986), la resta del cicle vital no s'ha abordat amb atenció fins a temps molt recents per Orshan (1988) i per Specht (1989). Ambdós autors han fet diferents aproximacions per algunes espècies mediterrànies.

Aquest estudi i el d'altres atributs funcionals de les plantes permeten tenir una visió més dinàmica de les espècies i les comunitats vegetals que en formen part. És important reconèixer les estructures vegetals, però no les entendrem si no en fem una lectura funcional en el temps i des del punt de vista de l'ecologia comparada. L'interès d'aquests tipus d'estudi ha estat recentment exposat per Duarte *et al.* (1995). A més s'ha comprovat que és una eina bàsica per conèixer la dinàmica d'espècies i comunitats de plantes.

Però, quin significat funcional té el color en les plantes? Per què un color és més freqüent que un altre en determinada comunitat vegetal o en determinada època de l'any? Són determinats colors més ben representats en determinats estrats de vegetació? Hi ha alguna relació entre la forma vital i el tipus de fruits i els seus colors? Existeix alguna relació entre els colors i les diferents estratègies de les plantes? Quins avantatges funcionals presenten determinats co-

* Institut Botànic de Barcelona.

lors? Quina és la relació entre el color i les estratègies bàsiques de les plantes? Fins a quin punt l'estructura de la comunitat condiciona la presència d'espècies amb endozoocòria?

Si reconeixem les forces selectives, agrupades en dos grans blocs: estrès i pertorbació, que condicionen la vida de les plantes i estudien les respostes que se'n deriven, podem agrupar les plantes en tres grans tipus d'estratègies bàsiques (Grime, 1986 i Romo, 1993).

TAULA I

Classificació de les plantes segons les forces selectives

	<i>Pertorbació –</i>	<i>Pertorbació +</i>
<i>Estrès –</i>	competidores	oportunistes
<i>Estrès +</i>	tolerants a l'estrès	estratègia no viable

Intensitat de la força selectiva: +, gran i –, petita.

Les plantes de cadascuna d'aquestes estratègies tenen una sèrie de característiques pròpies i alhora existeixen espècies amb estratègies intermèdies (Romo, 1993). Per classificar les plantes en funció de la seva estratègia bàsica es pot fer servir la clau dicotòmica proposada per Romo (1994).

6.2. LES PLANTES OPORTUNISTES

Les plantes que s'engloben en aquesta estratègia tenen un cicle vital curt; no necessiten crear estructures complexes ni grans mecanismes de defensa; presenten estructures vegetatives senzilles: tiges, fulles i arrels estan desenvolupades només per completar el seu cicle sense necessitat d'acumular reserves en òrgans especials ni de protegir les seves estructures enfront de pertorbacions o estrès.

Les tiges, si hi són presents, no són llenyoses, sinó herbàcies, i des del punt de vista funcional, fotosintètiques. La major part de les vegades es troben únicament en les fenofases reproductives. Són verdes, generalment glabres i sense pèls o amb pilositat poc densa.

Les fulles d'aquest grup de plantes tenen un període fotosintètic curt, ja que mantenen llur activitat funcional menys de sis mesos, el seu color és generalment verd i es presenten sense indument

El color de les plantes des de la perspectiva de l'ecologia comparada o cobertes d'una lleugera pilositat, que modifica molt lleument el seu color.

La floració és massiva i espectacular, perquè hi són freqüents les inflorescències, la qual cosa facilita la formació de nombroses llavors. En les flors dominen els colors vius i vistosos, amb la finalitat d'ésser atractives per als insectes pol·linitzadors. En aquest grup de plantes les estructures de l'aparell reproductor són tan grans o més que les de l'aparell vegetatiu.

Les granes de les plantes oportunistes es formen en gran quantitat. Majoritàriament són petites i molt nombroses. Hi dominen els colors foscos, marrons i negres. Són granes que generalment formen part del banc de granes al sòl.

Les granes del banc de granes, que presenten colors foscos, són llises i esfèriques. Són granes amb una disseminació inespecífica: en caure al sòl s'escalfen o ja s'han escalfat abans a la càpsula, on es dilaten lleugerament; en arribar al sòl disminueix la seva temperatura i es contrauen lleugerament, cosa que afavoreix que se situïn a les esquerdes del sòl, on poden atènyer amb facilitat els seus nivells inferiors.

Dins de les plantes oportunistes hom pot reconèixer tres grans grups, les característiques dels quals queden resumides en la taula II.

Les anuals d'estiu (*Ae* en la taula II) són plantes que germinen a l'inici de l'estiu, formen totes les estructures foliars i caulinars durant aquesta estació i floreixen i fructifiquen a la tardor. Hi dominen les plantes semiparàsites o hemiparàsites, característica que s'interpreta com un mecanisme per obtenir prou recursos per crear totes les estructures de forma ràpida. Hi dominen les plantes de color verd fosc, verd groguenc i d'altres de color marró rogenc. En les escrofulariàcies estan ben representats aquest grup de plantes, i el gènere *Odontites* n'és un bon exponent. Són plantes amb fulles reduïdes i tiges generalment elevades, pròpies bàsicament de pastures seques i de llocs pedregosos. D'alguna manera aquestes plantes aprofiten els excedents formats per les plantes parasitades. La presència de clorofil·la, en major o menor grau, afavoreix la fotosíntesi al menys en part.

Les anuals d'hivern (*Ab* a la taula II) germinen a finals de la tardor o a l'inici de l'hivern; passen aquesta època en forma de plàntules o roseta, i floreixen i fan les granes a la primavera.

TAULA II

	<i>Ab</i>	<i>Ap</i>	<i>Ae</i>
<i>Fulles</i>			
color	verd	verd	verd-glauc
tomentositat	en una o ambdues cares	absent	a la cara superior
<i>Tiges</i>			
tomentositat	freqüent	rara	freqüent
<i>Flors</i>			
color	variats	clars; blanc/negre	fosc
pol·linitzador	insectes o vent	insectes	insectes
<i>Fruits</i>			
color	fosc o clar	clar	fosc
disseminador	autocòria o mirmecòria	autocòria	autocòria
<i>Tipus de reproducció</i>	banc de grans	banc de grans	banc de grans
<i>Proporció estructures reproductores/ vegetatives</i>	1	> 1	< 1
<i>Anys de vida de la planta</i>	< 9 mesos	4-6 mesos	4 (5) mesos
<i>Tolerància a l'estrès</i>	alta	baixa	baixa

Significat: *Ab* = anual d'hivern; *Ap* = anual de primavera; *Ae* = anual d'estiu.

Les anuals de primavera (*Ap* a la taula II) són plantes que germinen a la primavera i floreixen i fructifiquen en aquesta mateixa estació o a l'inici de l'estiu.

Un grup més reduït, entre les plantes oportunistes, és el format per plantes autògames, amb flors poc vistoses o de colors clars. Les plantes anemòfiles hi són poc freqüents, si exceptuem algunes representants de famílies molt evolucionades de monocotiledònies.

6.3. LES PLANTES TOLERANTS A L'ESTRÈS

Les plantes d'aquesta estratègia desenvolupen tota una sèrie d'estructures per fer front a les condicions adverses on han de viure. Són abundants a les seves estructures pèls, glàndules i tot tipus de tomentositat. Fulles i tiges són dominades pels colors grisos, blanquinosos, verds blavís i fosc. Aquest fet és especialment marcat als ambients àrids o molt secs.

Dins de la tomentositat dominen els pèls pluricel·lulars, els tricomes estrellats i, en alguns casos, ceres o escates. També hi poden ésser presents pèls glandulosos.

Les flors són, en molts casos, petites, poc vistoses, clares, i hi domina el color blanc. La floració és massiva i la disposició en inflorescència compensa la seva mida reduïda. Les flors presenten molt sovint nèctar i la duració de la floració és bastant perllongada, a més de molt estacional.

L'optimització d'aquesta floració fa que en determinades espècies amb aquesta estratègia existeixi un procés cap a la separació de sexes. Així, algunes espècies que es comporten funcionalment com a dioiques, poden garantir el seu èxit colonitzador i obtenir un estalvi en la creació d'estructures florals reproductores, tot optimitzant el nombre de peus mascles i femelles presents en un territori. Aquest fet és realment important i destacat en comunitats mediterrànies d'ambients àrids, cas de les timonedes.

Els fruits són generalment poc vistosos, són disseminats pel vent, tenen una disseminació inespecífica o, un cop són al sòl, hi és important la mirmecòria.

Els trets diferencials més importants per a les plantes amb aquesta estratègia es poden observar a la taula III.

TAULA III

<i>Plantes</i>	<i>Tolerants a l'estrès</i>	<i>Competidores</i>
<i>Fulles</i>		
color	verd fosc o glauc	verd franc
tomentositat	freqüent en una o dues cares	absent
<i>Tiges</i>		
tomentositat	freqüent	absent
<i>Flors</i>		
color	groc/blanc/rosat	clars
pol·linitzador	vent/insectes	insectes/vent
<i>Fruits</i>		
color	poc vistosos	colorits
mida	petits	grans
disseminador	inespecífic	endozoocòria
<i>Tipus de reproducció</i>	granes/vegetativa	vegetativa/granes
<i>Proporció estructures reproductores/vegetatives</i>	< 1	> 1
<i>Anys de vida de la planta</i>	> 20	> 10 < 40 (60)
<i>Tolerància a l'estrès</i>	molt gran	molt baixa

6.4. LES PLANTES COMPETIDORES

Dins d'aquesta estratègia dominen les plantes que no han de fer front ni a les condicions adverses ni a cap limitació al llarg del seu cicle vital per estrès o per destrucció de biomassa formada. Generalment són plantes esponeroses i de gran talla, amb fulles i tiges de color verd franc i verd fosc. Són rars els pèls de qualsevol tipus. Excepcionalment poden existir algunes espècies amb pèls pluricel·lulars o pèls glandulosos en aquest grup.

Molts cops en aquest grup és molt important la reproducció vegetativa tant o més que la sexual. Són plantes dotades de grans rizomes o amb tiges aèries que arrelen amb facilitat.

Els fruits, generalment grans i vistosos, són disseminats mitjançant animals, freqüentment per endozoocòria.

Els trets diferencials més importants per a les plantes amb aquesta estratègia es poden observar a la taula III.

6.5. LA FORMA I EL COLOR DE LES GRANES

Entre les plantes que disseminen com a propàguls bàsicament les granes, en lloc dels fruits, destaquen el grup de les espècies vegetals amb estratègia oportunista i nombroses espècies de plantes tolerants a l'estrès.

Entre les oportunistes tenim les anuals, plantes de creixement ràpid i amb dominància de flors de color clars. Les crucíferes i les cariofil·làcies en són una bona representació, amb predomini de flors de color blanc, groc o crema que formen granes nombroses, quasi esfèriques, molt sovint llises, petites i de colors foscos o més rarament clars. En gran part s'inclouen en el banc de granes del sòl. Si no són perfectament esfèriques, la seva capacitat de penetració al sòl és menor; probablement les de colors clars tenen una vida més curta. En conjunt aquest tipus de granes tenen una disseminació inespecífica i la seva estratègia és més perpetuar-se *in situ* que colonitzar nous hàbitats.

Però no totes les anuals presenten aquestes característiques. D'altres estan provistes de gloquidis, protuberàncies que afavoreixen l'enterrament i que les granes quedin travades al sòl. Algunes presenten mecanismes per ésser portades lluny dels progenitors; aquest es el cas de les anuals amb granes quadrangulars i amb el marge més o menys alat. Aquestes granes són de color groc marro-nós, no negres.

En les gramínies les granes són de colors clars (marró blanquinós o groc blanquinós). Els apèndixs i els colors clars, que possiblement atrauen les formigues, n'afavoreixen la disseminació. Són granes voluminoses amb apèndixs nombrosos. Hom pot correlacionar l'increment de la superfície de les granes amb colors clars i disseminació pel vent.

Entre les plantes tolerants a l'estrès són freqüents les plantes amb disseminació inespecífica, mecànica o anemocòrica.

Entre les competidores i les competidores tolerants a l'estrès es troben les plantes amb fruits més vistosos, les plantes disseminades per zoocòria i, encara en nombre més gran, les que presenten endozoocòria.

6.6. EL COLOR I LA FORMA DELS FRUITS

El color dels fruits, la seva forma, fenologia i valors nutricionals són trets funcionals importants per conèixer la biologia de les plantes que els generen. Els vertebrats, que se'n nodreixen o els recol·lecten, tenen un paper important en la seva disseminació i entre els reclams més importants per atreure els disseminadors destaquen la seva forma i el seu color.

En les àrees més meridionals ibèriques s'han estudiat les característiques de nombroses espècies amb fruits disseminats per vertebrats (Herrera, 1984) i la correlació entre àrees de distribució de plantes i les de les aus disseminadores dels fruits (Jordano, 1900).

Per veure la importància del color s'han estudiat les estratègies de disseminació de les plantes ornitòcores en les diferents comunitats vegetals on són presents aquests fruits. Per una banda, tres comunitats forestals mediterrànies: alzinar, carrascar i sureda, i per una altra, tres comunitats forestals arbustives també mediterrànies: dos tipus de màquia i una garriga. S'han reconegut les estratègies de disseminació de les espècies que presenten endozoocòria, característica lligada a fruits vistosos, i alhora el seu període de fructificació per esbrinar possibles correlacions amb el pas de les aus migratòries.

6.7. ENDOZOOCÒRIA I COLOR DELS FRUITS

La presència de fruits vistosos és un tret funcional lligat a la zoo-còria. Si a més tenen polpa i són carnosos, sabem que tenen una disseminació endozoòcora i quasi segurament una disseminació ornitòcora per endozoocòria. Però, quines són les síndromes dels fruits disseminats per aus? En primer lloc, el color dels fruits és un reclam per a les aus disseminadores. Existeix una forta correlació entre ornitocòria i fruits de colors vistosos. Els fruits que presenten característiques bicolors constitueixen un reclam especialment atractiu. Aquests últims queden definits d'acord amb Willson i Thompson (1982): presenten fruits madurs que contrasten marcadament amb els fruits premadurs, o posseeixen algunes estructures accessòries (calze, pedicels, etc.) de color vistós que destaquen de la resta de la planta i fan ressaltar els fruits. Un altre bloc de síndromes és posseir una part comestible atractiva i, alhora, una protecció

El color de les plantes des de la perspectiva de l'ecologia comparada contra un consum prematur (color verd, gust àcid); presentar una protecció interna de les granes al trànsit pel tub digestiu. A més, no fan olor i romanen a la planta bastant temps.

6.8. EL COLOR DELS FRUITS AL BOSC MEDITERRANI DENS

A l'alzinar i entre els nanofaneròfits, dominen els fruits de color vermell, seguits de prop pels de color negre i taronja. En canvi, entre els camèfits dominen els fruits de color negre, seguits de prop pels de color vermell. En l'estrat herbaci solament estan representats els fruits d'aquest últim color.

Quelcom semblant es troba al carrascar, on hi ha més fruits vermells que negres entre els nanofaneròfits, però aquesta diferència s'escurça entre els camèfits, ja que existeixen tantes espècies amb fruits vermells com negres. En la sureda, que és un tipus de bosc força esclarissat, existeixen tants nanofaneròfits de fruits vermells com de negres; en canvi, entre els camèfits abunden més els fruits negres que els vermells.

TAULA IV

<i>Arbres</i>	<i>TV</i>	<i>Color</i>	<i>Bic.</i>	<i>Fruc.</i>	<i>Com.</i>
Arbres					
<i>Sorbus domestica</i>	Ph	marró	+	IX-X	1, 2, 3
Arbustos					
<i>Asparagus acutifolius</i>	Ch	vermell	·	VIII-X	1, 2, 3
<i>Arbutus unedo</i>	NPh	vermell	+	IX-XI	1, 3
<i>Coriaria myrtifolia</i>	NPh	negre	+	VI-VIII	1, 3
<i>Cornus sanguinea</i>	NPh	negre	+	IX-XI	1, 2, 3
<i>Crataegus monogyna</i>	NPh	vermell	·	IX-X	1, 2, 3
<i>Daphne gnidium</i>	Ch	vermell	·	IX-XI	1, 2
<i>Daphne laureola</i>	Ch	negre	·	IX-X	1
<i>Fragaria vesca</i>	Hm	vermell	·	VI-VII	1, 3
<i>Osyris alba</i>	Ch	negre	·	IX-XI	1, 3
<i>Pistacia lentiscus</i>	NPh	vermell	+	IX-XI	2
<i>Pistacia terebinthus</i>	NPh	vermell	+	IX-XI	2
<i>Phillyrea latifolia</i>	NPh	negre	+	VI-VIII	1, 3
<i>Prunus spinosa</i>	Ch	blau	·	X-XI	2
<i>Rhamnus alaternus</i>	NPh	negre	+	VI-VIII	1, 3

Llum i color

<i>Rosa sempervirens</i>	NPh	vermell	·	IX-XI	1, 3
<i>Rubia peregrina</i>	CH	negre	+	IX-XII	1, 2, 3
<i>Ruscus aculeatus</i>	Ch	vermell	·	XI-XII	1, 2
<i>Tamus communis</i>	G	vermell	·	XI-XII	1
<i>Viburnum tinus</i>	NPh	blau	·	IV-VI	1, 2
Lianes					
<i>Lonicera etrusca</i>	PhS	taronja	·	VIII-IX	1, 2
<i>Lonicera implexa</i>	PhS	taronja	·	IX-XI	1,3
<i>Smilax aspera</i>	PhS	vermell	+	X-XI	1, 2

Espècies disseminades per endozoocòria a l'alzinar mediterrani litoral: bosc de *Quercus ilex* (1); al carrascar continental: bosc de *Quercus ballota* (2), i a la sureda: bosc de *Quercus suber* (3).

Significat de les abreviacions: TV = tipus vital; Color = color dels fruits; Bic. = fruits bicolors; Fruc. = Fructificació; Com. = Comunitat vegetal.

Total d'espècies estudiades: vint-i-tres, i el nombre d'espècies en cadascuna de les comunitats que presenta endozoocòria és de: 23-13-12. El nombre total de fruits bicolors és de deu, i es reparteixen entre les tres comunitats: 8-7-6.

Presència total del caràcter *color dels fruits* és: vermell, onze espècies; negre, sis espècies; negre blavís, dues espècies; taronja, dues espècies, i marró, una espècie. Els tipus vitals presents als boscos són: deu NPh (nanofaneròfits), tres PhS (faneròfits escandents), set Ch (camèfits), un G (geòfit), in Ph (faneròfit) i un Ch (camèfit), descrits d'acord amb Orshan (1988).

6.9. EL COLOR DELS FRUITS A LA MÀQUIA I ALS MATOLLARS ALTS

L'estudi de les espècies més comunes dels matollars mediterranis ens aporta dades de gran interès per conèixer el funcionalisme de les plantes que en formen part. La taula V ens dona informació sobre atributs funcionals lligats a la reproducció, entre els quals destaca el del color.

El color de les plantes des de la perspectiva de l'ecologia comparada

TAULA V

Arbres	TV	Color	Bic.	Fruc.	Com.
<i>Chamaerops humilis</i>	Ph	marró	·	VIII-X	1,3
<i>Olea europaea</i> var. <i>sylvestris</i>	Ph	negre	·	IX-XI	1,3
Arbustos					
<i>Asparagus acutifolius</i>	Ch	vermell	·	VIII-X	1
<i>Asparagus horridus</i>	Ch	negre	·	VII-IX	1
<i>Cneorum tricocum</i>	Nph	vermell	·	IX-X	1
<i>Daphne gnidium</i>	Ch	vermell	·	IX-X	1, 2, 3
<i>Juniperus oxycedrus</i>	Nph	marró	·	X-XI	1, 2, 3
<i>Juniperus phoenicea</i>	Nph	marró	·	VIII-X	1, 2, 3
<i>Myrtus communis</i>	NPh	negre	+	X-XI	1
<i>Pistacia lentiscus</i>	NPh	vermell	+	IX-XI	1, 2
<i>Phillyrea latifolia</i>	NPh	negre	+	VII-IX	1, 2, 3
<i>Rhamnus alaternus</i>	NPh	negre	+	V-VII	1, 2, 3
<i>Rhamnus lycioides</i>	NPh	negre	+	VII-IX	1, 2, 3
Lianes					
<i>Lonicera implexa</i>	PhS	taronja	·	IX-XI	1
<i>Rubia peregrina</i>	Ch	negre	·	IX-XI	1
<i>Smilax aspera</i>	PhS	vermell	+	X-XI	1

Espècies disseminades per endozoocòria en diferents tipus de matollar alt o màquies del nord-est ibèric.

1. Màquia de lentiscle *Pistacia lentiscus* i ullastre *Olea sylvestris*.
2. Màquia continental de coscoll *Quercus coccifera* i arç negre *Rhamnus lycioides*.
3. Coscollada o garriga litoral *Quercus coccifera*.

Significat de les abreviacions: TV = tipus vital; Color = color dels fruits; Bic. = fruits bicolors; Fruc. = Fructificació; Com. = Comunitat vegetal.

Total d'espècies estudiades: setze. Espècies amb aquest atribut (endozoocòria) presents a cada comunitat: 16-7-8. Total d'espècies amb fruits bicolors: sis. Espècies amb aquest atribut presents en cada comunitat: 6-4-3.

Els tipus vitals presents als boscos són: vuit NPh (nanofaneròfits), dos PhS (faneròfits escandents), quatre Ch (camèfits) i dos Ph (faneròfits).

En la màquia litoral predominen els fruits de colors foscos, concretament els de color negre, seguits de lluny pels de color vermell. El mateix succeeix en les màquies continentals i en els coscollars, on també dominen fruits de color negre; en canvi, són testimonials els representants de color vermell. En els tres tipus

Llum i color

de matollars, altres colors, i especialment el marró, són ben representats.

En la màquia litoral els fruits de color negre abunden entre els nanofaneròfits; en canvi, entre els camèfits dominen les plantes amb fruits vermells. Destaca la presència d'un grup d'espècies amb els fruits d'altres colors, bàsicament marrons i representades per nanofaneròfits.

El període de maduració dels fruits dels nanofaneròfits és anterior al dels faneròfits. En canvi, en les lianes o en els nanofaneròfits escandents aquest període s'allarga fins ben entrat l'hivern.

L'endozoocòria no es troba representada entre les plantes herbàcies de la màquia. Per altra banda l'endozoocòria és inexistent en comunitats arbustives baixes, cas de brolles i tomillars.

Cal remarcar alguns trets diferencials propis dels matollars densos mediterranis: destaquen els llargs períodes de maduració dels fruits en gran part de les espècies; poden transcórrer de cinc a nou mesos entre el final de la floració i l'època en què els fruits són madurs; domini dels colors vius: vermell, negre i marró. Hi dominen els fruits disseminats per endozoocòria com ja va comprovar Herrera (1986).

6.10. SIGNIFICAT FUNCIONAL DELS COLORS DELS FRUITS

Els fruits de colors vius (vermell o taronja) són més abundants en l'ambient nemoral mediterrani que en els matollars baixos de degradació i concretament en els de caràcter continental. A més de ser-hi presents en les zones forestals, són freqüents en màquies, matollars alts i vores arbustives de caràcter nemoral. En canvi, els fruits de colors foscos són més propis i abundants en matollars oberts i en comunitats no forestals. Les taules VI i VII sintetitzen les dades obtingudes.

Els fruits bicolors són lleugerament més freqüents en ambients nemorals, malgrat que hi són presents en ambients de màquies.

El color de les plantes des de la perspectiva de l'ecologia comparada

TAULA VI

Color dels fruits de les plantes disseminades per endozoocòria a les comunitats estudiades

Color	I	II	III	IV	V	VI
Negre	8	4	6	7	3	4
Vermell	10	7	6	5	1	1
Bicolor	8	7	6	6	4	3
Taronja	2	1	1	1	.	.
Blau	1	.	.	.	.	.
Altres	1	1	1	3	2	3

1. Alzinar litoral, bosc de *Quercus ilex*.
2. Carrascar continental, bosc de *Quercus ballota*.
3. Sureda, bosc de *Quercus suber*.
4. Màquia de lentiscle *Pistacia lentiscus* i ullastre *Olea sylvestris*.
5. Màquia continental de coscoll *Quercus coccifera* i arç negre *Rhamnus lycioides*.
6. Coscollada o garriga litoral *Quercus coccifera*.

El nombre més elevat de fruits vistosos es troba entre els faneròfits, seguits molt de lluny pels camèfits. La presència d'endozoocòria entre hemicriptòfits i geòfits és testimonial.

TAULA VII

Nombre de plantes disseminades per endozoocòria a les comunitats estudiades, color dels seus fruits i tipus vitals a què pertanyen

Color	I	II	III	IV	V	VI
	NP/Ch/ Hm/G	NP/Ch/ Hm/G	NP/Ch/ Hm/G	NP/Ch/ Hm/G	NP/Ch/ Hm/G	NP/Ch/ Hm/G
Negre	4/4	1/3	4/2	5/2	3	4
Vermell	6/3/1/1	4/3	4/1/1	3/3	0/1	0/1
Bicolor	7/1	5/1	6/1	6	4	3
Taronja	2	1	1	1	.	.
Blau	1	1	.	.	.	.
Altres	1	1	1	3	2	3

1. Alzinar litoral, bosc de *Quercus ilex*.
2. Carrascar continental, bosc de *Quercus ballota*.
3. Sureda, bosc de *Quercus suber*.
4. Màquia de lentiscle *Pistacia lentiscus* i ullastre *Olea sylvestris*.
5. Màquia continental de coscoll *Quercus coccifera* i arç negre *Rhamnus lycioides*.
6. Coscollada o garriga litoral *Quercus coccifera*.

6.11. CONCLUSIONS

L'estudi dels atributs de les plantes, com és el cas del color, ens dóna una informació útil sobre el funcionalisme de les plantes. La forma, el pes i en menor grau el color condicionen el reservori de les granes, que constitueix els bancs de granes del sòl.

Determinades famílies, aquest és el cas de les cariofilàcees i de les crucíferes, tenen nombroses espècies que formen part dels bancs de granes. Són generalment espècies anuals de creixement ràpid i estratègia bàsica oportunista o ruderal.

Als boscos densos mediterranis les espècies endozoòcores són més nombroses que en les màquies i en els matollars alts. El major nombre d'espècies amb endozoocòria es troba a l'alzinar litoral, seguit molt de prop per la màquia litoral i la sureda. El carrascar presenta ja un nombre reduït d'espècies amb endozoocòria, que disminueixen notablement a la garriga i al matollar continental d'arç negre. Aquesta última comunitat sembla marcar la inflexió d'espècies amb endozoocòria, que desapareixen en matollars baixos i en comunitats herbàcies.

D'entre els matollars, és a la màquia litoral on es troben el major nombre de plantes amb endozoocòria. Aquesta riquesa es redueix dràsticament si se la compara amb la màquia continental, especialment pobra en espècies amb endozoocòria.

L'endozoocòria és un tret funcional ben representat entre les espècies competidores o competidores tolerants a l'estrès, i és inexistent entre les plantes oportunistes o les plantes estrictament tolerants a l'estrès.

Als boscos mediterranis i a les màquies les èpoques de màxima fructificació es concentren a la tardor i a l'hivern. En aquests ambients són rares les espècies amb fructificació a l'estiu o a la primavera. L'època de màxima fructificació es correspon amb la de pas de les aus migratòries cap al sud i amb l'arribada d'algunes espècies que hivernen als territoris de la regió mediterrània.

BIBLIOGRAFIA

- DAFNI, A. (1986). *The Mediterranean Maquia as a pollination Environment*. Istanbul: 5th Optima meeting.
- DUARTE, C. M; SAND-JENSEN, K. [et al.] (1995). «Comparative

- El color de les plantes des de la perspectiva de l'ecologia comparada functional plant ecology: rational and potenciales». *Trend in Ecology and Evolution*, 10, p. 418-421.
- ELLENBERG, H.; MUELLER-DOMBOIS, D. (1967). «A key to Raunkiaer's life forms with revised subdivisions». *Ber. Geobotan. Inst. Eidg. Tech. Hochschule Stiftung Rübel*, 37, p. 56-73.
- GRIME, J. P. HODGSON, J. G.; HUNT, R. (1990). *The Abridge Comparative Plant Ecology*. Londres: Unwin Hyman.
- HERRERA, C. M. (1984). «A study of avian frugivores, bird-dispersed plants». *Ecological Monography*, 54 (1), p.1-23.
- NAKANISHI, H. (1996). «Fruit color and fruit size of bird disseminated plants in Japan». *Vegetatio*, 123, p. 207-218.
- NUET, J.; PANAREDA, J. M.; ROMO, A. M. (1991). *La vegetació de Catalunya*. Eumo: Vic.
- PIJL, L. van der (1982). *Principles of dispersal in higher plants*. Berlín; Heidelberg: Springer-Verlag.
- ORSHAN, G. (1988). *Plant Pheno-morphological Studies in Mediterranean Type Ecosystems: Geobotany*, 12. Dordrecht: Kluwer Academic.
- ROMO, A. M. (1991). *La vegetació dels voltants de Badalona*. Badalona: Escola de la Natura Angeleta Ferrer.
- (1993) «Perspectives sobre els estudis de l'estructura i el funcionalisme de les comunitats vegetals mediterrànies». A: *Terra i sòl*. Barcelona: IEC. (Monografies de la Secció de Ciències, 9), p. 139-160.
- (1997) «Fronteres de l'ecologia comparada de les plantes». A: *Fronteres de la ciència*. Barcelona: IEC. (Monografies de la Secció de Ciències, 14), p. 91-106
- SPECHT, R. L. (1989). «Mediterranean type ecosystems, a data source book. Tasks for vegetation» *Science*, 19.
- WILSON, A. D.; HODGKINSON, K.C.; NOBLE, J. C. (1988). «Vegetation attributes and their application to the management of Australian rangelands». A: TUELLER, P. T. *Vegetation science applications for rangeland analysis and management*. Dordrecht: Kluwer Academic Plub.
- WILLSON, M. F.; THOMPSON J. N. (1982). «Phenology and ecology of color in bird-dispersed fruits or why some fruits are red when they are 'green'». *Can. J. Bot.*, 60, p. 701-713.
- WILMANN, O. (1999). «Vegetationsfarbe». *Ber. D. Reinh.-Tüxen-Ges.*, 11, p. 367-387.

7. INVESTIGACIÓ DE LES PINTURES MURALS ROMÀNIQUES A CATALUNYA

Manuel Font i Altaba* i Antoni Morer Munt**

L'art romànic ha experimentat, en la seva valoració, un gran auge en els últims anys i, especialment a Catalunya, aquesta manifestació artística és contemporània al naixement de la pròpia nacionalitat. Això fa que en el Museu Nacional d'Art de Catalunya (MNAC) es conservi un dels conjunts més importants de l'Europa occidental: el Pantocràtor, pintura mural de l'església de Sant Climent de Taüll, l'obra més important d'aquest art mural.

Aquest creixent interès es reflecteix en la proliferació d'un gran nombre d'estudis basats, principalment, en la iconografia i en l'estil dels autors, però s'ha prescindit d'investigar els materials pictòrics emprats. La part material de les obres pictòriques té unes propietats físiques i químiques que són les responsables de la qualitat cromàtica, de l'estat de conservació, en una paraula, de transmetre amb fidelitat el missatge de l'artista. La tècnica i l'art s'han d'adjuntar per establir una «diagnosi artística» correcta dels objectes artístics i de l'estat actual de les obres i resoldre, en col·laboració, problemes d'identificació, correlació, datació, etc.

7.1. TÈCNIQUES FÍSICOQUÍMIQUES D'EXAMEN D'UNA PINTURA MURAL

L'actuació sobre una obra d'art, tant per a la seva conservació com restauració, pot ser un problema greu si es desconeixen els

* Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona.

** Museu Nacional d'Art de Catalunya. Barcelona.

materials que s'han utilitzat per obtenir-la; hi ha una sèrie d'assais específics externs, «no destructius», que eliminen possibles errors i limiten les interpretacions subjectives. Les tècniques que s'adapten millor a aquestes característiques i que proporcionen millor informació són les observacions de l'obra sota radiacions ultraviolades, infraroges o per mitjà dels raigs X.

Les radiacions ultraviolades produeixen fosforescència a certes substàncies, cosa que permet reconèixer-les en les zones superficials de l'obra estudiada, diferenciar les capes de vernís i localitzar possibles restauracions.

Amb les radiacions infraroges és possible observar fotogràficament els estrats que segueixen la capa superficial, o sigui, els esbossos originals, en diferenciar les parts més opaques properes a la superfície pictòrica. La reflectografia infraroja visualitza directament en la pantalla d'un monitor imatges no visibles a la simple observació ocular, tècnica que permet veure-les en un examen visual. Per mitjà d'aquesta tècnica s'han pogut identificar i desxifrar signatures d'inscripcions cobertes per vernissos successius, de vegades de color, i apreciar l'amplitud de certes restauracions. Algunes vegades dona una idea de l'estructura estratigràfica de la secció transversal i mostra l'esbós primitiu, a voltes rectificat, de la pintura que es veu amb llum visible.

L'observació de la pintura per raigs X proporciona, gràcies al seu poder de penetració en el medi material, l'estructura de l'obra des de la superfície pictòrica fins a la capa més profunda de preparació o del mateix suport, i permet caracteritzar diferents tipus de pigments pel grau d'absorció a les radiacions X dels elements atòmics que la componen. Els compostos de plom es diferencien d'altres compostos que contenen elements menys absorbents per aquestes radiacions, o de substàncies orgàniques (formades normalment per carboni, oxigen i nitrogen), per les imatges més o menys contrastades que s'observen. També es poden veure rectificacions successives de l'esbós primitiu. En alguns casos s'ha pogut observar la presència d'un «tema» diferent a sota del que es veu actualment, ja sigui del mateix autor o d'autor diferent. La qualitat de les radiografies depèn de paràmetres que permeten contrastos més definits tals com tensió, intensitat i temps d'exposició.

Aquests mètodes són senzills d'aplicar i ràpids, però els seus resultats s'han d'interpretar correctament ja que poden induir a conclusions falses. Per tant, és necessari contrastar els resultats amb els professionals que tenen experiència en la diagnosi artística.

Per a la recerca de les obres d'art es fa imprescindible, avui en dia, ampliar el camp de la metodologia històrica i estilística amb altres tècniques i mètodes paral·lels que portin nous coneixements sobre materials i tècniques pictòriques usats pels artistes. Si considerem que una obra d'art és un fet material, l'aplicació de tècniques instrumentals que identifiquin aquesta realitat «sensible», ajudarà a comprendre-la millor. Fins avui l'aplicació en l'àmbit artístic és molt deficitària i centrada preferentment en l'àrea de l'arqueologia. El difícil accés a aquestes tècniques instrumentals molt sofisticades i l'escassetat de recursos econòmics han originat aquest retard.

Actualment, es disposa d'una alta gamma de tècniques que *a priori* podrien aplicar-se per aconseguir aquest objectiu. En els últims trenta anys s'han desenvolupat tècniques que permeten l'anàlisi elemental i de composició dels materials pictòrics i, en determinades condicions, és possible establir estimacions semiquantitatives de les mostres. Ara bé, en aquest tipus d'inspeccions, les tècniques instrumentals usades estan condicionades per les característiques de les mostres. En tractar-se d'obres d'art, la quantitat de mostra que es pot obtenir és molt reduïda, de l'ordre d'alguns mil·ligrams. Per la mateixa raó el camí analític escollit es fonamenta en la no destrucció dels compostos que integren la capa pictòrica i la de preparació, ja que no és viable l'extracció de diverses mostres del mateix pigment i, per consegüent, tots els assaigs s'han de portar a terme amb una mostra única. En conseqüència, alguna d'aquestes tècniques s'adeqüen millor que d'altres per a l'obtenció dels resultats perseguits.

La metodologia seleccionada per portar a terme tots els assaigs implica dues parts ben diferenciades: estudi de la superfície de les pintures i anàlisi de la secció transversal de les mostres.

Fluorescència i difracció de raigs X, junt amb l'observació per microscòpia òptica de reflexió en camp fosc són les tècniques més útils per a la recerca de la superfície pictòrica. La fluorescència de raigs X es una tècnica d'anàlisi químic elemental. Un flux de raigs X de longitud d'ona baixa (generalment en ànode de rodi) incideix sobre la mostra i excita els àtoms del material, cosa que produeix l'emissió de radiació X característica de cada un; aquestes radiacions es difracten segons la llei de Bragg per un cristall analitzador d'espaiat conegut i són recollides per un detector de raigs X que fixa la longitud d'ona en què emeten, cosa que permet la seva identificació.

La difracció de raigs X consisteix a obtenir l'espectre de difracció dels compostos de la mostra, efectuar l'anàlisi del feix difractat i calcular els seus angles de difracció (lleï de Bragg, $2d\sin\theta = n\lambda$); comparant els resultats obtinguts amb les fitxes del *Powder Diffraction File* és possible identificar els compostos de la mostra. Quant els pigments són fases inorgàniques i tenen com a característica essencial la disposició ordenada dels seus àtoms en una estructura cristal·lina particular, aquesta tècnica és la més adequada com a instrument analític de gran utilitat.

La microscòpia òptica amb llum reflectida en camp fosc permet observar amb detall la superfície i les característiques físiques del pigment, granulometria, adherència, densitat, morfologia, impureses, junt amb les característiques cromàtiques i la seva deposició sobre la capa de preparació.

La propietat essencial de tots aquests assaigs és que les mostres no precisen preparació prèvia ni sofreixen alteració de cap tipus.

Un cop realitzades les proves anteriors, les mostres s'inclouen en un suport de resina sintètica que polimeritza en fred, amb la qual cosa s'eviten els canvis bruscos i les deformacions plàstiques, i d'aquesta manera es poden manipular les mostres per a l'estudi de la seva secció transversal.

En aquesta fase de la investigació la microscòpia òptica amb llum reflectida en camp fosc dona informació de l'estratigrafia, nombre i espessor de les capes pictòriques i de preparació, uniformitat i regularitat dels estrats, així com de les característiques òptiques i cromàtiques dels materials utilitzats. Tot això permet deduir la tècnica pictòrica usada per cada artista i establir, si cal, estudis comparatius entre ells.

La microscòpia electrònica de rastreig, utilitzada en molts camps científics, permet veure superfícies no prèviament manipulades a grans augments. En certa manera és complementària de la microscòpia òptica, ja que aquesta última presenta dificultats d'observació per sobre de 500 augments, a causa de la limitació de la profunditat de camp, cosa que no permet veure amb detall superfícies sense polir. L'assaig consisteix a bombardejar al buit la mostra amb un feix d'electrons; la superfície excitada genera una sèrie d'ones electromagnètiques que produeixen dues imatges: la que correspon als electrons secundaris i la que correspon als electrons retrodispersats. La informació conté la imatge *topogràfica* mitjançant el contrast que presenta el relleu de la mostra, i la de *composició*, que permet veure l'heteroge-

neïtat dels compostos per les diferents tonalitats de gris degudes al nombre atòmic mitjà de cada àrea investigada. Si es té un detector EDXA (*Energy Dispersion X-rays Analysis*) incorporat al sistema, s'analitzen el conjunt de raigs X emesos pels àtoms de la mostra i que en són característics, cosa que dóna la composició elemental de l'àrea que s'està estudiant, ja sigui d'algunes micres quadrades o bé del conjunt. L'anàlisi qualitativa i semiquantitativa permet deduir els compostos existents i situar-los en l'estratigrafia de la mostra.

Un cop seleccionades les condicions energètiques que corresponen a un element químic, es confecciona un mapa de distribució d'aquest element fent un recorregut electrònic per tota la mostra (*mapping*). El resultat és una imatge amb una densitat de punts, en cada àrea, relativa a la concentració de l'element. L'estudi conjunt dels *mapping* dels diferents elements permet observar la coincidència en la distribució d'alguns d'aquests i deduir la composició estratigràfica de la mostra.

Els pigments usats pels autors antics són essencialment inorgànics i en general poc manipulats, motiu pel qual, per reconèixer-los, calen les tècniques descrites.

7.2. PINTURES MURALS ROMÀNQUES ESTUDIADES

Les mostres que es consideren més interessants per a l'estudi dels materials pictòrics d'aquest art s'han tret de dos conjunts de pintures murals romàniques catalanes. Les del primer grup estan localitzades en una reduïda àrea geogràfica de la vall de Boí i corresponen a les esglésies de Sant Joan de Boí, de Santa Maria de Taüll i de Sant Climent de Taüll; les del segon grup, atribuïdes al mestre de Pedret com a únic autor, pertanyen a les esglésies de Sant Pere del Burgall (SP), de Santa Maria d'Àneu (SMA) i de Sant Quirze de Pedret (SQ).

La importància i l'interès que aquestes pintures tenen es deuen al fet que representen diferents estils i èpoques del romànic català, a la seva alta qualitat intrínseca i també a la relació que s'observa amb els corrents internacionals de la pintura d'aquella època.

En escollir les mostres, és important d'assegurar la seva màxima representativitat, motiu pel qual l'extracció fou realitzada amb tota cura després d'un estudi preliminar per evitar els punts de restauració i, per tant, els reintegraments posteriors de les pintures.

7.3. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

7.3.1. *Naturalesa dels pigments*

Color vermell

S'ha determinat que el pigment que correspon al color vermell, en totes les mostres, és l'hematites, excepte en la 411, que és el cinabri.

A les pintures murals l'hematites, Fe_2O_3 , ha estat sempre el pigment vermell. El que han utilitzat aquests mestres es presenta amb un aspecte d'agregats informes i compactes. Els cristalls són petits i dispersos en la càrrega acompanyant. Per això és difícil d'obtenir l'espectre del material per difracció de raigs X. Mitjançant l'anàlisi per SEM s'observa que és format per partícules primàries de forma més o menys arrodonida. És una terra natural que es troba en l'àrea geogràfica d'on són originàries les pintures. És fàcil de triturar i té una gran capacitat de dispersió. L'hematites pot ser hidratada per l'acció meteòrica i dona coloracions vermell-grogenques, com és el cas de la mostra SP1. Les característiques morfològiques indiquen que l'hematites emprada en aquestes mostres té una procedència diversa i fins i tot és possible que el mateix mestre utilitzi pigment vermell diferent, més o menys hidratat.

El cinabri, HgS , emprat pel mestre de Taüll, és de color vermell escarlata i forma cristalls romboèdrics; els grans tenen una mida apreciable. És brillant i molt opac. No es troba a la regió dels Pirineus i, per tant, l'artista el portava amb ell en els seus desplaçaments o bé li era subministrat. Es pot considerar un material «d'importació» que estableix una diferència molt important amb les altres pintures de Taüll i de Boí.

Color ocre

El compost característic que forma el pigment de color ocre de totes les mostres estudiades és un òxid-hidròxid fèrric més o menys hidratat i que varia entre la goethita, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{OH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, i l'hidròxid, $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. La seva composició és comparable, en allò fonamental, a l'hematites del color vermell amb impureses d'alumini i sobretot de sílice. És una matèria terrosa, fàcil de triturar i que pot ser dispersada.

La mida del gra i la seva homogeneïtat varien d'unes mostres a unes altres. En l'observació microscòpica a grans augments, es veu

fibrosa i compacta, amb diferents tonalitats a cada mostra. Aquesta variació de la tonalitat del color és deguda a la quantitat d'aigua que conté el material i, en cert grau, a la forma que adquireixen les partícules quan són triturades. Per tant, la tonalitat final del pigment pot ser un paràmetre indicatiu de la diferent preparació i mòlta del pigment.

Color negre

L'agent pigmentari que van utilitzar els mestres per obtenir el color negre és el carbó. L'element que produeix la coloració negra és el carboni, però els autors utilitzaren la seva forma en la natura, que és el carbó. Per aquest motiu s'ha utilitzat el nom de *carbó* per indicar l'agent pigmentari.

El carbó, a totes les mostres, és d'origen fòssil, ja que s'hi identifiquen traces de ferro i de sofre formant probablement pirites; a la mostra 323 s'hi detecta la presència de fòsfor, que indicaria un origen orgànic. El pigment és format per un gra fi que, pel fet de no estar uniformement distribuït, presenta diversa qualitat cromàtica. Cal destacar, per la densitat òptica, les mostres SP3 i SQ3 i, especialment, la 413.

Color blanc

En l'observació microscòpica de les mostres de color blanc es fa palesa una diferència clara entre la capa pictòrica i la de preparació, encara que l'element característic en tots dos substrats és el calci. Per microscòpia òptica, la superfície pictòrica s'observa més brillant a causa de l'abundància de sílice. La mida del gra a la capa superficial és més fina. L'anàlisi elemental dona una major concentració de sílice i de sofre barrejat amb el pigment. Les característiques morfològiques indiquen una barreja de composts. Per tant, es tracta de calcita i probablement guix, amb una gran proporció de sílice.

Color blau

La caracterització dels pigments de color blau va oferir una certa dificultat. En l'observació per microscòpia òptica i en els assaigs per XRF i EDXA s'observa que als espais de color blau hi havia presència d'Al, Fe, Si i Ca en proporcions relatives tals que, juntament amb la línia de baixa intensitat a 14.3 Å en els diagrames d'XRD, feien suposar, com ja vàrem dir en el treball de 1986, l'existència d'una clorita rica en ferro.

Altres autors van classificar aquest pigment blau com *aerinita*, compost present al Pirineu català i que és pròxim a les clorites riques en ferro. En bibliografia recent, com en els articles d'Azambre i Monchoux, Besteiro, Palet i d'altres, on es descriuen les seves propietats, la composició química i el diagrama de difracció de raigs X, però no se n'estableix l'estructura cristal·lina d'una manera definitiva. En general no es presenta ben definit, sinó sempre barrejat amb altres minerals diversos (zeolites, principalment).

Per aportar dades aclaridores a aquest tema i a fi d'identificar la composició i la procedència del pigment utilitzat en les pintures murals, s'ha dut a terme l'estudi comparatiu entre una mostra del material natural aerinita extret del Pirineu i el pigmenti de les pintures. Les característiques morfològiques i òptiques d'ambdós són semblants i les línies dels diagrames d'XDR del pigment i del material natural són concordants.

Òpticament, tant el pigment de la mostra com el material natural analitzat són de color blau clar, però en les diverses mostres presenten coloracions diverses. La tonalitat depèn de la relació del $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, que en la mateixa aerinita varia d'un dipòsit a un altre. És important de conèixer aquesta relació en els pigments utilitzats, ja que en depèn la intensitat del color. El mètode més adient per comprovar aquesta relació és l'espectroscòpia Mössbauer, que, aplicada al pigment de la mostra 415, ha presentat una mitjana d'1,08, mentre que en el mineral de la conca pirinenca ha estat de 0,67. Per tant, l'autor de la pintura va escollir un producte amb un alt contingut de Fe^{2+} , és a dir, d'alta intensitat de color blau.

L'aerinita és una barreja de minerals de tipus secundari, com ara zeolites i altres filosilicats. La seva existència real com a mineral independent ha estat molt discutida, i fins ara encara no ha estat reconeguda com a «espècie mineral» per l'Associació Internacional de Mineralogia (IMA), tot i que fou descrita a final del segle XIX —els anys 1876 i 1877— per Lasaulx, i a mitjan segle XX per Garrido.

L'atzurita ha estat emprada en les pintures del cercle de Pedret, a les esglésies de Sant Pere del Burgal i Santa Maria d'Àneu. Es diferencia de l'aerinita perquè es presenta en forma radiada i amb brillantor vítria. El mestre no la utilitza per a obtenir la tonalitat verda barrejant-la amb el pigment ocre.

7.3.2. Caracterització dels composts de la capa de preparació

Les pintures murals han estat traspassades i consolidades en la cara posterior, per mitjà de teles de cotó i caseïnat de calci. Per tant, la capa de preparació original ha estat substituïda i només en queden algunes restes distribuïdes de forma heterogènia.

La tècnica anomenada *al fresc* era la més utilitzada a les pintures murals del Pirineu català. Consisteix en l'aplicació dels pigments sobre un substrat de calç humida que, per un procés de carbonatació mitjançant el CO_2 ambiental, els fixa en assecat-se. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reacciona espontàniament amb el CO_2 , que es dissol en la mateixa aigua i forma una dissolució sobresaturada de carbonat que precipita en forma de cristalls. Les substàncies que acompanyen l'òxid de calci es consideren impureses. El material natural escollit per a obtenir la calç apagada que s'utilitzarà per formar la capa de preparació pot ser calcita més o menys pura o bé formacions dolomítiques normals en concentracions carbonatades en la natura. Això explica la presència de Mg, que s'ha identificat a l'interior d'alguna de les mostres.

A pràcticament totes les mostres analitzades, el substrat és format pel caseïnat de calci emprat en el traspàs de les pintures. Aquest compost ha sofert una certa degradació amb el temps. Els mapes de distribució dels elements identifiquen la presència de S distribuït de forma difusa en la capa de preparació d'un bon nombre de mostres. En d'altres s'ha determinat per XRD la presència d'oxalat de calci, en forma de weddellita i whewellita. No hi ha dubte que aquest compost és posterior i d'origen biogènic per l'acció dels fongs en el caseïnat de calci. S'observa que quan augmenta la concentració d'oxalat disminueix la de caseïnat.

7.3.3. Caracterització dels composts acompanyats

El quars és una fase present sempre, tant en la capa pictòrica com en la de preparació. Ho demostra la proporció més alta de Si respecte a Al i K. Una porció del silici està en forma de silicat, tal com s'observa en els *mapping* obtinguts mitjançant TEM, en els quals coincideixen Si, Al i K.

Es confirma també aquest fet en els mapes de distribució dels elements del SEM/EDXA. Aquests silicats poden tenir orígens di-

ferents, entre els quals cal citar impureses pròpies de la calcita original i/o caolinita afegida pels mestres. En aquest últim cas, es barrejava amb el pigment per donar flexibilitat i adherència a l'agent pigmentari sobre la capa de preparació. Això no obstant, no sembla suficientment explicatiu que la sílice o el silicat s'empressin només per a cohesionar el pigment, sinó que es devien utilitzar per aconseguir «porus» dins de la sal de calci, en els quals es pogués fixar millor el pigment.

Els *mapping* mostren la presència de S a la majoria de les mostres. Aquest element es troba en una concentració més gran a la capa pictòrica, però no coincideix amb el pigment ni està associat amb el silicat quan hi és present.

La determinació del compost corresponent i la seva interpretació són un problema difícil de resoldre. Podria tractar-se d'un compost que contribuís a estabilitzar la capa pictòrica, o bé d'una deposició natural provocada pel medi ambiental. La quantitat de SO₂ del medi ciutadà en què s'exposen i emmagatzemen aquestes pintures i l'alt contingut de Ca dels materials pictòrics haurien afavorit la formació del sulfat, que es detecta en unes línies d'intensitat molt feble mitjançant l'XRD.

En tractar dels composts que formen la capa de preparació ja s'ha donat una explicació de la presència difusa de S a l'interior de les mostres. Es tracta de la degradació del caseïnat de calci. Per tant, aquest S té un origen molt diferent del que es troba a la capa superficial de les mostres.

La presència de S, independentment del seu origen, implicà un problema important per a la conservació i la restauració d'aquestes pintures murals. Caldrà un estudi específic que compregui un mostreig més ampli, per trobar solucions idònies.

7.3.4. *Tècniques pictòriques*

Els mestres o autors que van realitzar aquestes pintures murals foren diferents; aquest fet queda plenament corroborat pels diferents materials que empraren i, sobretot, per les diferents tècniques de preparació i d'aplicació dels pigments.

De les pintures de la Vall de Boí sobresurten les atribuïdes al mestre de Taüll. No solament es distingeixen per la naturalesa intrínseca dels pigments, de millor qualitat, sinó també per la tècnica

i les característiques estratigràfiques. La capa pictòrica presenta un gruix molt regular en totes les mostres i, en algunes, hi ha una superposició de diverses capes que li permeten obtenir uns efectes cromàtics molt difícils d'aconseguir amb els pigments de què disposava. Aquest efecte és molt notori; per exemple, en el color blau del Pantocràtor, que és aplicat sobre una capa de color negre per aconseguir les diferents tonalitats. El resultat final de la seva depurada tècnica és la gran riquesa i la qualitat cromàtica aconseguida, que permet, fins i tot a un profà en la matèria, distingir i valorar com a superiors les pintures murals d'aquest gran mestre.

Les pintures del mestre de Boí corresponen a una tècnica més primitiva. Fa un ús abundant de les argiles, especialment la caoliníta, que barreja en més proporció amb el pigment per donar-li una major plasticitat i obtenir una millor fixació en el substrat.

Les pintures de l'església de Santa Maria de Taüll, les de l'absis i les dels murs laterals, pertanyen a dues tècniques i amb tota seguretat a dos mestres. Les atribuïdes al mestre de Santa Maria presenten una qualitat pictòrica superior, especialment per la gamma de pigments utilitzats, encara que no tant per la tècnica de preparació i deposició dels materials en les diferents capes. En efecte, utilitza els colors blau i verd, però el gra és gruixut i heterogeni. La secció transversal de les mostres denota una tècnica de treball inferior si la comparem amb la del mestre de Taüll. Les atribuïdes al mestre del Judici Final presenten una tècnica més avançada però poc depurada. La varietat cromàtica hi és més reduïda i la granulometria varia d'un pigment a l'altre; de vegades és fi i regular, però es presenta també en aglomerats i fases heterogènies.

Les pintures atribuïdes al mestre de Pedret mostren una policromia rica per la gamma de colors i les diferents tonalitats aconseguides. En les pintures de les tres esglésies s'observa un grau de carbonatació superficial força alt. Per això, la intensitat i la densitat òptica és menor i, en una primera impressió visual, no es destaquen per uns colors vius, sinó per una certa monotonia cromàtica. Utilitza de forma selectiva l'atzurita, excepte a l'església de Sant Quirze, però s'ha de tenir en compte que en aquest cas les mostres no són de l'absis central. L'ús restringit de l'atzurita pot tenir una doble raó de ser: per una part, tenia un cost econòmic molt alt i, per una altra, no es troba a la zona pirinenca.

Les pintures de les tres esglésies presenten diferències en la tècnica pictòrica. La secció transversal de les mostres de l'església de

Sant Quirze, observades mitjançant la microscòpia òptica, denota un domini de la tècnica superior a les altres dues. Les capes són regulars i uniformes. El pigment es presenta homogèniament distribuït. Ara bé, les imatges i les dades obtingudes amb la microscòpia electrònica mostren una estreta relació entre totes tres. La superfície pictòrica és prima i regular, però el substrat és format per materials poc preparats i heterogenis.

7.4. CONCLUSIONS

La conclusió general que cal destacar és el caràcter inorgànic de tots els pigments emprats en aquestes pintures murals. Es tracta de materials d'una gran estabilitat, inalterables al medi i a les severes vicissituds climatològiques del seu entorn. Per tant, presenten una gran estabilitat química i tèrmica. Gràcies a aquesta característica, les pintures han resistit, sense cap pèrdua de la seva qualitat cromàtica, durant segles, els traspassos, les consolidacions i els trasllats a altres zones geogràfiques amb característiques climatològiques diferents de les del seu emplaçament originari. Els pigments identificats es mantenen tal com els van aplicar els mestres i a través del seu estudi es fan palesos els coneixements de la primera matèria que tenien els artistes.

La majoria dels pigments identificats són terres naturals que es troben fàcilment en aquesta àrea geogràfica, l'hematites, la goethita i l'aerinita. Ja s'ha indicat que el carboni està en la seva forma natural de carbó, tal com posen de manifest els elements que l'acompanyen i que, al mateix temps, indiquen que el seu origen no és orgànic, excepte en la mostra 323.

Uns altres com el cinabri i l'atzurita no són minerals propis d'aquests paratges, sinó materials que els artistes portaven en els seus desplaçaments o bé que els eren subministrats. Tal com ja s'ha expressat abans, poden considerar-se materials «d'importació», els quals justifiquen la diferent qualitat de les pintures i la categoria dels mestres.

Els artistes empraren aquests pigments sense cap transformació prèvia. Els aplicaren en l'estat natural, tal com van arribar a les seves mans. No tenien la possibilitat d'elaborar composts acolorits; per tant, utilitzaven el pigment natural i, en tot cas, realitzaven un tractament mecànic per obtenir un material pictòric amb una gra-

nolumentria de millors qualitats cromàtiques. Així, doncs, el fet diferencial entre els mestres es detecta en la preparació dels materials, especialment la trituració, a fi d'obtenir un gra petit, més o menys homogeni.

Els mestres de Taüll i de Pedret es destaquen per la gamma cromàtica i per la naturalesa dels pigments utilitzats, el cinabri i l'atzurita. D'altra banda, aquests pigments, que no són propis del Pirineu i que eren emprats per aquests mestres, proporcionen informació de la procedència dels artistes.

El conjunt dels aspectes analitzats permet d'estudiar més detingudament dues qüestions rellevants: la procedència dels mestres i l'atribució del cercle de Pedret a un mateix autor.

La majoria d'historiadors donen per segura la procedència del nord d'Itàlia del mestre de Taüll. Els resultats d'aquesta investigació no afavoreixen pas aquesta suposició. En efecte, utilitza un pigment, el cinabri, originari del centre de la península Ibèrica i que fou utilitzat i comercialitzat pels àrabs. En canvi, no empra l'atzurita per al color blau, sinó que en el seu lloc fa servir l'acrinita. Les referències històriques dels pigments assenyalen que l'atzurita era molt utilitzada pels artistes de l'àrea septentrional d'Itàlia. Cal suposar que, si el mestre de Taüll fos procedent d'aquesta zona, coneixeria les aplicacions d'aquest pigment en les pintures murals i, atesa la gran qualitat cromàtica de l'atzurita i el perfeccionisme demostrat per l'autor, és probable que hagués intentat aconseguir-lo, malgrat el seu alt cost, de la mateixa manera que es procurava el cinabri. Podria establir-se la hipòtesi que el mestre de Taüll, atesa la seva categoria tècnica, conegués la reacció química que, en un medi alcalí, transforma l'atzurita, de color blau, en tenorita, de color negre. Amb tot, aquella reacció no es realitza fàcilment, com ho prova l'existència fins avui dels blaus emprats pel mestre de Pedret. Per tant, és dubtós que aquesta fos la raó per la qual no emprés aquest pigment. Això no obstant, la insistència amb què alguns historiadors defensen la procedència italiana del mestre no permet descartar totalment aquesta hipòtesi.

En relació amb la procedència del mestre de Pedret s'ha de recordar que utilitza l'atzurita per aconseguir alguns efectes cromàtics. Aquest pigment no es troba en la zona del Pirineu. Això fa deduir que el mestre havia conegut l'ús d'aquest pigment en altres indrets, molt probablement al nord d'Itàlia. Es tracta d'un pintor itinerant que, a les pintures del Pirineu, demostra utilitzar mate-

rials de qualitat i ser coneixedor de l'ofici. Segons les justificacions històriques, aquest fet corroboraria el nexa entre aquestes pintures i les de San Pietro al Mont Civate, si s'arribés a demostrar la presència d'atzurita en aquestes últimes i una tècnica pictòrica similar. Es destaca el fet que l'autor no emprés el cinabri, pigment que probablement desconeixia. Per tant, es pot deduir que no procedia del centre peninsular, i això ratifica la possible procedència italiana d'aquest mestre.

El mestre de Boí i el mestre del Judici Final són catalogats com a pintors artesans de menor inspiració artística. En efecte, utilitzen pigments locals i la seva tècnica no és tan acurada. Certament, cal pensar que no eren pintors itinerants, sinó formats en la seva àrea geogràfica i que treballaven en aquesta zona, la qual es destacava en aquell moment per la seva prosperitat econòmica i comercial.

És difícil de corroborar la suposada procedència italiana del mestre de Santa Maria, ja que si bé utilitza una gamma més completa de pigments, aquests són locals i, d'altra banda, no hi ha elements indicatius que permetin d'establir vincles entre la seva tècnica pictòrica i la dels mestres italians o els de Berlanga i Maderuelo.

Una de les qüestions plantejades fa referència a l'atribució a un antic mestre de les pintures de les esglésies de Sant Pere del Bungal, de Santa Maria d'Àneu i de Sant Quirze de Pedret. La naturalesa de tots els pigments utilitzats en les tres esglésies és la mateixa. No s'han pogut establir comparacions relatives al color blau, ja que no se'n troba en l'absidiola lateral de Sant Quirze, d'on s'han extret les mostres (cal recordar que l'absis central no és al Museu Nacional d'Art de Catalunya). Tot i aquesta identitat, la qualitat cromàtica dels pigments emprats en les pintures de l'església de Sant Quirze i la seva preparació és superior a la resta. Per exemple, l'hematites del color vermell de les esglésies de Sant Pere del Bungal (SP1) i de Santa Maria d'Àneu (SMA1) està hidratada i adopta tonalitats groguenques; a més, les diferents trituració i preparació del material es reflecteix en les característiques òptiques, que són superiors a Sant Quirze (SQ1). Aquest fet es fa evident en totes les mostres estudiades. L'estudi de la secció transversal ha posat en relleu que el gruix de la capa pictòrica de les pintures de Sant Quirze és més regular i uniforme que no les altres. La capa de pigment és més compacta i, per tant, la carbonatació del pigment va ser més homogènia. La deposició de l'agent pigmentari sobre la capa de preparació és també més acurada.

Per tant, els resultats de l'anàlisi del material pictòric no permeten d'afirmar amb seguretat que les pintures analitzades pertanyen a un únic autor. Encara que s'utilitzin els mateixos materials, aquests són emprats diferencialment, la qual cosa permet establir dues hipòtesis. Si es pressuposa un únic autor, les diferències de qualitat cromàtica podrien atribuir-se a les condicions de l'àrea geogràfica en què es troba cada església. D'altra banda, la variació de la tècnica pictòrica seria una variable evolutiva del mateix pintor, que en les pintures de Sant Quirze manifestaria la seva plenitud artística. També és possible admetre que diversos autors treballaven en el cercle de Pedret i que les pintures foren realitzades amb una certa interdependència. En tot cas, per aprofundir sobre això, es considera indispensable l'anàlisi dels pigments corresponents a l'absis central de l'església de Sant Quirze de Pedret, que es troba al Museu Episcopal de Solsona, i l'estudi de la resta de pintures murals que també s'atribueix a aquest mestre.

PUBLICACIONS ESPECÍFIQUES SOBRE EL TEMA REALITZADES PELS AUTORS

1. FONT I ALTABA, M.; MARSAL I ASTORT, M.; MORER I MUNT, A.; PLANA I LLEVAT, A.; TRAVERIA CROS, A. «Estudi científic i tècnic de les pintures murals romàniques de la vall de Boí», *Butlletí de les Societats Catalanes de les Ciències*, VII, 1986, p. 295-318. 8 fig.
2. FONT I ALTABA, M.; MORER I MUNT, A.; PLANA I LLEVAT, F.; TRAVERIA I CROS, A. «Pintura mural». *Ciencias, metodología y técnicas aplicadas a la arqueología*. Fundació "la Caixa", 1989, p. 227-246. 6 fig.
3. MORER I MUNT, A. *Mineralogia en materials pictòrics antics*. Memòria Doctoral. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona, 1991.
4. FONT I ALTABA, M.; MORER I MUNT, A. «La materia en la pintura». *Mundo Científico*, 129, 1992, p. 908-919. 19 fig.
5. MORER I MUNT, A.; FONT I ALTABA, M. «Materials pictòrics medievals. Investigació de les pintures murals romàniques a Catalunya». *Butlletí del Museu Nacional d'Art de Catalunya*, I, 1993, p. 71-118. 35 fig. 8 taules.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- AZAMBRE, B.; MONCHOUX, P. «Precisions minéralogiques sur l'aerinite: nouvelle occurrence à Saint Pandelom (Landes, France)». *Bulletin de minéralogie*, 111, 1988, p. 39-47.
- BESTEIRO, J.; LAGO, M.; POCOVÍ, A. «Observaciones sobre una mineralización de aerinita asociadas a rocas ofíticas del pre-Pirineo leridano». *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 5, 1982, p. 43-53.
- BESTEIRO, J.; LAGO, M.; POCOVÍ, A.; BASTIDA, J.; AMIGÓ, J. M.; MOLINER, R. «Nuevos datos mineralógicos sobre un clasificado aluminosilicato "aerinita" y consideraciones sobre su atribución al grupo de las zeolitas». *Acta Geológica Hispánica*, 20, 1985, p. 257-266.
- PALET, A.; PORTA, E.; GUILLAMET, E. «L'aerinita, nou descobriment en els pigments blaus de la pintura mural romànica». *Butlletí. Comitè andorrà de ciències històriques*, 2, 1987, p. 84-91.

8. RADIACIONS: CARCINOGENÈSI PER RADIACIÓ IONITZANT

Alfred Giner-Sorolla*

Un dels avenços amb més repercussió en el camp de l'oncologia durant el segle present ha estat la determinació de la causa del càncer per agents químics, biològics o físics. Els agents químics, bé d'origen endogen, exogen, ambiental o d'estil de vida, són els que causen una major incidència de tumors malignes, seguits per agents biològics (virus) i en últim terme, amb la més baixa proporció d'inducció de càncer, hi figuren els agents físics (radiació ultraviolada, raigs X i γ). Aquesta última font de carcinogènesi fou reconeguda a principi de segle pels seus efectes en la manipulació de raigs X o de materials radioactius. L'interès en l'estudi de la radiació com a causa del càncer fou paral·lela amb la determinació de l'efecte carcinogènic de productes derivats del quitrà de carbó (hidrocarburs policíclics aromàtics) i la descoberta d'una connexió entre càncer i virus en animals d'experimentació i més recentment en l'home.

En la present crònica volem tractar, entre altres temes, de l'efecte carcinogènic de la radiació respecte a la contaminació per radioactivitat. Hom recorda el fet que així com les explosions d'Hiroshima i Nagasaki van sotragar el món, despertant-lo a la realitat del poder destructiu de l'àtom i als efectes carcinogènics i genètics en els supervivents a causa de la intensa radiació que van rebre, els accidents o desastres, respectivament, de Three Mile Island, Txernòbil, i, més recentment, Vandellòs, han fet evident els perills de «l'ús pacífic» de l'energia nuclear.

* College of Medicine. University of South Florida. Tampa. Florida. EUA.

8.1. EFECTES SOMÀTICS I MECANISMES D'ACCIÓ

Existeix la plena evidència avui dia que pràcticament totes les formes de càncer humà poden ésser causades per la radiació ionitzant, com no succeeix en cap altre agent químic i biològic, i que, per tant, és un carcinogen universal.

Així hom compta les distintes formes de leucèmia, limfomes, mieloma múltiple, sarcoma ossi, càncer cutani, pulmonar, de tiroides, mamari, gàstric, tumor de Wilms, de còlon, pàncrees, neuroblastoma, càncer de faringe i cerebral. No vol dir que uns altres tipus de càncer que no figuren en aquesta llista no es puguin causar per radiació. Hi ha una manca de confirmació epidemiològica i experimental per demostrar que la resta dels principals tipus de neoplàsia com ara hematomes, càncer d'ovari i de pròstata poden ésser induïts per la radiació. Sobre la inducció de càncer per radiació, existeix un complet acord entre els professionals i científics; hi ha, però, un debat sobre la dosi i la freqüència de la radiació necessàries per causar càncer en l'home. Si bé la dosificació de radiació en animals d'experimentació es pot realitzar amb més precisió que la corresponent a carcinògens químics, i s'ha determinat el grau d'absorció de la radiació per teixits, cèl·lules, cromosomes, i fins i tot el nivell molecular, manca encara trobar una relació fiable entre l'experimentació animal i els efectes de l'exposició de la radiació en éssers humans. S'han postulat els següents conceptes generals sobre aquesta qüestió:

1. Totes les formes de càncer poden ésser augmentades per la radiació ionitzant i la manera correcta de determinar quantitativament aquest fenomen és en forma de la dosi necessària per doblar la mortalitat espontània de cada tipus de neoplàsia.

2. Totes les formes de càncer mostren dosis de doblatge similars i, així mateix, s'observa quasi la mateixa semblança en l'increment del coeficient d'inducció de càncer i mortalitat per rad (la quantitat d'energia, 100 ergs, impartida a la matèria per la radiació ionitzant).

3. Organismes joves requereixen menys dosi de radiació per incrementar el coeficient de mortalitat que els organismes adults.

Resulta ben deplorable haver d'esperar a resultats d'estudis epidemiològics experimentals que determinin la carcinogenecitat d'un contaminant abans que s'adoptin les mesures per a la prevenció.

Els casos abans mencionats no es poden comparar en magnitud

—i no cal afegir immoralitat— a les dades obtingudes en els anys posteriors als holocausts d'Hiroshima i Nagasaki, pels estudis que s'han seguit fins avui sobre la incidència de càncer i mortalitat en els 100.000 supervivents de les dues explosions. En el futur també es farà un estudi similar tant a la Unió Soviètica com arreu d'Europa sobre l'efecte de l'accident de Txernòbil.

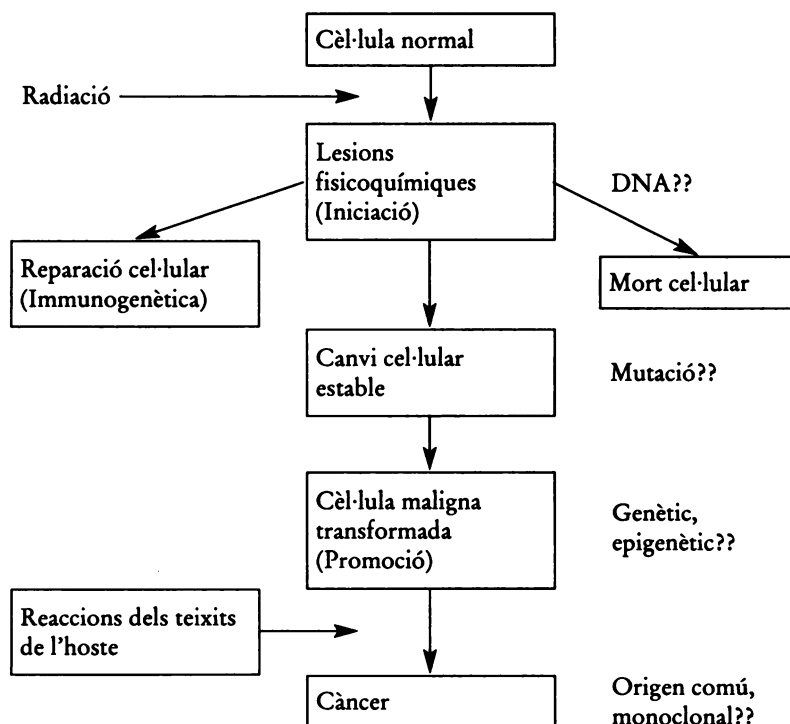
Encara que la majoria de casos de càncer mostren un increment d'incidència amb l'edat, en primer lloc, pel doble efecte de la pèrdua gradual de defenses del sistema immune, conseqüència principalment de la disminució funcional del timus, que posseeix un rol primari en la defensa del cos contra el càncer, i en segon lloc, pel major efecte de l'acumulació i expressió d'activitat carcinogènica latent deguda a l'exposició en edats anteriors a carcinògens; no-gensmenys, existeixen tumors malignes de la infantesa, com ara el tumor de Wilms, neuroblastomes, que poden ésser d'origen radiogènic i que mostren un cim de màxima incidència en els primers deu anys de vida i disminueixen després. Pretendre que dosis molt baixes de contaminació radioactiva no poden tenir efectes nocius és com creure que un verí administrat lentament no causarà cap toxicitat.

Els estadis que són involucrats en el procés de carcinogènesi per radiació ionitzant estan resumits en forma esquemàtica a la taula I. La lesió produïda per la radiació es reflecteix en una possible modificació en l'estructura de macromolècules; si la radiació és de baixa intensitat, hom pot esperar una reparació cel·lular, si bé sobre aquesta qüestió hi ha opinions diverses i oposades. Si la radiació és d'elevada intensitat o d'exposició prolongada a dosis mitjanes, aleshores es produeix la mort cel·lular. Al procés d'iniciació li segueix una lesió cel·lular a la qual probablement va lligada una mutació que és continuada pel procés de promoció en què la cèl·lula es transforma en neoplàsia i dona lloc a la manifestació de càncer amb un probable origen monoclonal i que arribarà a manifestar-se clínicament. En aquest estadi final es produeixen les reaccions d'immunitat humoral i cel·lular, que si bé són de baixa intensitat, no-gensmenys representen l'única defensa natural i la indicació de la presència d'una lesió maligna.

Els efectes que s'han observat tant epidemiològicament com experimental amb dosis creixents, des de les més baixes a les més elevades i letals, estan resumides en la taula II. Els efectes a dosis baixes sense cap manifestació clínica són els que es troben en la

TAULA I

Estadis involucrats en la carcinogènesi per radiació ionitzant



(Modificat de D. T. Goodhead, *Progress in cancer research and therapy*, 26, p. 376, 1983.)

població general, especialment a certes zones de la terra on hi ha una radiació natural elevada. Hom no pot escapar d'una exposició a la radiació ambiental, ja que, tant per la constitució dels minerals de la crosta terràquia que contenen elements radioactius, com per les radiacions còsmiques i la ultraviolada, les radiacions són ubiqües. Així com la presència al cos de potassi-40. Les dosis baixes són les que no arriben a 25 rads; enllà d'aquest nivell fins a 50 rads comencen a aparèixer els primers efectes clínics; si aquest efecte es tradueix en manifestacions a llarg termini, especialment un increment en la incidència de càncer, és un problema que cal resoldre. Dosis moderades, fins a 200 rads, són ja d'efectes més consi-

derables i enllà de la dosi letal més elevada, 600 rads, no hi ha possibilitat de recuperació, amb simptomologia extrema i letalitat en pocs dies.

TAULA II

Efectes de l'exposició total del cos a la radiació (raigs X o γ)

<i>Dosis baixes</i>	
<i>0-25 rads*</i>	<i>50 rads</i>
Sense efectes clínics	Canvis hematològics lleugers i no permanents
Probablement no cap efecte latent	Efectes a llarg termini possibles, si bé poc probables

(*Radiation protection procedures*, 38, Viena: IAEA, 1973, p. 142.)

* Rad = la quantitat d'energia, 100 ergs, impartida a la matèria per la radiació ionitzant.

Els efectes retardats que hom pot esperar d'una exposició elevada breu o una de crònica moderada, bé sia radiació X o γ es mostren en la taula III; dels efectes carcinogènics, els que es manifesten de forma primerenca són els distints tipus de leucèmia, com s'ha observat, entre d'altres, en l'anàlisi epidemiològica dels supervivents de les explosions atòmiques.

TAULA III

Efectes de l'exposició total del cos a la radiació (raigs X o γ)

<i>Dosis semiletals (400 rads)</i>	<i>Dosis letals (600 rads)</i>
Nàusea i vòmit en 1-2 hores. Després d'un període latent d'una setmana: alopecía, anorèxia, fluixesa generalitzada i febre. Inflamació interna de boca i gola durant la 3a setmana. Diarrea, caquèxia considerable a la 4a setmana. Mortalitat en 2-6 setmanes de fins al 50 % de la població afectada	Nàusea i vòmit en 1-2 hores. Diarrea, vòmit, inflamació bucal i de gola en < 1 setmana. Febre, caquèxia i mort dels individus afectats, 100 %, en menys de 2 setmanes.

(«Radiation protection procedures», *Monograph*, 38, Viena: IAEA, 1973, p. 142.)

La incertesa de l'efecte a dosis molt baixes es veurà reflectida en el debat sobre l'accident de Txernòbil; estudis previs efectuats als Estats Units sobre el possible efecte carcinogènic de les diferents fonts de radiació abasten des de la radiació natural, especialment a llocs com Colorado i el sud de França, on hi ha jaciments de minerals radioactius, a usos terapèutics i contaminació pel *fallout* de proves d'armes atòmiques, l'any 1979. Són un total de 10.000 morts per càncer anualment, que, comparats amb els 365.000 de morts per càncer, en representa un 2,7 % (taula IV). Aquesta letalitat deriva de l'exposició als efectes radioactius (dades quantitatives resumides en la taula V), on en faisó paral·lela s'observa com la major exposició a radiació és la natural, seguida per la d'ús terapèutic i la contaminació per les proves d'armes atòmiques. Cal observar que el percentatge atribuït a la radiació per l'ús d'energia nuclear hi és ben reduït; ben diferents són les dades que s'han de descriure sobre l'accident de Txernòbil.

TAULA IV

*Efectes carcinogènics letals a la població dels EUA
(Mortalitat total per càncer: 365.000)*

<i>Origen</i>	<i>Conjunt de mortalitat (núm. de morts)</i>
Radiació natural	5.000
Radiació natural augmentada per la tecnologia	250
Usos terapèutics	4.250
Contaminació per armes atòmiques (<i>fallout</i>)	250-450
Energia nuclear	9
Productes de consum	1,5
Total	10.000 ^A

A. El total representa 2,7 % de la mortalitat anual per càncer. (Dades del Departament de Sanitat, EUA, «Report of the inter-agency Task Force on the health effect of ionizing radiation», 1979.)

Un aspecte que hem observat en relació amb els riscos ambientals és el fet que, abans de difondre's els perills de la radioactivitat arran de les explosions atòmiques i els efectes de la manipulació d'elements radioactius, s'anunciaven aigües minerals, a més de bicarbonatades, alcalines, digestives, etc., també radioactives. Des del començament del segle XX, a causa de la descoberta de les propietats anticanceroses del radi i l'ús que se'n feia per al tractament de

TAULA V

Exposició als efectes de la radiació als Estats Units

<i>Font</i>	<i>Persona-rem- any (10³)</i>	<i>(%)</i>
Radiació natural (raigs còsmics radionucleïds en materials naturals, etc.)	20.000	49,6
Radiació natural augmentada per la tecnologia (mines d'urani, de fosfats, etc.)	1.000	2,5
Ús terapèutic (diagnòstic i tractament, raigs roentgen)	18.000	446
Contaminació per armes atòmiques (<i>fallout</i>)	1.000-1.600	2,5-4,0
Producció i proves d'armes atòmiques	0,165	0,0
Energia nuclear	36	0,1
Productes de consum	6	0,0
Total	40.342	100,0

(Dades del Departament de Sanitat, «Report of the Interagency Task Force on the health effect of ionizing radiation», 1979.)

certs tipus de càncer, se'n va extrapolar l'ús, sense cap fonament científic, i es va aplicar a diverses malalties. I s'anunciaven les aigües minerals dient que contenien «molta radioactivitat», a la qual s'atribuïen meravelloses propietats terapèutiques en un gran nombre d'afeccions: tuberculosi, escròfula, mals de fetge, diabetis, etc. Ara bé, des que s'ha demostrat l'efecte nociu de la radioactivitat, a les etiquetes de les botelles d'aigua mineral no es diu que presenten radioactivitat com ho feien abans, ni en la publicitat es vanten de contenir radioactivitat i de les seves meravelloses propietats curatives. La radioactivitat d'aigües minerals es detallava en les etiquetes de les botelles, on juntament amb l'anàlisi química del contingut en sals minerals (calci, magnesi, sodi, etc.), s'afegien les anàlisis físiques de la radioactivitat, expressada en tants mil·licuries o microcuries per litre i segon d'aigua. Cal demanar-se: què s'ha fet de la radioactivitat que amb tanta insistència s'anunciava abans com a portadora de tants grans beneficis per a la salut?; han desaparegut naturalment o se l'han callat les companyies envasadores d'aigües? Segons opinions d'experts, la radioactivitat de les aigües és molt difícil, sinó impossible, d'eliminar per mètodes fisicoquímics i no

s'ha vist cap indicació que s'hagi realitzat aquesta eliminació, ja que si fos així, de ben segur s'hagués anunciat.¹

El risc d'ingerir aigües contaminades amb elements radioactius va ésser demostrat per les investigacions epidemiològiques d'un grup de científics i metges del Moffitt Cancer Hospital & Research Institut de la Universitat de Florida del Sud, a Tampa, i publicat l'any 1987 a la prestigiosa revista mèdica *Journal of the American Medical Association*. En aquests estudis, després d'un rigorós càlcul estadístic i de comparació, es va determinar que en zones de Florida (el centre de la península) on la població beu aigües que s'extrauen de pous profunds i on hi ha roques de fosfats que contenen elements radioactius (tori, radi, poloni i radó, entre d'altres), es donava una incidència de leucèmia dues vegades i mitja més elevada que a la resta de l'estat de Florida, on es beu aigua superficial de rius i de llacs. Des de l'aparició d'aquesta publicació, s'han pres mesures per limitar l'extracció d'aigües de pous profunds o per abstenir-se d'usar-les i emprar, en el seu lloc, aigües d'origen superficial.

Un altre fet, en el context de la problemàtica de les aigües minerals, que cal considerar, és la retirada del mercat de l'aigua mineral de la marca Perrier, perquè s'hi havia detectat la presència de benzè en quantitats superiors a les considerades tolerables, en diverses partides distribuïdes arreu del món. El benzè és l'únic compost químic que, a més d'ésser tòxic, és carcinogènic; a través dels treballadors que el manipulen s'ha pogut comprovar que causa leucèmia. A la premsa van aparèixer successives explicacions de la casa Perrier un xic confoses i contradictòries pel que fa a les causes de la presència del benzè en l'aigua embotellada. És curiós que la publicitat d'aquesta aigua es feia amb gràfics molt vistosos que es mostraven a revistes, diaris i per tanques d'anuncis a França, on figurava un secció de la terra amb capes geològiques de sediments indicant que l'aigua provenia de llocs ben profunds, i que això representaria una gran puresa. Per cert, la zona de l'aigua de Perrier està situada en una formació geològica considerada una de les més

1. La tolerabilitat de productes carcinogènics és un concepte molt debatut. Teòricament, una sola molècula d'un producte carcinogènic, que representa una quantitat ben ínfima de l'ordre de 10 g, pot iniciar el procés que condueix al càncer. Per tant, es pot afirmar que qualsevol quantitat d'una substància carcinogènica és perillosa; no es pot parlar d'un llindar de seguretat o tolerabilitat d'una dosi determinada d'una substància tòxica o radioactiva.

radioactives d'Europa. En un altre anunci de la mateixa aigua figuren uns dinosaures bevent aigua de pous, amb una llegenda que indicava que bevien l'aigua Perrier, la més primitiva i, per tant, la més pura del món.

Establir una connexió entre una major incidència de leucèmia i la ingestió d'aigües minerals contaminades d'elements radioactius al nostre país, seria ben difícil per la difusió, escampall i variabilitat del consum, a més d'altres factors; els resultats podrien ser conflictius i/o incongruents. És ben diferent la situació en el cas esmentat de Florida central, on la població emprava exclusivament aigua autòctona i a més la investigació epidemiològica va ésser realitzada amb rigorositat extrema, cosa que feia els resultats incontrovertibles. Seria més apropiat realitzar una anàlisi de la radioactivitat de les aigües minerals del país envasades per determinar el possible risc del seu consum. Pel que fa al cas hem iniciat contactes preliminars per explorar en diferents laboratoris tal investigació, que creiem que és d'interès prioritari des del punt de vista de la sanitat pública.

8.2. COMPARACIÓ ENTRE CARCINOGENÈSI PER RADIACIÓ I CARCINOGENÈSI QUÍMICA

A part de les fonts majors naturals esmentades de radiació ionitzants, a partir dels anys quaranta s'han d'afegir les resultants de l'alliberament de l'àtom, que, si bé Rutherford el va iniciar per a la primera transmutació d'elements en elements lleugers, a Cambridge, el 1919, no va ser fins al 1939, a Berlín, quan Hahn, Strassmann i Leitner van aconseguir l'escissió d'un element pesat, l'urani, fonament per a la primera pila atòmica, construïda per Fermi a Chicago (1942), que va donar lloc el 1945 a la primera detonació atòmica a Alamogordo (EUA) i més tard a la destrucció d'Hiroshima i Nagasaki. A partir de l'anomenat *ús pacífic de l'àtom* s'han experimentat altres noves fonts de radiació tant en les centrals nuclears, entre les quals destaquen la de Three Mile Island i la de Txernòbil. Els últims anys s'ha perfilat una nova font de radiació ambiental, el radó, que afecta habitatges als EUA i a Europa. Pel que fa a això cal assenyalar la creixent preocupació per la contaminació causada per aquest element, com s'ha posat de manifest darrerament en els mitjans de comunicació. S'ha explicat que el radó penetra als habitat-

ges mitjançant els materials de construcció. També s'ha dit que arriba fins i tot a les conduccions d'aigua i per aquesta via també s'introdueix a les cases.

Havent-se establert un nexa entre radiació i càncer, paral·lelament al que succeeix amb la carcinogènesi química, s'han tractat de determinar aspectes quantitius dels efectes de la radiació, que se centren a fixar quin seria el llindar «tolerable» de la radiació. Aquesta qüestió indueix a establir, a més, les possibles similituds i diferències que existeixen entre el tipus de carcinogènesi per radiació ionitzant i la produïda per agents químics. Hom pot començar pels paral·lelismes.

1) Tant en un tipus de carcinogènesi com en l'altre, l'exposició per temps més o menys prolongat a l'agent (raigs X o carcinògens químics) indueix al càncer en els diferents òrgans de tots els animals vertebrats i possiblement també en alguns invertebrats superiors.

2) El període de latència tant per manifestar-se els efectes carcinogènics de la radiació com els de substàncies químiques sol ésser molt prolongat, generalment de vint a trenta anys.

3) Tant en un cas com en l'altre, el procés de carcinogènesi implica alguns estadis, generalment un d'iniciació, que és molt ràpid i que consisteix en una alteració de l'estructura de les macromolècules d'informació o enzimàtiques de possible reversió per anticarcinògens, i un altre estadi més prolongat i inaturable de promoció. Cal mencionar, com es detallarà, que existeix un lligam entre els dos tipus de carcinogènesi en el sentit d'ésser la radiació possiblement necessitada de precarcinògens químics per manifestar el seu efecte. Així mateix, molts agents químics carcinogènics actuen de forma similar a la radiació, d'aquí que siguin denominats *radio-mimètics*.

4) No existeix un llindar d'absoluta seguretat per sota del qual, tant una dosi qualsevol per petita que sigui com una sola molècula d'un agent carcinogènic químic, no es pugui desencadenar el procés de neoplàsia.

Quant a les diferències notables entre la carcinogènesi causada per radiació o per agents químics cal citar-ne les següents:

1) Històricament l'origen de la causa de càncer per productes químics o per exposició professional a agents carcinògens químics data del segle XVIII i s'han posat encara més en evidència al segle XIX i en els temps presents. La radiació com a causa de càncer és

un fenomen que, com que anava lligat a la radioactivitat, fins a principis del segle XX no ha estat reconeguda.

2) No existeixen agents eficaços naturals o sintètics amb acció preventiva dels efectes de la radiació, mentre que per l'acció carcinogènica dels agents químics, hom compta amb una varietat de productes alimentaris que poden disminuir la incidència de certs tipus de càncer.

3) La incidència de càncer per causes químiques (estil de vida, nutrició, ambient) és de vint a trenta vegades més gran que la produïda per radiació ionitzant. L'estadi primer de la carcinogènesi tant per radiació com per substàncies químiques (la iniciació) és irreversible i consisteix en una modificació estructural de la molècula del DNA o de certs enzims. És molt prolongat el segon estadi (promoció), en el qual certs agents exògens, com s'ha demostrat experimentalment amb l'oli de cròton, fòrbols o endògens-prolactina, duen a terme la manifestació de la neoplàsia en forma d'una transformació primària, una lesió que va seguida per una progressió quan el nombre de cèl·lules neoplàstiques són en quantitat suficient per ocasionar la franca manifestació clínica. Hom postula que aquest fenomen és l'origen monoclonal, és a dir, únic.

A causa de la semblança entre els dos tipus de carcinogènesi física i química s'ha intentat determinar si existeix un llindar de seguretat, un límit en la dosificació de radiació o una concentració «tolerable» de la presència d'un determinat carcinogen químic a l'ambient. No cal insistir sobre l'interès del tema; ja es va discutir a l'article publicat l'any 1986, «La recerca experimental en física i química aplicada a l'estudi i protecció del medi ambient»; majoritàriament, en un 50 % dels casos, la causa del càncer són els agents químics. Això representa actualment una mortalitat del conjunt de la població en nacions industrialitzades d'un 16 %, o sia, una de cada sis persones moren d'aquesta malaltia. A part d'això, la carcinogènesi química és de més gran abast i la varietat d'agents i el mode d'actuar és ben diferent segons les diverses estructures químiques dels carcinògens.

Es demostra que no poden existir normes fiables amb què hom pugui determinar un llindar de tolerabilitat de la radiació ionitzant, principalment per la variabilitat de criteris depenent de les distintes agències i de les dades diferents. Els efectes de la radiació, a l'igual dels de la carcinogènesi química, solen aparèixer amb períodes de temps variables, que depenen de diversos factors. Els diferents es-

tadis de la iniciació i de la promoció posseeixen distintes cronologies i són afectats per factors intrínsecs (hormonal, mecanismes immunogenètics de defensa) o extrínsecs (presència de carcinògens o de promotors i absència o presència de substàncies quimioprolifàctiques). Hom pot considerar dos tipus de llindars: *a*) absolut o teòric i *b*) relatiu o pràctic. D'entrada s'ha de considerar la dificultat d'acceptar l'existència d'un llindar absolut; igual com en carcinogènesi química, on una sola molècula ($1: 6.06 \times 10$) pot teòricament iniciar el procés neoplàstic, un mínim de radiació, un quàntum, emprant aquesta expressió en el sentit de 'la dosi més reduïda possible de radiació', podria igualment iniciar el procés de transformació maligna. No existeix, per tant, cap límit absolut mínim pel qual la radiació no produeix cap efecte carcinogènic; així ho indica la linealitat de la corba dosi *versus* resposta, que per reduïda que sigui la dosi, sempre hom podrà extrapolar a un efecte.

Si hom no troba cap dissensió sobre la impossibilitat d'atènyer una dosi absoluta mínima tolerable de radiació, no gensmenys es troba una gran varietat de parers respecte a la dosi *pràctica* tolerable que faci «segur» l'ús de radiació en l'ambient, l'ocupació, els accidents nuclears, els diagnòstics i el tractament terapèutic. La constant variació en les dades d'estimació dels efectes suposats «tòxics» de la radiació de les distintes agències als dos costats de l'Atlàntic, indiquen la incertesa d'aquesta determinació quant a les dosis permeses i «acceptables» com a segures.

Resulta inexplicable el fet que hi hagi tanta negligència i manca de percepció entre l'aparició d'un fenomen i l'advertiment dels seus efectes nocius; en carcinogènesi professional es va tardar molts anys abans d'adonar-se que els operaris de mines i de manufactura de l'asbest exposats al seu contacte podien desenvolupar càncer pulmonar. Igualment en el cas de la radiació; si bé des del principi del segle XX es van advertir els efectes tumorigènics dels raigs X del radi, Marie Curie fou un dels casos més notables, ja que, afectada pels seus experiments sobre el radi, sucumbí a la leucèmia. Amb tot, no es va establir un nexa irrefutable entre les distintes formes de radiació i càncer fins als anys vint, quan se'n va observar a Nova Jersey (EUA) en operaris de la indústria rellotgera que pinzellaven esferes de rellotges amb sals de radi per aconseguir lluminositat. Aquests operaris solien llepar el pinzells i com a conseqüència d'això ingerien petites quantitats de sals de radi fins a 1 mg per any. Va notar-se als pocs anys de treball en aquesta indústria

que una elevada proporció dels treballadors mostraven distintes formes de càncer bucal i osteomielitis.

Si hi va haver negligència i retard en observar els efectes de la radiació en general, va ser com a conseqüència de les propietats terapèutiques dels raigs X i del radi, que van emascarar-ne tot efecte nociu. Demostrat aquest efecte, és natural que s'hagin pres les mesures adients; encara així el debat continua sobre les conseqüències a llarg termini de la baixa radiació. Cal afegir el paral·lisme que s'observa entre la radiació ionitzant (en la seva dualitat de carcinogènica i terapèutica) i la que posseeixen la majoria de fàrmacs antineoplàsics usats avui, que són carcinogènics en animals d'experimentació.

ÍNDIX

	Pàg.
Prefaci	7
1. La naturalesa de la llum (<i>Jesús Navarro</i>)	11
2. La percepció del color (<i>Carme Junqué i Plaja i Pere Vendrell i Gómez</i>)	39
3. Semiologia del color (<i>Lluís Prat i Clarós</i>)	57
4. Els colors del cel (<i>David Jou</i>)	67
5. El color a la natura: estratègies dels animals (<i>Albert Masó i Manuel Pijoan</i>)	77
6. El color de les plantes des de la perspectiva de l'ecologia comparada (<i>Àngel Romo</i>)	97
7. Investigació de les pintures murals romàniques a Catalunya (<i>Manuel Font i Altaba i Antoni Morer Munt</i>)	113
8. Radiacions: carcinogènesi per radiació ionitzant (<i>Alfred Giner-Sorolla</i>)	129



**MONOGRAFIES DE LES
SECCIONS DE CIÈNCIES**

- 11. ELS ORÍGENS**
a cura de J. G. Peretó
i S. Alegret
- 12. MODELITZACIÓ
MACROSCÒPICA
EN CIÈNCIES
EXPERIMENTALS**
a cura d'E. Casassas
i M. Esteban
- 13. DEL PLAER DELS SENTITS
AL PLAER DE LES XIFRES**
a cura d'E. Casassas
i R. Tauler
- 14. FRONTERES DE
LA CIÈNCIA**
a cura de S. Alegret
i J. G. Peretó

