

Perché l'autunno si colora di fuoco

La bellezza effimera sfoggiata dalle foglie di molti alberi prima di cadere conserva un alone di mistero che affascina fisiologi vegetali ed evoluzionisti

LARS CHITTKA E THOMAS F. DÖRING

LA MAGGIOR PARTE DELLE COSE VIVENTI non diventano belle invecchiando. Quando non sono più freschi, ad esempio, i fiori diventano grinzosi e laceri, i loro colori sbiadiscono. Le foglie di molte specie arboree temperate, invece, ci stupiscono con veri e propri fuochi artificiali di colori, proprio prima di cadere a terra e decomporsi. Sappiamo che alcuni dei pigmenti responsabili di questa colorazione vengono semplicemente rivelati quando la clorofilla si degrada, mentre altri proteggono le foglie dalle influenze negative che hanno insieme il freddo e la luce intensa. Tuttavia all'inizio del decennio due studi hanno suggerito una spiegazione radicalmente differente: le tinte vivaci dell'autunno potrebbero essere in realtà dei segnali per mettere in guardia gli afidi sulle capacità difensive degli alberi. Questa idea ha acceso un affascinante dibattito tra i fisiologi vegetali – la maggior parte dei quali ritiene che la pigmentazione sia legata ai processi fisiologici che avvengono all'interno delle foglie – e alcuni evoluzionisti teorici che ipotizzano una funzione segnaletica.

I colori, comunque, non sono semplici manifestazioni di fenomeni fisici: sono generati dal cervello degli animali, a seconda del particolare apparato visivo che hanno sviluppato durante la storia evolutiva. I recettori per i colori e il conseguente processamento neuronale negli insetti sono così diversi da quelli umani che ciò che appare brillante a noi può risultare poco appariscente a loro, mentre ciò che può essere repellente per noi potrebbe risultare attraente per loro. Dando un'occhiata all'affascinante mondo dei colori degli afidi ci accorgeremo che, seppure questi insetti rispondono chiaramente ai segnali cromatici, l'attuale stato delle conoscenze non permette di concludere che i colori dell'autunno siano un efficiente sistema di deterrenza nei confronti degli afidi.

Le foglie sono delle fabbriche di biomateriali, ma

gli alberi decidui sono costretti a chiuderle per prepararsi all'arrivo dell'inverno, quando le temperature sono troppo basse per la fotosintesi e le foglie, attraverso l'evaporazione, perderebbero quantità troppo elevate di acqua per poterle recuperare dal terreno ghiacciato e i tessuti rischierebbero di essere danneggiati dal freddo. Eppure le foglie non si limitano ad andare in decomposizione fino a cadere dai rami, anzi a volte i tassi metabolici aumentano durante l'abscissione. Questo innalzamento si verifica perché spesso continuano a essere fotosinteticamente attive mentre, allo stesso tempo, gli alberi si sforzano di recuperare larghe quantità di nutrienti dalle foglie prima di perderle (fino al 60% della massa secca e fino al 70% dell'azoto). Ma perché durante questa operazione di parsimonia si dovrebbe scatenare un'orgia di colori che rappresenta potenzialmente uno spreco?

A scuola ci hanno insegnato che i colori autunnali sono un mero sottoprodotto dei processi di degradazione. Tuttavia le antocianine rosse vengono prodotte specificatamente in autunno e le loro funzioni fisiologiche sono così diversificate da meritare il soprannome di «coltellino svizzero della natura»: sono dei potenti antiossidanti e proteggono da un processo chiamato fotoinibizione, dove una combinazione di bassa temperatura e forte luce solare inibisce un passaggio biochimico chiave della fotosintesi. È stato suggerito anche che potrebbero servire per proteggere lo smantellamento pianificato del macchinario fotosintetico, per rendere inoffensive alcune sostanze dannose come i metalli pesanti, per intiepidire le foglie, per difenderle dalle pericolose radiazioni ultraviolette B. Ma oltre a svolgere questi compiti, le foglie autunnali servono anche a comunicare con gli animali?

Marion I. Newbiggin (1869-1934), una donna straordinaria che ha diretto lo *Scottish Geographi-*



CRAIG TUTTLE/CORBIS

Alberi del Crystal Springs Garden, a Portland nell'Oregon

cal Magazine e non aveva rivali tra i direttori delle riviste scientifiche dell'epoca, ha sottolineato che dovremmo resistere alla tentazione di attribuire una funzione segnaletica a tutto ciò che è colorato. Il giallo del tuorlo d'uovo o l'arancione delle carote sono degli esempi eloquenti. Ciononostante un lavoro pubblicato postumo firmato da uno dei biologi più influenti del Ventesimo secolo, Bill Hamilton, in collaborazione con Sam Brown e separatamente la prima pubblicazione di un giovane teorico dell'evoluzione, Marco Archetti, hanno suggerito una funzione che si discosta radicalmente da ciò che sta scritto sui libri di testo: i vivaci colori autunnali degli alberi potrebbero essere una sorta di avvertimento lanciato agli afidi e ad altri erbivori, per scoraggiarli dal sistemarsi sulle foglie. Questi studiosi propongono che le piante segnalino «onestamente» le proprie capacità difensive agli afidi: i più colorati sarebbero quelli con le foglie meno appetibili, perciò i destinatari del segnale farebbero bene a tener conto

dell'avvertimento.

Questa ipotesi è meno forzata di quanto potrebbe sembrare. Nonostante la loro apparenza insignificante, gli afidi possono danneggiare pesantemente la salute degli alberi, sia attraverso il consumo diretto di materiale vegetale sia attraverso la trasmissione di virus. Su una singola foglia possono banchettare diverse dozzine di afidi, dotati di uno spiccato potenziale riproduttivo. Per la gran parte dell'anno questi animali non perdono tempo a fare sesso o a deporre uova: le madri clonano sé stesse e possono mettere al mondo figlie vive che sono già incinte quando nascono. Grazie alle osservazioni dell'entomologo e comandante militare francese René A. F. de Réaumur (1683-1757) è stato stimato che un singolo afide può produrre 5,9 miliardi di discendenti in sei settimane e questi numeri bastano a eliminare qualsiasi dubbio su quanto sia pericoloso per le piante essere colonizzate dagli afidi. I platani, per esempio, potrebbero produrre il 280% in più di legno nel tronco senza afidi, e

anche le dimensioni di gemme e frutti possono essere pesantemente penalizzate da una forte infestazione. Gli alberi, dunque, potrebbero trarre grossi benefici se disponessero di un segnale adatto per tenere alla larga gli afidi. Ma perché dovrebbe essere utile allontanarli pochi giorni prima che cadano le foglie? In autunno legioni di afidi alati si innalzano in volo, trovano un ospite adatto per l'inverno, si accoppiano e depongono le uova sui rami dell'albero. Quindi un albero che riuscisse a tenere lontani gli afidi in questa stagione, potrebbe passare i primi mesi dell'anno successivo indisturbato.

Hamilton e Brown ipotizzano che gli alberi debbano essere onesti rispetto alla propria appetibilità e alle proprie difese chimiche contro gli erbivori, semplicemente perché non potrebbero permettersi di mentire. Secondo loro agirebbero come i pavoni maschi e i ragazzi che indossano catene d'oro in discoteca: se porti dei segnali costosi allora devi avere i mezzi per produrli, e questo assicura che il segnale sia una fonte di informazioni affidabile per il ricevente. Così sostiene la teoria. In realtà, però, alcuni dei pigmenti di cui ci accorgiamo in autunno ci sono sempre stati. Le xantofille gialle sono un tipo di carotenoidi che è parte integrante della fotosintesi e quindi si trovano in tutte le foglie verdi ma diventano visibili solo quando la clorofilla si degrada. I pigmenti gialli delle foglie in autunno non costano nulla alla pianta, e quindi l'idea che solo gli alberi che hanno difese più forti contro gli erbivori possano permettersi di diventare più gialli ne esce indebolita. D'altro canto le antocianine rosse sono prodotte proprio in autunno, ma come abbiamo già spiegato servono a molti scopi e il loro costo potrebbe essere spesso marginale.

Un'ulteriore complicazione per l'ipotesi del segnale è che viene contraddetta da una moltitudine di studi sui sistemi visivi degli insetti erbivori e sulle loro risposte comportamentali ai segnali cromatici. Oltre un secolo e un quarto fa il Nobel per la fisica Lord Rayleigh irrideva l'idea che ciò che appare vivido agli osservatori umani debba sembrare tale anche agli insetti. La prima prova empirica delle differenze fondamentali tra la visione di uomini e insetti è stata trovata già nel Diciannovesimo secolo da John Lubbock, futuro Barone di Avebury, nonché banchiere e membro del Parlamento britannico, che soleva lamentarsi del fatto che i suoi doveri di parlamentare a volte lo distraevano dalla ricerca entomologica. Fu lui a introdurre i giorni festivi per le banche e a scoprire che le formiche percepiscono i raggi ultravioletti. Nel secolo successivo sono stati eseguiti studi sulla sensibilità alle diverse lunghezze d'onda degli occhi di dozzine di specie di insetti, tra cui molti

che si nutrono di foglie, così come sulle loro risposte comportamentali ai colori. Al momento sembra che gli occhi di tutte le specie erbivore studiate finora, compresi afidi, locuste, dorifore della patata e bruchi erbivori, contengano tre tipi di recettori per il colore, particolarmente sensibili a determinati domini dello spettro luminoso, che sono rispettivamente l'ultravioletto, il blu o il verde. Nessun insetto erbivoro studiato finora ha recettori per il colore rosso negli occhi come l'uomo, anche se molte altre specie di insetti ne hanno e sarebbe necessario testare un maggior numero di specie per arrivare a una conclusione.

Per individuare il segnale che si produce quando un fotorecettore vede un certo bersaglio, bisogna calcolare l'area di sovrapposizione tra la distribuzione spettrale di potenza della luce illuminante (Figura 1A), la funzione di riflettanza spettrale del bersaglio (Figura 1B) e la curva di sensibilità spettrale del recettore (Figura 1C). Nell'afide verde del pesco (*Myzus persicae*), che è l'unica specie studiata approfonditamente finora, sono state eseguite delle registrazioni elettrofisiologiche extracellulari sistemando un elettrodo nell'occhio di un esemplare e misurando il cambiamento di potenziale in seguito alla stimolazione con diverse lunghezze d'onda. In questo modo sono stati identificati un recettore per l'ultravioletto e uno per la luce verde con una sensibilità massima intorno a 330 e 530 nanometri rispettivamente. Si è appurata anche la presenza di un recettore per il blu, ma il suo picco di sensibilità deve ancora essere determinato (nella Figura 1C gli abbiamo attribuito la posizione più comune negli insetti pterigoti). Con queste informazioni è possibile calcolare i potenziali elettrici dei recettori (Figura 1D), ma come vengono processati questi potenziali e come guidano le risposte comportamentali ai colori degli afidi? Un'indicazione utile arriva da un esperimento comportamentale condotto da un eminente specialista di afidi, Volker Moericke. In condizioni controllate di laboratorio, gli afidi verdi del pesco cercano entusiasticamente di inserire la propria proboscide nelle superfici che riflettono luce dal verde al giallo, ma per lo più ignorano le superfici rosse e blu o quelle grigie. Questo comportamento è consistente con l'idea che il recettore per il verde dia un input eccitatorio allo schema motorio di estensione della proboscide. Ma quando Moericke ha presentato agli afidi le superfici grigie subito dopo aver offerto loro uno stimolo blu o violetto, i piccoli insetti hanno improvvisamente giudicato il bersaglio meritevole di un assaggio. Questo sorprendente cambiamento nella risposta al grigio ricorda un fenomeno che si verifica nell'uomo: se fissate un oggetto violetto per

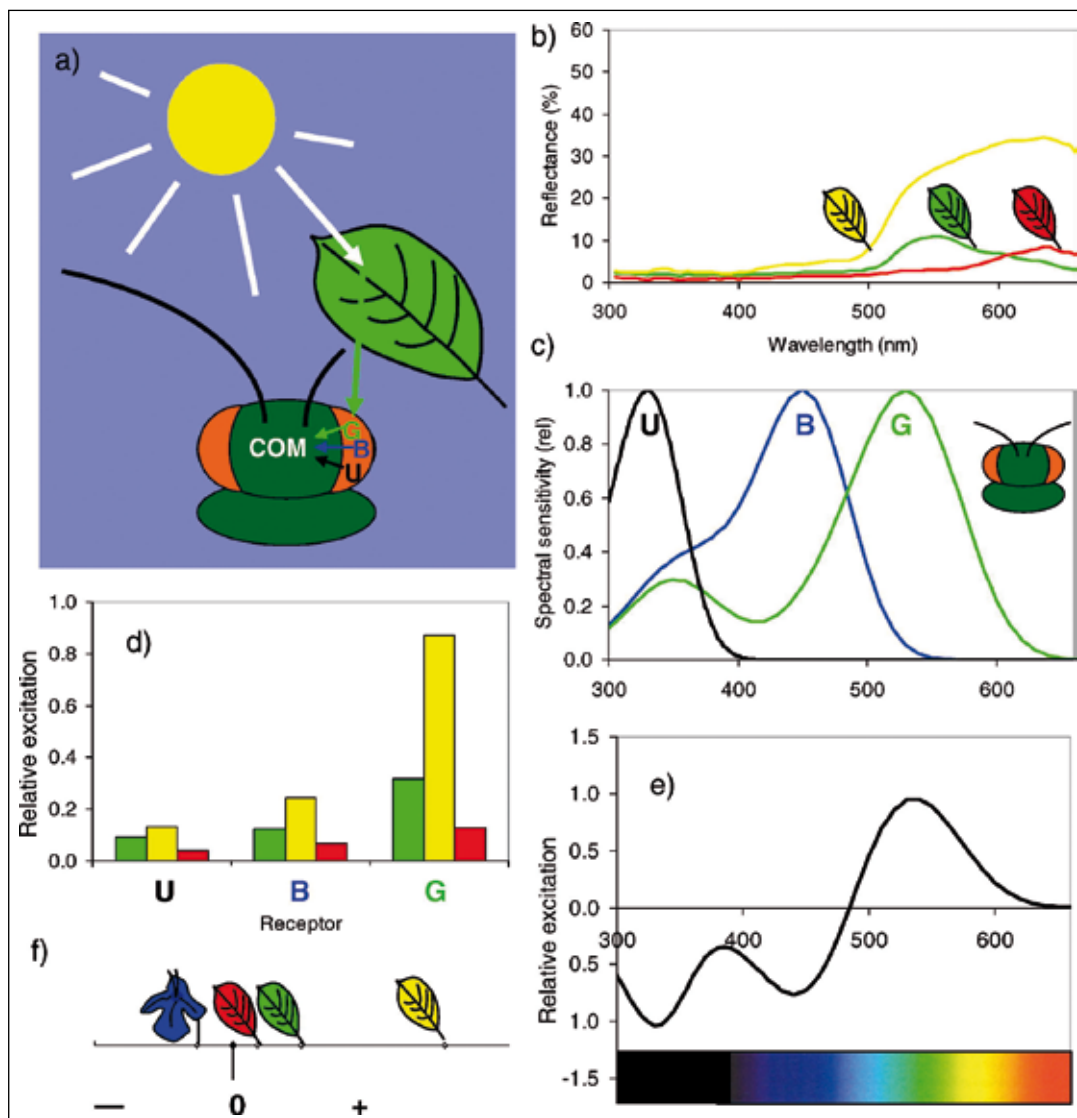


FIGURA 1: La percezione dei colori negli afidi. A: una foglia verde riflette la luce del Sole e gli afidi ne percepiscono il colore con i fotorecettori del verde, del blu e dell'ultravioletto. B: lo spettro di riflettanza di tre foglie di ciliegio a grappoli (*Prunus padus*). Per gli uomini queste foglie sono verdi, rosse e gialle. C: sensibilità spettrale degli afidi verdi del pesco per i colori verde, blu e ultravioletto. D: eccitazione dei fotorecettori per l'ultravioletto, blu e verde, delle foglie indicate nella figura B. E: eccitazione dello spettro di COM ricavata da esperimenti comportamentali. Il meccanismo è innescato da tre recettori (figura C) con input positivo per il verde e negativo per gli altri due. I dati comportamentali indicano che presumibilmente un meccanismo di questo tipo è innescato da un rivelatore di "verdezza". F: eccitazione del COM da foglie di ciliegio e da foglie di Iva ginevrina (*Ajuga genevensis*) su scala monodimensionale. È da notare come le foglie gialle siano in grado di produrre un segnale positivo più intenso di quelle di colore verde.

30 secondi e poi guardate una superficie bianca, per un attimo vedrete giallo. Anche se le proprietà fisiche della superficie non sono cambiate, gli afidi provano l'illusione di un colore che trovano attraente a causa di due processi: l'adattamento recettoriale e l'opponenza cromatica. L'adattamento rende un fotorecettore più sensibile quando per un lungo periodo c'è poca luce nel relativo dominio spettrale e lo rende

meno sensibile quando è molto stimolato. Fissare una superficie violetto-blu fa sì che i recettori per le onde corte dell'insetto (o dell'uomo) siano meno sensibili, mentre i recettori per le onde lunghe (quelli per il verde degli afidi) diventano più sensibili. Quando poi l'afide si trova davanti a una superficie cromaticamente neutrale, la vedrà con recettori verdi potenziati - che manderanno un segnale più forte al cervello - e

con recettori per onde corte depotenziati. Tuttavia, affinché la superficie grigia appaia più attraente, ci deve essere un confronto neurale tra l'input del recettore per il verde e quelli dei recettori per le onde più corte, in altre parole un meccanismo di opposizione spettrale (Figura 1E). Negli afidi l'esistenza di questi due processi può essere soltanto dedotta dai test comportamentali, ma sappiamo che l'adattamento è una proprietà inerente di tutti i fotorecettori, che in diverse specie di insetti sono stati individuati neuroni responsabili dell'opposizione cromatica e che in altri insetti sono stati trovati fenomeni successivi di contrasto. Perciò appare sensato ipotizzare che gli afidi verdi del pesco abbiano un meccanismo di opposizione cromatica del tipo illustrato e su queste basi diventa possibile spiegare le preferenze cromatiche di diverse specie di afidi.

Quando l'eccitazione da opposizione dovuta a tre foglie di ciliegio a grappoli (*Prunus padus*) viene illustrata su una scala di «verdezza», la foglia rossa appare meno stimolante di quella verde (Figura 1F). Perciò anche se le foglie rosse e gialle possono sembrare vivaci agli occhi umani, dovrebbero apparire per lo più sbiadite e insignificanti (anche se non invisibili) agli insetti erbivori testati sino ad oggi. Per misurare quantitativamente il grado di appariscenza sono necessarie misure di riflettanza spettrale, ma è improbabile che la gran parte delle sfumature rosse possa funzionare come un buon deterrente.

In molti insetti erbivori la risposta al giallo è fondamentalmente diversa da quella al rosso e del tutto in contraddizione con l'ipotesi che il primo colore possa tenere alla larga gli ospiti indesiderati. Gli insetti che vanno alla ricerca di foglie spesso hanno una predilezione per il verde, ovvero per i bersagli che stimolano i recettori per il verde più di quelli per l'ultravioletto e il blu. Tuttavia gli oggetti gialli hanno spesso una riflettanza ad alta intensità e stimolano i recettori per il verde in misura ancora maggiore delle foglie verdi, soprattutto in confronto con la bassa eccitazione dei recettori per ultravioletto e blu. Negli insetti con un meccanismo di opposizione cromatica tra il verde e l'ultravioletto-blu, il giallo produce un segnale particolarmente forte (Figura 1F) e quindi attira molti insetti che in realtà andrebbero in cerca del verde. Di fatto il giallo è stato definito un «super stimolo della stessa tipologia del fogliame» e per molte specie risulta più attraente del verde, tant'è vero che le trappole gialle per gli insetti funzionano molto bene per monitorare gli afidi. Se gli alberi volessero usare i colori per scoraggiare gli insetti erbivori, pigmentare le foglie di giallo sarebbe la peggior strategia possibile.

Evidenze aneddotiche emerse con gli studi di campo confermano che il giallo è attraente per gli afidi, mentre il rosso può risultare troppo poco diverso dal verde per provocare una risposta. Gli afidi dell'acero della California (*Periphyllus californiensis*) sembrano ignorare gli aceri giapponesi dalle foglie rosse ma si stabiliscono facilmente su quelli giallo-arancio. In uno studio con foglie morte, quelle rosse hanno attirato gli afidi in modo simile a quelle verdi. Hamilton e Brown hanno trovato che più un albero era giallo, maggiore era il numero di specie di afidi che lo colonizzavano. L'hanno interpretata come una prova che gli alberi sottoposti a pressione da parte degli afidi debbono investire di più in segnali repellenti, ma potrebbe essere vero il contrario: la ragione per cui questi alberi attirano più specie di afidi potrebbe essere proprio la loro appetibilità e l'assenza di difese appropriate. Anche l'osservazione di Hamilton e Brown, dunque, rafforza l'idea che la colorazione gialla rappresenti piuttosto uno svantaggio, portando più afidi di quelli che si avrebbero se le foglie fossero rimaste verdi fino alla caduta. Anche se per essere onesti va detto che esistono alcune specie di afidi che preferiscono il verde al giallo naturale.

Il problema di questi studi osservazionali e correlazionali, comunque, è che foglie di colore diverso potrebbero differire anche per consistenza, sapore e odore, contenuto nutrizionale, tossicità e temperatura, tutti fattori a cui gli insetti sono sensibili. Quindi dovremmo spostare gli studi in laboratorio e utilizzare bersagli che sono identici per tutti questi parametri ad eccezione del colore. Giudicare i colori in base alla brillantezza non è meno pericoloso oggi di quanto lo fosse ai tempi di Lord Rayleigh, perciò sono necessarie le misure di riflettanza spettrale. Per valutarne il significato biologico, inoltre, c'è bisogno di dati sulle sensibilità spettrali del sistema visivo ricevente, così come informazioni sul cablaggio neuronale successivo al recettore. Per quanto riguarda la specie più studiata, l'afide verde del pesco, ci sono buone prove comportamentali di un meccanismo di opposizione tra il recettore per il verde e quelli per onde più corte. Di conseguenza, anche se può sembrare sorprendente agli osservatori umani, alcune sfumature di rosso sono più simili al verde di quanto il giallo non lo sia al rosso o al verde. Si noti che qualsiasi altro sistema neurale di valutazione delle informazioni fornite dai recettori – come l'opposizione bidimensionale nelle api o il sistema strettamente categorico dei mosconi della carne – potrebbe produrre somiglianze cromatiche del tutto diverse. In definitiva non c'è alcun modo per cercare di indovinare, per quanto approssima-



ATLANTIDE/PHOTOTRAVEL/CORBIS

La foresta nei pressi di Camaldoli

tivamente, l'appariscenza di un bersaglio per un animale affidandosi alla valutazione del sistema visivo umano o misurando i segnali ultravioletti nel vuoto. E ovviamente dovremmo ripetere gli studi su un maggior numero di specie di afidi, perché le tinte dell'autunno possono risultare sia maladattative (giallo) che neutrali (rosso), ma alcune specie invece sembrano preferire il verde al giallo. Uno studio comparativo potrebbe rivelare differenze interessanti tra le specie, a seconda della loro ecologia e della particolare relazione che hanno con il fogliame nella stagione autunnale.

Quando guarda le cose con gli occhi dell'uomo anziché con quelli degli animali direttamente interessati, la scienza rischia di prendere degli abbagli scambiando l'appariscenza con la scarsa visibilità o un deterrente con un fattore di attrazione. Al momento le funzioni multiple già attribuite ai carotenoidi gialli – come componenti integrali della fotosintesi e protettori contro il danno fotoossidativo – e alle antocianine rosse – come depositi per i radicali e protettori contro la fotoinibizione – offrono una spiegazione sufficiente del perché gli alberi si colorano in autunno. Ma lasciamo che a concludere sia Marion

Newbigin, con un paragrafo tratto dalla monografia *Colour in Nature*. Si tratta di un'ammonizione contro la fretta con cui venivano accettate le ipotesi adattative sul colore come mezzo di comunicazione nel mondo animale, ma è altrettanto pertinente se riferita alla pigmentazione delle piante. «I colori, ovunque siano visti, vengono spiegati alla luce della Selezione Naturale come se in qualche modo fossero sempre utili alle specie. Nella vulgata, dunque, il compito principale del naturalista diventa quello di trovare la spiegazione più ingegnosa possibile di questa presunta utilità. Se il naturalista non ci riesce, il che accade raramente, allora si dice che il colore non è significativo o, ancor meglio, l'animale ha cambiato ambiente di recente e non è più perfettamente adattato ad esso. La teoria, quindi, è perfettamente completa e coerente, e le persone che la mettono in dubbio sono bollate come scienziati da laboratorio, ignoranti della natura, che non meritano il nome di naturalista» (M. I. Newbigin, 1898).

Lars Chittka e Thomas F.Döring, School of Biological and Chemical Sciences, Queen Mary, University of London, United Kingdom.

© Chittka L. et al. *PLoS Biol.* 2007 August; 5(8): e187