

# Impatto dell'illuminazione artificiale sugli organismi viventi

Giuseppe Camerini

Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente - Università degli Studi. Via S. Epifanio, 14 - Pavia. giuseppe.camerini@gmail.com

## Riassunto

L'inquinamento luminoso è un problema che interessa tutte le aree abitate del Pianeta e condiziona in negativo gli organismi viventi, in relazione alla sensibilità di ciascun taxon. Gli effetti dell'inquinamento luminoso interessano piante e animali che popolano gli ambienti terrestri e quelli acquatici più vicini ad aree urbane. Interferenze con i naturali cicli luce/buio possono influenzare processi a livello fisiologico. L'esposizione alla luce artificiale durante le ore notturne, per esempio, può alterare gli orologi biologici in conseguenza di squilibri ormonali. L'inquinamento luminoso può anche trasporre comportamenti che si manifestano in ore diurne o crepuscolari alle ore notturne e incidere sui comportamenti riproduttivi quando essi sono sincronizzati con il fotoperiodo. Ad essere condizionati sono altresì i meccanismi di orientamento e migrazione. I gradienti di luminosità possono condizionare i tempi dedicati alla ricerca del cibo da parte delle diverse specie animali; in tal modo l'interferenza data dalla luce artificiale può aumentare il livello di competizione interspecifica. Specie che non tollerano le luci artificiali possono andare incontro a estinzione ed essere sostituite da altre che beneficiano dell'illuminazione notturna. Specie che siano attratte dalle sorgenti luminose possono per altro andare incontro ad un aumento del rischio di predazione. In definitiva, l'alterazione dei processi di competizione e predazione può incidere sulle dinamiche di popolazione e dunque -di riflesso- l'impatto dell'illuminazione artificiale può avere anche implicazioni ecologiche.

PAROLE CHIAVE: illuminazione artificiale / piante / animali invertebrati / animali vertebrati

## The impact of artificial night lighting on living organisms

Light pollution is a global problem involving every inhabited area of the World. Light pollution can adversely influence wildlife and taxa show different susceptibility. Artificial night lighting can affect plants and animals living both in terrestrial and aquatic habitats next to urban areas. Changes in natural patterns of dark and light can disrupt physiological processes. Exposure to artificial light during the night, for example, can alter hormone levels regulating *biological clocks*. Artificial night lighting can shift diurnal or crepuscular behaviours to occur at the night. Light/dark patterns are often used by animals to synchronize reproduction, therefore changes in light levels can disrupt reproductive behaviours. Some animals are disoriented when the natural night brightness is altered, therefore critical functions, such as migration, can be affected, too. Illumination gradients can work as factors regulating foraging times; artificial light tends to increase interspecific competition for food. Thus, species sensitive to lights, in some cases become extinct because of competition coming from species that benefit from artificial light. On the other hand, animals attracted by lamps often have to face an increased risk of predation. Alteration of competition and predation can have ecological implications.

KEY WORDS: artificial lighting / plants / invertebrates / vertebrates

## INTRODUZIONE

L'illuminazione artificiale è un fattore di progresso che ha reso più vivibile la notte a beneficio di una specie -quella umana- che notturna non è. Sicurezza, facilitazione nel trasporto di cose e persone, estensione alle ore notturne delle

attività produttive: sono solo alcuni dei vantaggi offerti dalla disponibilità di luce artificiale.

L'altra faccia della medaglia è però l'impatto derivante dalla diffusa presenza di impianti di illuminazione pubblica e privata (Sidoti

e Ghislieri, 2008). Il primo allarme è venuto dal mondo dell'astronomia, che ha documentato il crescente livello di inquinamento luminoso che rende sempre meno agevole la visione notturna dei corpi celesti. Un ruolo di rilevanza a li-

vello mondiale in tale ambito ha avuto il gruppo di lavoro del Dipartimento di Astronomia dell'Università di Padova, che ha contribuito in maniera determinante alla pubblicazione del primo atlante mondiale dell'inquinamento luminoso (Cinzano *et al.*, 2001a) e ha redatto un dettagliato report sulle dimensioni del fenomeno in Italia (Cinzano *et al.*, 2001b).

Ciò che viene definito inquinamento luminoso è conseguenza dell'urbanizzazione che si accompagna a una crescente espansione degli impianti di illuminazione notturna nei Paesi più sviluppati sotto il profilo economico (Fig. 1). Il fenomeno è in crescita: solo per citare un dato, secondo Cinzano (2000) tra il 1960 e il 1995 nelle regioni italiane del nord est l'aumento dell'inquinamento luminoso è proceduto con un incremento medio annuale pari a circa il 10%.

Il quadro conoscitivo sugli effetti dell'inquinamento a carico delle componenti biotiche è quanto mai frammentario, tuttavia l'insieme dei dati disponibili suggerisce interessanti indicazioni generali sul fenomeno. L'impatto si determina sia quando la luce proviene direttamente da una sorgente luminosa ben identificabile (ciò che nella letteratura anglosassone è detto *glare*)

sia sotto forma di luce diffusa (in inglese *sky glow*). Nel primo caso l'effetto deriva dal bagliore emesso da un impianto di illuminazione o da una singola sorgente luminosa che, ad esempio -nel caso di un animale- raggiunge i fotorecettori dell'occhio (Wilson, 1998). La luce diffusa è invece il risultato delle interferenze che la luce subisce nel suo propagarsi dalla sorgente luminosa. Interagendo con l'atmosfera, la superficie del suolo e le nubi, la luce viene assorbita e riflessa: il risultato è la formazione di un'aura luminosa sospesa sul piano dell'orizzonte che nel caso delle aree metropolitane più estese assume dimensioni imponenti e può arrivare in casi estremi ad essere visibile anche per un raggio di 160 km dal centro della città (Crawford e Hunter, 1990). Mentre il fenomeno della luce diffusa si manifesta su scala di paesaggio, laddove esistono agglomerati urbani di una certa dimensione, quello della interferenza da luce diretta può avere luogo come detto anche da una sorgente luminosa puntiforme e isolata, come ad esempio un singolo lampione (Scheibe, 2000).

L'intensità della luce artificiale non è il solo elemento da valutare per stimarne l'impatto sulle componenti biotiche. Anche il

tipo di luce è fattore di primaria importanza. Essa dipende anzi tutto dal materiale reattivo che la lampada contiene, ma anche dalle caratteristiche del rivestimento della lampada o dalla presenza di eventuali filtri opportunamente montati allo scopo di schermare particolari lunghezze d'onda emesse dalla sorgente luminosa (Salmon, 2006). Come si vedrà in seguito, lampade di uguale potenza ma funzionanti con materiali reattivi diversi possono determinare effetti ben differenti sugli organismi viventi, in ragione del loro diverso spettro di emissione. La lampade ad alta pressione al vapore di sodio, per esempio, producono il loro picco di emissione in corrispondenza con le lunghezze d'onda del rosso, del giallo e del verde, mentre la versione al vapore di sodio a bassa pressione emette luce corrispondente al picco del giallo. Lampade al vapore di mercurio producono invece uno spettro luminoso che ha il picco massimo in corrispondenza del blu (Osterbrock *et al.*, 1976).

Per quanto riguarda poi la natura degli effetti, anch'essa può variare ampiamente in relazione alle specifiche caratteristiche biologiche degli organismi che mostrano sempre -se pure in misura diversa- una spiccata sensibilità alla luce (Rich e Longcore, 2006). Insieme alla temperatura, la luce è infatti il fattore ecologico che ha maggiore influenza sui processi biologici: come "motore" della fotosintesi, come parametro rispetto al quale sincronizzare i ritmi biologici o ancora come elemento essenziale per l'orientamento visivo di tipo astronomico.

Di seguito vengono riassunti i risultati dei principali studi eseguiti a livello internazionale sugli effetti dell'inquinamento luminoso a carico delle piante superiori, degli animali invertebrati e dei vertebrati.



Fig. 1. Nei territori di pianura italiani il fenomeno dell'inquinamento luminoso si manifesta con particolare intensità (foto G. Camerini).

## Piante

Le piante sono molto sensibili alla luce e non solo in virtù della loro capacità di trasformare l'energia luminosa in energia chimica attraverso la fotosintesi. Come per il resto degli esseri viventi, infatti, è la luce il principale fattore che, agendo sugli orologi biologici, regola i ritmi vitali legati all'attività vegetativa o alla riproduzione. Una serie di fotorecettori scoperti negli ultimi decenni (fitocromi, criptocromi, fototropine, ecc.) fungono da efficaci sensori biochimici che rilevano le variazioni dei livelli luminosi (Briggs, 2006). Le lunghezze d'onda che attivano questi sensori e le conseguenti risposte fisiologiche sono in primis quelle in grado di attivare il processo della fotosintesi. Le sorgenti luminose artificiali emettono di norma onde elettromagnetiche di lunghezza diversa rispetto allo spettro utile alla fotosintesi; l'attività fotosintetica di piante esposte a luci artificiali pertanto può subire un incremento solo se lo spettro emissivo delle fonti luminose artificiali comprende componenti cui sono sensibili le clorofille e i pigmenti accessori (Roman *et al.*, 2000). Le lampade ad incandescenza utilizzate in passato avevano queste caratteristiche e dunque potevano estendere in maniera significativa il numero di ore di luce utili allo svolgimento della fotosintesi, mentre lampade ai vapori di sodio a bassa pressione non paiono avere questa capacità (Casagrande e Giulini, 2000). La luce artificiale può tuttavia interferire indirettamente con il processo della fotosintesi: Cathey e Campbell (1975a) riferiscono ad esempio che esemplari di platano esposti a lampade al sodio ad alta pressione mostravano una crescita più rapida ed estesa nel tempo rispetto al campione di controllo. Negli esemplari esposti alla luce artificiale, tuttavia, il con-

tenuto di clorofilla nella foglia era inferiore e maggiore era la sensibilità al danno da inquinamento atmosferico. Effetti sui vegetali superiori sono stati evidenziati anche grazie a uno studio che ha preso in esame due esemplari di *Magnolia grandiflora* L. dell'orto botanico di Padova (Roman *et al.*, 2000). Mediante misure di fluorescenza su campioni di tessuti fogliari prelevati in prossimità delle luci e in punti schermati dalla stessa è stato dimostrato che le lampade (a vapori di mercurio) inibivano la fotosintesi. Gli autori propongono due possibili ipotesi per spiegare il fenomeno: secondo la prima il decremento della fotosintesi potrebbe essere dovuto alla minore quantità di luce solare assorbita dalle piante quando risultavano azionate le lampade. In alternativa, l'inibizione della fotosintesi potrebbe essere il risultato di un diminuito contenuto di clorofilla nel mesofillo determinato dall'esposizione a luce artificiale. Da tenere conto anche l'effetto di natura microclimatica che si viene a determinare per effetto del riscaldamento prodotto dall'irradiazione luminosa sugli organi della pianta più direttamente esposti alle luci artificiali, che può determinare un prolungamento del periodo vegetativo (Casagrande e Giulini, 2000) derivante da un'alterazione dei meccanismi di regolazione che segnano il passaggio dalla fase vegetativa attiva alla quiescenza nelle piante a foglia caduca. Briggs (2006) cita l'esempio di esemplari arborei cresciuti nel campus dell'Università californiana di Berkeley nei pressi di luci artificiali; questi esemplari, a differenza di altri che si trovavano a maggiore distanza dalle fonti luminose, conservavano più a lungo il fogliame, fino al tardo autunno o addirittura fino all'inverno.

Ben documentato è l'impatto che l'illuminazione notturna può

esercitare sul fotoperiodismo, vale a dire l'insieme di reazioni che le piante attivano in risposta al ritmo ambientale giornaliero e stagionale dei periodi di luce e di oscurità e che condiziona processi come la fioritura. Su questo aspetto sono state svolte numerose ricerche a fini applicativi rivolte soprattutto al settore florovivaistico. L'obiettivo è quello di prolungare i periodi di fioritura di piante di interesse economico (es. *Chrysanthemum* sp.) e controllare mediante esposizione a luce artificiale la fioritura stessa per farla avvenire in modo scalare, sincronizzandola con le richieste del mercato (Vince-Prue, 1994). In relazione alla durata del fotoperiodo, le piante possono mostrare una loro sensibilità alla luce che ne condiziona la fioritura; in tal caso si opera una distinzione fra piante brevidiurne e longidiurne. Piante la cui fioritura, al contrario, non è condizionata dalla luce, sono dette neutrodiurne.

Le piante superiori, oltre a mostrare una risposta differenziale nei confronti della luce "naturale", vale a dire quella solare, posseggono sensibilità molto diverse nei confronti di fonti luminose artificiali, come documentano gli studi di Cathey e Campbell (1975a, 1975b) che hanno preso in esame gli effetti di alcuni tipi di lampade (incandescenti, a vapori di sodio ad alta pressione, alogenuri, fluorescenti, ai vapori di mercurio) su un ricco campione di piante di interesse orticolo e di piante arboree. L'esperimento, condotto in laboratorio, consisteva nell'esporre giornalmente i vegetali a 8 ore di luce solare alternate a un periodo di 16 ore durante le quali -in luogo dell'oscurità- veniva mantenuta un'intensità luminosa pari a 10 lux. Furono testate inoltre intensità luminose più intense, ottenendo risultati simili a quelli ottenuti con il valore di 10

lux. In ordine decrescente, gli effetti maggiori in termini di interferenza con il fotoperiodismo furono indotti dalle lampade: incandescenti, ai vapori di sodio, ad alogenuri, fluorescenti e infine da quelle ai vapori di mercurio. La risposta dei vegetali sperimentati aveva un carattere specie-specifico.

In tempi recenti, a partire dal 2000, è da segnalare un notevole sforzo di ricerca messo in campo per valutare il possibile uso in sera di luce da diodi per la produzione di ortaggi. Un articolo di review pubblicato da Olle e Viršile (2013) include in bibliografia oltre 60 articoli riferibili a ricerche su questo tema. Da esse si può desumere che i dispositivi a led che emettono secondo frequenze corrispondenti a diversi colori (rosso, blu, bianco, verde) producono su essenze di interesse ortivo come *Lactuca sativa* o *Brassica* sp. variazioni nella concentrazione di metaboliti (antociani, carotenoidi, fenoli, ecc.), nell'accumulo di biomassa, nei livelli di clorofilla, oltre a determinare interferenze sui tempi di fioritura.

### Invertebrati acquatici

Gli organismi acquatici sono esposti agli effetti dell'inquinamento luminoso quando i litorali sono prossimi ad aree urbane. La penetrazione della luce artificiale all'interno del corpo idrico è influenzata dalla torbidità delle acque, ma notevole influenza hanno anche le diverse frequenze delle componenti emesse dalle sorgenti luminose. La profondità di penetrazione raggiunta dalle diverse componenti luminose a sua volta può determinare effetti differenziali in relazione alla sensibilità dei vari taxa. Moore *et al.* (2006) hanno studiato il fenomeno in quattro bacini lacustri del Massachusetts disposti lungo un gradiente tracciato a partire da un'area agricola, per arrivare infi-

ne ad un lago posto in piena area urbana. I quattro laghi erano bordati da impianti di illuminazione artificiali disposti entro 30 m dalle rive. Più che al disturbo causato da questi impianti, tuttavia, i ricercatori erano interessati a valutare gli effetti della luce diffusa. A tale proposito il protocollo della ricerca prevedeva la misurazione dell'intensità e dello spettro luminoso in punti collocati al centro della superficie del lago. Riguardo allo spettro luminoso, le lampade più diffuse nei quattro siti di studio erano quelle al sodio ad alta pressione che emettono luce dominata dalla componente gialla e infatti la luce incidente sulla superficie dei laghi era in prevalenza quella gialla (585 nm) che tende a penetrare in profondità entro la colonna d'acqua. La luce artificiale incidente la superficie dei laghi aveva dunque uno spettro ben diverso da quello della luce naturale notturna, vale a dire quella lunare. Il bagliore emesso dalla luna altro non è che luce solare riflessa e come tale ha uno spettro costituito da un intervallo di lunghezze d'onda ben più esteso (380-700 nm) che non include solo il giallo/arancione, ma anche il blu e il rosso. Quanto all'intensità luminosa derivante dal fenomeno della luce diffusa, come atteso essa tendeva ad aumentare lungo il gradiente scelto, con valori misurati sul lago posto in area urbana da 3 a 6 volte maggiori rispetto a quelli registrati nel bacino situato nell'area meno urbanizzata. Le condizioni meteo climatiche mostravano di avere una loro influenza: in presenza di cielo nuvoloso, in tutte le quattro aree di studio l'intensità luminosa aumentava fino a quattro volte rispetto alle condizioni di cielo sereno. In letteratura sono disponibili ben pochi dati sui livelli di intensità luminosa artificiale potenzialmente disturbanti per gli

organismi acquatici. Nel caso del genere *Daphnia*, crostaceo cladocero che mostra fototassi positiva, Flick *et al.* (1997) indicano valori compresi fra 0,01 e 3 lux. Per altri organismi acquatici che sono invece fotofobi, come ad esempio il Crostaceo *Mysidopsis bahia* Molenock o le larve dei Ditteri afferenti al genere *Chaoborus*, risultano disturbanti intensità luminose di quattro ordini di grandezza inferiori. Nei quattro laghi del Massachusetts furono misurati livelli di luminosità equivalenti a 2/3 di quelli corrispondenti a notti di luna piena (0,05-0,1 lux); secondo gli autori della ricerca si tratta dunque di valori destinati a produrre effetti a carico degli organismi viventi, soprattutto quelli che popolano le aree pelagiche (Moore *et al.*, 2006).

Uno dei fenomeni che in maggior misura può essere condizionato da variazioni anche molto lievi dei livelli di intensità luminosa è quello delle migrazioni verticali dello zooplancton (Haney, 1993). Nelle ore diurne gli organismi planctonici sono di norma distribuiti nella parte profonda della colonna d'acqua, per poi salire in superficie a nutrirsi verso il tramonto e tornare in profondità al calare della notte. Osservazioni svolte in alcuni laghi vicini a Boston indicano che l'inquinamento luminoso può inibire del tutto tali migrazioni (Moore *et al.*, 2000). Gli organismi più sensibili sono i predatori dotati di marcata fototassia negativa, come le larve del Dittero *Chaoborus punctipennis* Say, che non tollerano intensità luminose superiori a 0,001 lux, equivalenti alla luce diffusa naturale in notti di luna nuova (Gal *et al.*, 1999).

Altro meccanismo che può subire interferenze significative è il cosiddetto "drift", ovvero il movimento degli artropodi bentonici dei corsi d'acqua che periodicamente

si lasciano trascinare a valle per colonizzare nuovi microhabitat dove minori sono il rischio di predazione e la competizione per l'accesso al cibo (Giller e Malmquist, 1998). In molti torrenti è stato registrato un picco del drift in coincidenza con le ore del crepuscolo. Quando il fenomeno si verifica nelle ore serali e notturne, esso è molto condizionato dai livelli di luminosità naturale notturna. In condizioni di luminosità corrispondenti a quelle della luna piena, ad esempio, si può registrare una riduzione significativa del fenomeno. L'inquinamento da luce diffusa può sovrapporsi alla luminosità naturale notturna, con le interferenze che ne conseguono.

### Insetti

La luce solare e lunare, in forma di variazioni stagionali o mensili di fotoperiodo, condiziona i ritmi biologici degli insetti, con effetti profondi su vari aspetti della loro biologia. L'attività ematofaga delle femmine di zanzara (Diptera Culicidae) per esempio è spesso correlata ai cicli lunari, come riscontrato da Charlwood *et al.* (1986) per *Anopheles farauti* Laveran che in Nuova Guinea è attiva soprattutto nelle ore notturne in cui la luminosità lunare è massima (luna piena). Miller *et al.*, (1970) hanno invece dimostrato come tre specie di *Anopheles* e quattro specie di *Culex* presenti in Thailandia concentrino la loro attività di volo soprattutto in coincidenza con le fasi di luna nuova. Insetti Culicidi quali *Clunio marinus* Haliday hanno periodi di sfarfallamento in corrispondenza dei quarti lunari (maree di quadratura) ma se esposti a condizioni di invariabilità della illuminazione perdono questa caratteristica compromettendo le possibilità di riproduzione (Neuman, 1976). Il diametro della "trappola" della larva del

formicaleone (*Myrmeleon obscurus* Rambur) è influenzato dalla luminosità notturna ed aumenta in corrispondenza della luna piena (Youthed e Moran, 1969).

Il potere attrattivo delle sorgenti di luce artificiale nei confronti degli Insetti è noto da tempo, tanto che l'uso di dispositivi luminosi per il campionamento di questi animali è di lunga data. Lampade attrattive sono impiegate anche come strumenti di cattura e lotta ad insetti ritenuti molesti, come ad esempio le zanzare o i Muscidi. Si tratta di apparecchi, frequentemente dotati di luce UV e di solito non schermati da griglie selettive, con il risultato di causare un'inutile strage di insetti del tutto innocui. Anche gli impianti di illuminazione notturna sono attrattivi nei confronti degli insetti che si addensano in volo intorno alle sorgenti luminose. È stato stimato (Kolligs, 2000) che, in relazione alla sensibilità delle singole specie e allo spettro di emissione luminosa, l'attrazione si manifesta lungo un raggio variabile fra 3 e 130 metri. Eisenbeis (2006) propone alcuni possibili modelli per interpretare il meccanismo con il quale si esplica l'attrazione nei confronti delle luci artificiali. Secondo la prima modalità di interazione, gli individui sono attratti dalle fonti luminose e periscono in breve tempo oppure subiscono danni come disidratazione, perdita degli arti e delle scaglie che rivestono le ali, oppure cadono al suolo esausti dopo il loro volo incessante intorno alle lampade, o ancora diventano preda dei pipistrelli. In altri casi l'animale, dopo una prima fase in cui si avvicina in volo ai lampioni, se ne discosta pur senza che l'attrazione si estingua. L'insetto rimane fermo a terra, a una certa distanza dalla luce, comportamento questo definito di "cattura". Nel caso delle farfalle not-

turne, la quiescenza può durare per un'intera notte (Frank, 2006) ma anche qualora si tratti di qualche ora, ciò rappresenta un "costo temporale" non trascurabile in considerazione del fatto che spesso la durata dello stadio adulto non supera la settimana (Young, 1997). Si aggiunga il fatto che spesso l'attrazione si ripete in sere successive; utilizzando la tecnica della marcatura-ricattura Hartstack *et al.*, (1968) hanno verificato che nel caso dei lepidotteri Nottuidi le percentuali di ricattura a distanza di 24 ore variavano, da specie a specie, fra l'1,9% e il 43,2%.

La seconda situazione che si può manifestare è quella di un disturbo che condiziona il volo su più lunga distanza; nei loro movimenti notturni gli insetti di solito utilizzano punti di riferimento del paesaggio (profilo degli alberi, stelle, luna, profilo dell'orizzonte). Se un impianto di illuminazione ad andamento lineare (es. fila di lampioni a lato di una strada) interseca la loro linea di volo, nel migliore dei casi il percorso potrebbe essere deviato, ma in caso di attrazione alle fonti luminose le dinamiche sono quelle descritte in precedenza: collisione, ustioni, aumentato rischio di predazione, caduta a terra (Eisenbeis, 2006).

Nei casi più gravi si determina un vero e proprio azzeramento di intere popolazioni di insetti. Interessante a tale proposito uno studio di Scheibe (2000) sui possibili effetti a carico degli adulti di insetti acquatici (Tricotteri, Ditteri, Plecotteri, ecc.) da parte di un singolo lampione posizionato nei pressi di un corso d'acqua. L'attrazione si manifestava in modo diverso per i differenti taxa e in alcuni casi era particolarmente intensa. Nel caso dei Tricotteri, in particolare, l'eventuale realizzazione di una fila di lampioni nei pressi del corso d'ac-

qua avrebbe avuto come prevedibile effetto l'estinzione completa della loro popolazione (Eisenbeis, 2006).

Grande influenza sull'intensità dell'attrazione – e sui danni che ne derivano – viene dallo spettro di emissione delle lampade, aspetto quest'ultimo oggetto di indagine da parte di Eisenbeis (2006) in un'area rurale della Germania. Nell'ambito della ricerca sono state sperimentate lampade ad alta pressione al mercurio (80W), al sodio (50 o 70 W), al sodio-xenon (80 W), oltre a lampade al mercurio dotate di un filtro capace di schermare la componente UV. Le lampade furono montate insieme a un dispositivo costituito da un imbuto collegato a un contenitore riempito con liquido fissante in cui cadevano gli insetti attirati sulla superficie delle lampade. Il numero di catture fu massimo con lampade al mercurio e minimo con le stesse dotate di apposito filtro schermante i raggi UV. Il numero di insetti catturati con lampade al sodio-xenon superò quelle delle catture con luce ottenuta da lampade al sodio. Per quanto riguarda il filtro per la componente UV montato sulle lampade a vapori di mercurio, purtroppo il dispositivo riduceva l'intensità di illuminazione al di sotto degli standard richiesti dalla legislazione tedesca in materia. In compenso, sulla base dei dati raccolti, è stato stimato che la sostituzione delle lampade al mercurio con quelle al sodio ridurrebbe del 55% il numero di insetti attratti dalle lampade, percentuale che per le farfalle notturne salirebbe al 75%. In una fase successiva del suo lavoro, Eisenbeis (2006) sottopose a verifica sperimentale l'ipotesi di Scheibe (1999) secondo la quale la maggiore attrattività delle lampade ai vapori di mercurio si manifestava solo quando erano contemporaneamente in

funzione anche altri tipi di lampada, ma quando i diversi tipi di lampada funzionavano separatamente, essi avrebbero finito per attrarre in egual misura gli insetti. Eisenbeis (2006) sperimentò dunque separatamente i diversi tipi di lampada in un'area rurale priva di interferenze derivante da luce diffusa. I risultati confermarono la maggiore capacità attrattiva delle lampade a vapori di mercurio rispetto alle lampade funzionanti con vapori di sodio. Eisenbeis (2006) rilevò inoltre nel corso delle sue sperimentazioni che la temperatura condizionava in maniera significativa l'abbondanza delle catture, con un picco intorno ai 21°C e il minimo in corrispondenza di notti fredde, con valori intorno a 12-14°C. Fu verificata anche l'influenza delle fasi lunari, con abbondanze registrate in fase di luna nuova sette volte maggiori rispetto a quelle rilevate in fase di luna piena; l'indicazione trova conferma anche da una ricerca di Nowinzsky *et al.* (1979).

Un dato di particolare interesse è quello che definisce la proporzione di insetti che, una volta avvicinati ad una fonte luminosa, ne vengono effettivamente attirati (Bauer, 1993). Molto sensibili sono gli Efemeroteri (1,4:1) e i Tricotteri (2,3:1) come i Macrolepidotteri (1,6:1) tra i quali tuttavia emerge il dato in controtendenza dei Geometridi (11:1). Queste indicazioni sono state ottenute con trappole luminose e non esprimono la reale proporzione di insetti uccisi o comunque danneggiati da impianti di illuminazione artificiale, anche se hanno il pregio di mettere a confronto la sensibilità dei diversi gruppi sistematici nei confronti delle luci artificiali. Bauer (1993) è giunto a stimare che la percentuale di insetti attirati dalle luci che perivano successivamente per effetto dell'avvicinamento fosse pari a un

terzo. Eisenbeis (2006) riporta anche una stima della mortalità indotta dall'illuminazione notturna basata sui seguenti presupposti:

- le lampade sono a vapore di mercurio;
- il numero medio di insetti che si avvicinano a una singola lampada è di 450 per notte;
- il numero medio di insetti uccisi per notte da una lampada al mercurio è pari a 150.

Per una città delle dimensioni di Kiel (nord Germania) che conta 240.000 residenti e ha una dotazione di 20.000 punti luce Kolligs (2000) stima che il numero di insetti uccisi per notte sarebbe pari a 3 milioni, equivalenti a 360 milioni per stagione di volo, considerando la durata della stagione pari a 120 giorni, da giugno a settembre.

Quand'anche le sorgenti luminose non sono causa diretta di mortalità, possono comunque incrementare il tasso di predazione degli insetti. Molte specie di falene posseggono colorazioni criptiche che quando l'insetto è posato su di un opportuno sfondo funzionano come efficaci strumenti per ridurre il rischio di predazione. Può però accadere che, ad esempio, una falena scura attirata da una luce artificiale che illumina un edificio di colore chiaro, vi si posi diventando in tal modo una preda facilmente individuabile. È quanto documentato da Collins & Watson (1983) nella Estación Biologica de Rancho Grande, in Venezuela, dove nel corso di 7 mesi di osservazione furono osservate 30 diverse specie di Uccelli nutrirsi a spese di falene appartenenti a 10 diverse famiglie, per un totale di oltre 700 individui predati.

L'esposizione alla luce artificiale può interferire anche con attività legate alla sfera riproduttiva: corteggiamento, accoppiamento, ovideposizione. Per le specie con

abitudini notturne più spiccate, l'oscurità è indispensabile per attivare i necessari meccanismi fisiologici: in laboratorio è stato dimostrato ad esempio che nei lepidotteri *Trichoplusia ni* Hübner (fam. Noctuidae; Sower *et al.*, 1970) e *Dio-ryctria abietivorella* Grote (fam. Pyralidae; Fatzinger, 1973) il rilascio del feromone femminile e la risposta del maschio che ne consegue sono soppressi dall'esposizione a luce artificiale. Sempre in laboratorio è stato dimostrato che maschio e femmina del lepidottero *Helicoverpa zea* Boddie non si accoppiano al di sopra di un livello di luminosità pari a 0,05 lux, equivalente a una notte limpida e illuminata da un quarto di luna (Agee, 1972). Il volo di femmine gravide verso le luci artificiali può determinare una concentrazione delle deposizioni nelle adiacenze della fonte luminosa: è quanto rilevato ad esempio per due specie di Saturnidi: *Antheraea polyphemus* Cramer (Frank, 2006) e *Coloradia pandora* Blake (Brown, 1984). Al contrario, l'illuminazione artificiale può sopprimere l'ovideposizione: in appezzamenti di cotone interessati dal cono di luce proiettato da luci artificiali la densità di uova di *Heliothis* sp. era inferiore dell'85% rispetto a coltivi di cotone non interessati dal fenomeno (Frank, 2006).

Interferenze con i ritmi biologici emergono da osservazioni su farfalle notturne i cui ritmi circadiani sono messi in fase con il fotoperiodo naturale attraverso opportuni fotorecettori (Giebultowicz, 2000). La manipolazione del fotoperiodo può alterare a tal punto i meccanismi fisiologici fondamentali da indurre la sterilità nelle farfalle adulte, come verificato per *Spodoptera littoralis* Boisduval (Bebas *et al.*, 2001).

Considerato che la mortalità indotta dall'illuminazione notturna

si manifesta soprattutto nelle aree più urbanizzate, è interessante valutare quale sia lo spettro faunistico di questi ambienti anche al fine di stimare l'effettivo danno che l'illuminazione notturna può arrecare. Quest'operazione non è priva di implicazioni di carattere conservazionistico. Con il crescere del fenomeno della cosiddetta "città diffusa", ovvero l'urbanizzazione a macchia d'olio che dà forma a estese conurbazioni, gli spazi verdi inclusi nelle aree urbane diventano habitat di importanza cruciale per la sopravvivenza della piccola fauna. Solo per citare un dato, in Inghilterra i giardini privati occupano un'area equivalente a 10 volte quella dell'insieme delle aree protette nazionali. Emmet (1991) ha classificato 305 specie di farfalle notturne segnalate per la Gran Bretagna come esclusive o in prevalenza distribuite in habitat suburbani, parchi, giardini, frutteti, aree edificate. Nell'area metropolitana londinese sono state identificate 1.479 specie di farfalle notturne, equivalenti ai 2/3 delle specie segnalate per il Regno Unito. Nella medesima area urbana 60 specie di macro-lepidotteri notturni, un tempo presenti, sono oggi considerate estinte e altre specie sopravvivono con popolazioni a rischio di estinzione. Si ritiene che queste popolazioni sopravvivano grazie all'immigrazione periodica di individui dai territori rurali circostanti, ammesso che fattori antropogenici (come anche l'inquinamento luminoso) non siano di impedimento a questo processo di compensazione (Taylor *et al.*, 1978). In taluni casi infatti le luci artificiali risultano fatali anche per specie rare e minacciate, come riscontrato da Kolligs (2000) in uno studio effettuato presso la città tedesca di Kiel. Farfalle notturne di otto specie considerate rare

furono catturate da trappole montate su lampioni per l'illuminazione notturna; pur trattandosi di un numero di catture limitato a pochi individui, la mortalità indotta dal sistema di illuminazione artificiale finiva per erodere parte del patrimonio genetico, che è risorsa essenziale per la sopravvivenza di specie minacciate. A ciò si aggiunge il fatto che quando le superfici di habitat adatto a una specie rara sono ridotte a frammenti fra di loro isolati, come avviene tipicamente nelle aree più antropizzate, la presenza di una barriera in qualche modo ostile, come un impianto di luce artificiale, può compromettere l'interscambio genetico fra popolazioni.

L'illuminazione artificiale, come ogni tipo di stress antropogenico, rappresenta per le specie viventi un fattore di pressione selettiva. Sulle risposte che nel tempo le specie e le comunità sono destinate ad attivare come reazione a tale pressione, esistono più che altro ipotesi, dal momento che l'introduzione dell'illuminazione notturna è un evento avvenuto in tempi recenti. Nel caso delle farfalle notturne l'illuminazione artificiale potrebbe rappresentare un fattore di declino per le specie più sensibili all'attrazione verso le fonti luminose che vivono in aree urbane e suburbane (Frank, 2006). In compenso, verrebbe favorita l'ulteriore espansione di specie già ben diffuse e addirittura infestanti, come ad esempio il defogliatore *Lymantria dispar* L., la cui femmina ha capacità di volo pressoché nulle e dunque non risulta sensibile all'attrazione verso fonti luminose.

Ultimo in ordine di trattazione, ma non certo di sensibilità nei confronti dell'inquinamento luminoso, è il gruppo dei Coleotteri Lampiridi (Fig. 2). La comunicazione luminosa delle lucciole si è evoluta

in relazione ai costumi crepuscolari o notturni di questi animali fotofobi. Gli impulsi luminosi sono efficaci come strumenti di comunicazione nella misura in cui hanno come sfondo il buio della notte. Ne consegue che per le lucciole l'urbanizzazione, e il relativo aumento dei livelli di luminosità rappresentano fattori di criticità (Lloyd, 2006). Come emerge da uno studio condotto nell'area urbana torinese, *Luciola italica* L. mal sopporta valori di illuminamento superiori a 0,1 lux (Picchi *et al.*, 2013). Anche le specie di Lampiridi dell'area urbana di Campinas, Sorocaba-Votorantim e Rio Claro (Brasile) studiate da Viviani *et al.* (2010) non tolleravano valori superiori a 0,2 lux. In molti casi le lucciole sono sensibili anche a lievi variazioni dell'intensità luminosa. I maschi di *Luciola italica* iniziano il loro volo serale nelle aree più ombreggiate e dunque più buie, come ad esempio il sottobosco e solo successivamente, con il calare della notte, si muovono negli spazi aperti (Camerini, dati non pubblicati). Nel caso di *Photinus* sp. è stato osservato che persino l'altezza del volo cambia in relazione al livello di luminosità, con gli individui che innalzano la loro traiettoria di volo in risposta all'aumento dell'oscurità (Lloyd, 2000). Un altro aspetto che può condizionare la sensibilità alla luce artificiale è lo spettro di emissione luminosa. Nel corso della storia naturale si sono consolidate due linee evolutive: i Lampiridi che sono attivi nelle ore crepuscolari emettono luce giallastra, mentre le specie notturne tendono ad emettere in prevalenza luce verdastra. In relazione al tipo di emissione, può variare la risposta alle sorgenti luminose artificiali: per le specie che emettono impulsi sulla lunghezza d'onda del giallo, ad esempio, lampade ai vapori di sodio possono



**Fig. 2.** Le lucciole (in foto *Luciola* sp.) sono particolarmente sensibili agli effetti dell'inquinamento luminoso (foto Stella Verdi).

essere particolarmente disturbanti (Lloyd, 2006).

### Pesci

Oltre la metà della popolazione umana vive in aree localizzate a meno di 100 km dalle coste marine; ben diffusi sono anche gli agglomerati urbani che si affacciano su laghi e fiumi. Le sorgenti di inquinamento luminoso potenzialmente disturbanti per la ittiofauna sono innumerevoli: l'illuminazione dei quartieri disposti lungo la costa, i pontili, le piattaforme petrolifere, le lampare utilizzate per la pesca sono solo alcuni esempi. La fauna ittica è dunque esposta ai possibili effetti dell'inquinamento luminoso, anche in ragione della sensibilità dei pesci alla luce naturale: solo per fare un esempio, in acque lacustri la migrazione orizzontale (dalla zona pelagica a quella litoranea e viceversa) delle due specie di ciprinidi *Phoxinus eos* Cope e *Phoxinus neogaeus* Cope è influenzata in maniera significativa dalle fasi lunari (Gaudeau e Boisclair, 2000), così come i periodi di riproduzione di *Leuresthes tenuis* Ayres (Ateriniformi, Aterinidi) della California sono legati alle maree sizigiali (luna piena) allorché emergono per brevissimi periodi deponendo e fecondando le loro uova sulla sabbia scoperta (Ricciutti, 1978).

La risposta dei Pesci agli stimoli luminosi è specie-specifica e

può variare anche nell'arco del ciclo vitale dell'individuo. Tra i Salmonidi specie come *Oncorhynchus kisutch* Walbaum, *Salmo salar* L. e *Oncorhynchus mykiss* Walbaum vivono nelle acque dei torrenti dove tendono a rimanere quiescenti nelle ore notturne (Godin, 1982). Al contrario, altri Salmonidi che utilizzano come habitat riproduttivo le acque degli estuari, quali *Oncorhynchus gorbuscha* Walbaum oppure *Oncorhynchus keta* Walbaum, hanno abitudini notturne. Prove di laboratorio durante le quali le diverse specie sono state esposte a luce artificiale hanno dimostrato che mentre specie diurne come *O. kisutch* rimangono quiescenti o reagiscono con scarsi movimenti, specie con abitudini notturne come *O. gorbuscha* e *O. keta* reagiscono iniziando a nuotare nervosamente in risposta all'accensione delle luci dopo essere stati esposti a condizioni di oscurità (Hoar *et al.*, 1957). La risposta all'impulso luminoso è condizionata dai meccanismi di adattamento dell'occhio che hanno luogo quando si passa dall'oscurità alla luce e viceversa. I meccanismi e i tempi di adattamento dipendono sia dall'intensità che dalla lunghezza d'onda della sorgente luminosa (Ali, 1962; Protasov, 1970). La diversa durata del periodo richiesto per l'adattamento è a sua volta un fattore di importanza non trascurabile poiché in coincidenza con essa l'animale passa da una fase di cecità a una di ridotta acutezza visiva. Gli studi di Protasov (1970) sugli avannotti di *O. gorbuscha* e *O. keta* indicano che il tempo richiesto per adattarsi all'oscurità dopo esposizione alla luce variano da 30 a 40 minuti, mentre il percorso inverso richiede un tempo variabile fra 20 e 25 minuti. Con il procedere della crescita, i salmoni sono in grado di rispondere alla variazione di luminosità con tempi di adattamento

più rapidi. Sulla base di queste osservazioni appare evidente che l'esposizione a fonti luminose artificiali è destinata ad avere effetti diretti che coinvolgono la sfera comportamentale dei Pesci.

La luce stroboscopica, che viene installata lungo sbarramenti artificiali o cime di ancoraggio delle imbarcazioni, produce rapidi impulsi intermittenti che sono molto disturbanti per la fauna ittica. La retina non è in grado di attivare alcun meccanismo di adattamento in ragione della brevità dello stimolo luminoso. Nemeth e Anderson (1992) hanno osservato una reazione di allontanamento da parte delle forme giovanili di *O. kisutch* e *Onchorhynchus tshawytscha* Walbaum posti in acque dove la sola fonte luminosa era la luce stroboscopica. Si ipotizza che altre fonti luminose caratterizzate da impulsi di breve durata, come ad esempio i flash derivanti dalle luci dei fanali dei veicoli che transitano lungo strade costiere, possano ugualmente funzionare da fattori di disturbo.

Anche nel caso dei Pesci la sensibilità nei confronti della luce artificiale è influenzata dallo spettro di emissione. I Pesci Teleostei di acqua dolce sono sensibili alle lunghezze d'onda corrispondenti al rosso e al giallo, le più comuni negli ambienti fluviali e lacustri. Le specie marine mostrano invece sensibilità nei confronti del blu (Folmar e Dickhoff, 1981). Le forme giovanili di salmoni sono attratte da luce emessa da lampadine a bulbo fluorescente o incandescente mentre *Rutilus rutilus* L. reagisce in modo contrario all'esposizione a luce fluorescente (Van Anholt *et al.*, 1998). Esistono poi sorgenti luminose che tendono a stimolare risposte che non sono specie-specifiche, come le lampade a vapore di mercurio, verso le quali in genere le specie ittiche mostrano un tropi-

simo positivo, fenomeno questo che ne giustifica l'uso come attrattivi all'entrata dei canali di by pass realizzati sulle dighe per salvaguardare la fauna ittica.

Per quanto riguarda le dinamiche preda-predatore, esistono osservazioni che documentano ad esempio l'attrazione delle luci di sicurezza nei confronti di *Squalus acanthias* L. che vi si avvicina in maniera opportunistica per sfruttare l'aggregazione delle sue potenziali prede. Sempre in prossimità di luci di sicurezza è stato osservato anche un incremento di predazione a danno di *Clupea harengus pulasi* Valenciennes e *Ammodytes hexapterus* Pallas (Prinslow *et al.*, 1980).

Anche la migrazione è un aspetto della biologia dei pesci che può risultare condizionato dal fenomeno dell'inquinamento luminoso. Studi in proposito sono stati condotti soprattutto sui salmoni. Le forme giovanili migrano attraverso torrenti e fiumi per raggiungere l'oceano, spesso nuotando nelle ore notturne. I salmoni mostrando abitudini notturne anche quando tornano verso le acque dolci da adulti. La presenza di luci artificiali lungo il percorso può incidere sul successo della migrazione, aumentando il rischio di predazione o interrompendo il movimento dei pesci. Tabor *et al.* (2001) hanno rilevato effetti diretti sulle forme giovanili di *Onchorhynchus nerka* Walbaum: luci artificiali collocate su ponti ed edifici ne rallentavano il movimento migratorio. Analoghe indicazioni sono emerse da osservazioni sul nuoto di *Onchorhynchus keta* attraverso un canale illuminato lungo le sponde. Ulteriore conferma del fenomeno viene anche dagli studi di Ali (1959) sulle forme giovanili di *O. nerka*; la migrazione di questa specie aveva inizio quando il livello di luminosità scendeva

al di sotto di 1 lux; valori di 32 lux producevano un azzeramento quasi totale del movimento migratorio.

### Anfibi Anuri e Urodeli

La gran parte degli Anuri ha abitudini notturne; questa caratteristica biologica determina una spiccata sensibilità nei confronti dell'inquinamento luminoso che può anzitutto condizionare i comportamenti gregari. A tale proposito Baker (1990) ha dimostrato che la presenza di luci stradali tende a favorire l'aggregazione di individui di rospo comune (*Bufo bufo* L.) in risposta alla facilità di cattura di prede (insetti) che si addensano in prossimità dei lampioni dai quali sono attratti. L'aggregazione del rospo comune aumenta il rischio di predazione e di investimento da parte di veicoli a motore. Anche l'aggregazione degli individui in fase di canto corale può risultare condizionata: l'aumento dei livelli di luminosità, ad esempio, tende a inibire il canto corale della raganella *Hyla squirella* Bosc (Buchanan, 1993). Per quel che concerne gli effetti sui comportamenti anti-predatori, da Silva-Nune's (1988) ha dimostrato che i maschi di *Smilisca sila* Duellman e Trueb tendono a modulare la loro attività di canto scegliendo postazioni tanto più esposte quanto maggiore è il livello di luminosità, così da ampliare il loro orizzonte visivo e meglio eludere le possibili insidie derivanti dai pipistrelli predatori di Anfibi.

Alterazioni dei comportamenti riproduttivi degli Anfibi Anuri emergono invece dalle ricerche condotte da Rand *et al.* (1997). L'incremento dei livelli di luminosità condiziona le femmine in fase di scelta dei maschi, per effetto di un'accresciuta percezione del rischio di predazione; ne consegue una preferenza per la deposizione delle uova in microhabitat che siano il meno

esposti possibile, come risposta al crescere dei livelli di luminosità degli ambienti riproduttivi.

Incrementi anche minimi di luminosità possono alterare i ritmi di attività di *Ascaphus truei* Stejneger (Hailman, 1982). Variazioni nella lunghezza della fotofase (fase luminosa del fotoperiodo) sono ugualmente negative, in ragione del fatto che possono condizionare i meccanismi di regolazione ormonale e le attività riproduttive. Se ad esempio la naturale alternanza di periodi di luce e buio viene ad essere soppressa per effetto dell'illuminazione artificiale nelle ore notturne, la spermatogenesi può essere inibita. È quanto rilevato da Biswas *et al.* (1978) che sottoponendo individui di *Bufo bufo* a un regime di illuminazione costante hanno registrato un dimezzamento della spermatogenesi.

L'alterazione del fotoperiodo può avere anche altri effetti mediati da variazioni ormonali. Lo studio di Green *et al.* (1999) ha preso in esame la produzione della notturnina in *Xenopus laevis* Daudin. Sintetizzata nella retina, questa molecola regola l'espressione dell'orologio biologico e la sua produzione è condizionata dalle variazioni del fotoperiodo.

Potenziali effetti riguardano anche il metabolismo della melatonina (Cancedo *et al.*, 1996) ormone che in specie come *Lithobates catesbeianus* Shaw, *Pelophylax ridibundus* Pallas, *X. laevis* controlla funzioni come la variazione della pigmentazione cutanea, lo sviluppo delle gonadi, l'attività riproduttiva. La sintesi della melatonina è controllata dall'enzima N-acetiltransferasi (NAT) la cui attività varia in relazione alle stagioni, come dimostra uno studio italiano (d'Istria *et al.*, 1994) sulla rana verde (*Rana esculenta* L.). Esposizioni alla luce artificiale anche di breve durata -nell'ordine

dei minuti- nel corso della scotofase, possono inibire l'attività di questo enzima e sopprimere di conseguenza la produzione di melatonina (Lee *et al.*, 1997).

Effetti sulla pigmentazione cutanea sono stati osservati nelle salamandre, come nel caso delle larve di *Ambystoma tigrinum* Green allevate in condizioni di alterato fotoperiodo (Banta, 1912); il fenomeno è riconducibile ad un'anomala produzione di melatonina. Come in altri Vertebrati, la produzione di melatonina tende ad aumentare durante la scotofase, per poi declinare durante le ore di luce. Sulla base di questo principio Wise e Buchanan (2006) ritengono che la luce artificiale inibisca la produzione di questo ormone e che l'entità del fenomeno sia condizionata dall'intensità della luce. Anche il tasso metabolico mostra una dipendenza dal fotoperiodo; se con lampade fluorescenti a bulbo (15 W) si aumenta il fotoperiodo da 8 a 16 ore (Whitford e Hutchinson, 1965) si ottiene un'accelerazione del metabolismo. Secondo i due autori, fotoperiodo, temperatura e tasso respiratorio variano ciclicamente in relazione alle stagioni; temperatura e fotoperiodo potrebbero quindi regolare i tassi metabolici in maniera sinergica.

Altro meccanismo biologico che può subire alterazioni è il ritmo che regola le migrazioni verticali negli ambienti acquatici di vita di alcune specie di Urodela, quali ad esempio *Ambystoma opacum* Gravenhorst, *Ambystoma tigrinum*, *Ambystoma jeffersonianum* Green (Stangel e Semlitsch, 1987). I ritmi che regolano l'allontanamento dal fondale (che funziona da rifugio) e la periodica emersione verso la superficie sono influenzati dai livelli di illuminazione, oltre che da altri fattori, come il rischio di predazione o la temperatura (Anderson e

Graham, 1967). È nelle fasi di risalita che le larve trovano nella colonna d'acqua il plancton che rappresenta il loro nutrimento e dunque un'alterazione dei ritmi di rifugio/immersione ha indirettamente effetti sui tempi di sviluppo della larva. Il già citato studio di Anderson e Graham (1967) documenta un'inibizione della migrazione verticale delle larve di *Ambystoma* sp. in risposta alla luce proiettata da una lampada sulla superficie dell'acqua, fenomeno che si traduce in una riduzione della taglia degli animali metamorfosati e del loro tasso di sopravvivenza.

Con il calare della notte, lo spettro della luce prodotta dai corpi celesti è caratterizzato dalle frequenze del visibile, con una certa prevalenza del rosso (Massey *et al.*, 1990). A questo debole fondo naturale si possono sovrapporre gli spettri luminosi che derivano dall'illuminazione artificiale (Cinzano *et al.*, 2001a) come il giallo delle lampade a vapore di sodio a bassa (589 nm) e alta pressione (da 540 a 630 nm) o il giallo (545-575 nm) e il blu (405-436 nm) delle lampade a vapori di mercurio. Tra le salamandre, la sensibilità alle diverse lunghezze d'onda luminose varia non solo da specie a specie, ma anche nell'ambito di una stessa specie, in funzione dello stadio vitale (larva/adulto). La capacità di ricezione degli stimoli luminosi inoltre non risiede solo nella retina, ma anche in fotorecettori extraoculari che hanno sede nell'organo pineale (Philips *et al.*, 2001). Le risposte sono di norma specie-specifiche; in laboratorio si è dimostrata ad esempio una diversa sensibilità di *Plethodon cinereus* Green e *Plethodon glutinosus* Green nei confronti delle principali sorgenti di luce artificiale (Vernberg, 1955).

Anche il comportamento di *homing* può risentire delle variazio-

ni dei livelli di luminosità. In popolazioni di *Notophtalmus viridescens* Rafinesque, specie che vive in stagni, laghi e fiumi, gli individui si trasferiscono periodicamente da un corpo idrico all'altro in risposta a condizioni ambientali locali: gli adulti abbandonano gli stagni in inverno per ibernare in rifugi terrestri, in risposta a situazioni di stress quali il disseccamento dei corpi idrici, il pullulare di ectoparassiti, l'aumento eccessivo di temperatura delle acque (Gill, 1978). La specie ha una spiccata fedeltà al corpo idrico che le fa da habitat, dal momento che gli adulti hanno dimostrato di saper tornare allo stagno nel quale sono cresciuti anche quando sperimentalmente trasferiti ad altro corpo idrico (Gill, 1978). È stato dimostrato che questa abilità da parte di *N. viridescens* nel processo di *homing* è da porre in relazione al possesso di una bussola magnetica il cui funzionamento è influenzato dallo spettro luminoso (Deutschlander *et al.*, 1999) nonché dalla sensibilità alla luce polarizzata. Analogo meccanismo di orientamento spaziale è stato evidenziato anche per *Ambystoma tigrinum* Green (Taylor e Adler, 1973). Philips e Borland (1992a) hanno dimostrato l'influenza che lo spettro luminoso può avere su questo meccanismo di orientamento con un test di laboratorio che ha riprodotto fedelmente il campo magnetico terrestre. In presenza di una fonte luminosa caratterizzata da frequenze nel campo dell'infrarosso (> 700 nm) gli individui di *N. viridescens* mostravano evidenti difficoltà di orientamento, capacità che invece si manifestava correttamente in risposta all'esposizione ad uno spettro luminoso completo prodotto da una lampada allo xenon da 150 W. La capacità di orientamento cambia in risposta al variare delle lunghezze d'onda: frequenze comprese fra 400 nm e

450 nm, ad esempio, sono compatibili con una piena capacità orientativa, al contrario di frequenze intorno a 550 nm e 600 nm (Philips e Borland, 1992b). L'effetto distruttivo di sorgenti luminose a lunga frequenza e monocromatiche sul meccanismo di orientamento magnetico utilizzato da *N. viridescens* è stato documentato sperimentalmente da Philips e Borland (1994). Ad avere queste caratteristiche sono modelli di lampade largamente impiegate per l'illuminazione notturna, come quelle al vapore di sodio a bassa e alta pressione.

### Rettili

Le ricerche sulla biologia riproduttiva delle tartarughe marine nidificanti in Florida e sull'orientamento dei piccoli sono forse l'esempio della più compiuta indagine scientifica nell'ambito degli studi sugli effetti dell'inquinamento luminoso. Sulle coste della Florida si riproducono *Caretta caretta* L., *Chelonia mydas* L. e *Dermochelys coriacea* Vandelli. Nel caso di *C. caretta*, si stima la presenza di 70.000 nidi, equivalenti all'80% della capacità riproduttiva della specie nell'ambito delle acque dell'Atlantico occidentale (Meylan *et al.*, 1995). Gli sforzi finalizzati alla conservazione delle aree riproduttive -localizzate principalmente sulle coste meridionali della penisola- devono misurarsi con la crescente pressione antropica degli ultimi decenni: a partire dal 1920 la popolazione umana è aumentata da 1 milione di abitanti a oltre 16 milioni, con un tasso di crescita pari a 2,5 volte l'aumento demografico registrato nel resto degli U.S.A. (Salmon, in Rich e Longcore, 2006). L'urbanizzazione della linea costiera e il relativo sviluppo di strutture ricettive a servizio del turismo hanno aumentato in misura esponenziale l'inquinamento luminoso.

Fino ad oggi le azioni conservazionistiche attuate hanno favorito un incremento delle popolazioni nidificanti di *C. mydas* e *D. coriacea* (Salmon, 2006), ma è un risultato difficile da consolidare in prospettiva futura per l'incombere di una serie di minacce, fra le quali spicca l'inquinamento luminoso.

Le tartarughe scelgono per la deposizione delle uova spiagge remote e buie. La scelta dei siti riproduttivi è condizionata dal fattore fedeltà. Esperimenti di marcatura, cattura e trasferimento forzato delle femmine ovideponenti dimostrano che nell'arco di ore o di giorni le femmine tornano a deporre sulla spiaggia dalla quale erano state prelevate (Luschi *et al.*, 1996). Di stagione in stagione le femmine nidificano sulle spiagge dove sono nate; l'imparentamento delle femmine che scelgono per la deposizione le medesime spiagge è dimostrato dal possesso di una composizione del DNA mitocondriale simile. L'ipotesi è che le tartarughe femmine neonate riescano a memorizzare la posizione della spiaggia sulla quale schiudono, per poi tornarvi di anno in anno a deporre le uova. Per localizzare l'area di origine e più in generale per orientarsi giovani e adulti utilizzerebbero la loro sensibilità ai campi magnetici, integrata con le capacità di orientamento visivo (Avens e Lohmann, 2004). Nella scelta del sito riproduttivo entra in gioco tuttavia anche l'influenza di certe caratteristiche delle spiagge, come ad esempio microclima, pendenza, prossimità dei litorali alle correnti oceaniche marine in grado di favorire la dispersione delle giovani tartarughe o infine assenza di ostacoli nelle acque litoranee, come scogli o banchi corallini, che possono rendere difficile alle femmine l'accesso alle spiagge. L'ovideposizione, che richiede ore, avviene di notte, quando le tempera-

ture sono più basse e le minacce dei predatori meno insidiose. Una volta emersi sulla superficie della spiaggia dopo la schiusa delle uova (evento che di solito si verifica nelle ore notturne) i nidiacei devono dirigersi rapidamente verso il fronte della battaglia per prendere il largo. Il movimento è mediato da stimoli visivi, in primis dal riconoscimento dell'orizzonte piatto della distesa marina, vale a dire quella porzione di orizzonte che in misura maggiore veicola la luce proveniente dagli astri.

Spesso l'inquinamento luminoso agisce come fattore di stress ambientale in sinergia con altri fattori critici di natura antropogenica; nel caso delle tartarughe marine della Florida, ad esempio, il degrado del paesaggio delle dune. In taluni casi è stato valutato l'impatto della luce artificiale disgiunto da questi fattori di disturbo; è il caso della ricerca di Witherington (1992) condotta su una spiaggia della Florida che ospita una colonia nidificante di *Caretta caretta* e su di una spiaggia conservata in condizioni del tutto naturali del Costa Rica dove depone *Chelonia mydas*. L'esposizione a lampade al vapore di mercurio comprometteva per la quasi totalità l'ovideposizione da parte delle femmine di ambo le specie. L'uso di lampade al vapore di sodio a luce gialla quasi monocromatica aveva invece effetti trascurabili. Sulle coste della Florida le deposizioni si addensano generalmente in coincidenza con le spiagge delle aree meno urbanizzate. Nei (rari) casi in cui i nidi sono realizzati nelle aree più antropizzate, il sito risponde comunque a condizioni locali di scarso disturbo. Nel caso della colonia riproduttiva di Boca Raton, ad esempio, la nidificazione ha luogo in prossimità di alcuni edifici molto alti e poco utilizzati durante l'estate che fungo-

no da schermo nei confronti della luce proveniente dalla costa (Salmon *et al.*, 1995). Più in generale, dal monitoraggio dei nidi attuato negli scorsi decenni emerge una tendenza da parte delle tartarughe marine a concentrare le deposizioni sulle spiagge meno interessate dall'inquinamento luminoso.

Se la progressiva riduzione dei litorali utilizzabili come habitat riproduttivi è preoccupante, non meno problematico è l'effetto della luce artificiale sull'orientamento dei nidiacei dopo la schiusa (Lorne e Salmon, 2007). Gli individui di *Caretta caretta* appena schiusi si orientano sulla base di una sensibilità a particolari lunghezze d'onda vicine all'ultravioletto (violetto, blu), percependo la maggiore intensità di queste componenti in mare rispetto alla terraferma (Kawamura *et al.*, 2009). Si stima (Witherington, 1992) che ogni anno sulle coste della Florida centinaia di migliaia di tartarughe appena schiuse periscano nel vano tentativo di prendere il largo: disidratazione, indebolimento e predazione sono favoriti dalla luce artificiale che induce le giovani tartarughe a orientarsi verso terra e non verso il mare, facendo loro disperdere molte energie in movimenti non correttamente orientati quando, dopo la schiusa, dovrebbero dirigersi verso le acque marine. Con l'intento di risolvere il problema, l'azienda che gestisce il servizio di illuminazione pubblica elaborò in passato appositi filtri in grado di schermare le lampade ai vapori di sodio ad alta pressione, ritenute la causa del problema. L'utilizzo di tali dispositivi fu però introdotto prima che l'effettiva efficacia degli stessi fosse sperimentalmente comprovata. Quando test di laboratorio furono effettuati, risultò che in realtà i filtri posti sulle lampade a vapori di sodio non le rendevano meno attrattive nei con-

fronti nei nidiacei e che tale attrazione dipendeva non solo dalla composizione spettrale della fonte luminosa, ma anche dalla sua intensità (Nelson, 2002). Buoni risultati furono invece ottenuti realizzando sperimentalmente un tratto di 1 km di illuminazione stradale con diodi luminosi collocati ad altezza suolo, lungo la linea di costa, in alternativa alla ordinaria disposizione fuori terra dei lampioni (Bertolotti e Salmon, 2005). A differenza dell'impianto di illuminazione artificiale con lampioni, i diodi a livello suolo non interferivano con il corretto orientamento dei nidiacei verso la battaglia. La collocazione del sistema di illuminazione a terra rappresenta dunque una possibile soluzione (se pure parziale) del problema; l'uso dell'aggettivo parziale è d'obbligo perché, se è vero che la rimozione delle luci artificiali lungo la linea di costa è una misura utile, resta il problema dell'inquinamento da luce diffusa, che può anch'esso disturbare il corretto orientamento dei giovani di tartaruga (Bertolotti e Salmon, 2005).

I Rettili includono sia specie attive nelle ore diurne, come ad esempio le lucertole, che specie con spiccate abitudini notturne, quali ad esempio i geki (Fig. 3). Nei confronti delle prime la presenza di luci artificiali può avere come effet-



Fig. 3. In tutto il mondo i geki si sono adattati a cacciare insetti in prossimità di fonti luminose artificiali (foto Cristina Verdi).

to potenziale quello di estendere i ritmi di attività anche alle ore crepuscolari o notturne. Il fenomeno è stato definito da Garber (1978) “*night-light niche*”. Secondo Henderson e Powell (2001) nell’India occidentale il 20% delle iguane (67 specie) e l’11% degli Ofidi (18 specie) si sono adattate a vivere in ambienti domestici e sono attive anche di notte in aree illuminate artificialmente. Di queste, nove specie fra le iguane e una fra i serpenti avevano in origine abitudini diurne. Perry e Fisher (2006) elencano ben 19 lavori reperibili in letteratura che riguardano specie diurne di Gekoni, Iguanidi e Colubridi adattatesi a sfruttare a scopo alimentare le fonti di illuminazione artificiale nel corso delle ore notturne: tra i Geki, vi sono ad esempio *Gehyra mutilata* Wiegmann, *Gehyra oceanica* Lesson, *Lepidodactylus lugubris* Dumeril e Bibron, *Thecadactylus rapicauda* Houttuyn. In talune aree le popolazioni legate all’ambiente domestico sono addirittura più abbondanti rispetto a quelle insediate negli habitat originari. È il caso, ad esempio, di *Hemidactylus mabouia* Moreau de Jonnes, che sull’isola di Guana (Isole Vergini) è molto comune intorno alle abitazioni mentre in compenso è difficilmente osservabile negli ambienti forestali, che pure rappresentano il suo habitat naturale (Rodda *et al.*, 2001). In California la densità di geki in ambiente urbano è tale da avere suggerito a Canyon e Hii (1997) di avviare una ricerca finalizzata a valutare il possibile utilizzo di questi insettivori nella lotta biologica contro le zanzare.

La luce artificiale, tuttavia, più spesso costituisce un fattore critico per i Rettili: Gramentz (2008) la annovera tra le cause del declino di *Crocodylus porosus* Schneider, specie a distribuzione indopacifica. Effetti negativi emergono

anche dagli studi condotti in California da Case e Fisher (2001); da un confronto con dati storici sulla distribuzione degli ofidi *Arizona elegans* Kennicott e *Rhinocheilus lecontei* Baird e Girard è emerso che il declino di queste due specie appare correlato al gradiente di luminosità che si registra nelle ore notturne. Non si evidenzia analogo trend negativo in aree rurali della California, dove l’inquinamento luminoso è significativamente inferiore (Sullivan, 2000). Si ipotizza che il declino di *A. elegans* sia in realtà da ricondurre alla rarefazione lungo la fascia costiera meridionale della California della sua principale preda, vale a dire il micromammifero *Perognathus longimembris* Coues, rarefazione imputabile proprio all’inquinamento luminoso. Altre osservazioni sulle risposte alle variazioni dei livelli di luminosità notturna da parte di quelle che possono essere le prede dei Rettili, ovvero i roditori (Kotler *et al.*, 1984) o gli scorpioni (Skutelsky, 1996) avvalorano l’idea che il declino demografico di alcune specie di Rettili in aree soggette a intenso inquinamento luminoso sia da porre proprio in relazione con alterazioni delle dinamiche preda-predatore.

L’inquinamento luminoso può infine condizionare i meccanismi di competizione interspecifica. Lo dimostra lo studio di Petren *et al.* (1993) in cui sono state esaminate due specie di geki (*Hemidactylus frenatus* Duméril e Bibron e *Lepidodactylus lugubris* Duméril e Bibron) che vivono nelle abitazioni. L’indicazione che emerge dalla ricerca è che le specie tendono a entrare in competizione diretta solo quando la presenza di fonti di luce artificiale tende a favorire una densa concentrazione degli insetti, che costituiscono le loro prede.

## Uccelli

Durante il volo notturno gli Uccelli dirigono la loro rotta sulla base di differenti stimoli sia magnetici che visivi; quando tra questi ultimi si interpone una fonte di luce artificiale, il risultato è anzi tutto un disorientamento rispetto alla corretta direzione di volo. Essi vengono inoltre attratti da fonti luminose puntiformi come i fari, con il rischio di collisione che ne deriva, subendo quella che Verheijen (1985) definisce una “cattura” che porta gli animali a volare lungo traiettorie circolari intorno alle luci artificiali, prima di planare a terra e soffermarsi nei pressi della sorgente luminosa. Fenomeno questo che trova citazione anche da parte di Eugenio Montale nella sua celebre lirica “Dora Markus”:

«... *La tua inquietudine mi fa pensare agli uccelli di passo che urtano ai fari nelle sere tempestose...*»

L’avvicinamento alla fonte di luce produce un momentaneo accecamento in conseguenza del fatto che gli occhi degli uccelli in volo sono adattati a condizioni di oscurità. Esiste altresì evidenza del fatto che anche la luce diffusa dalle aree urbane, quella che nella letteratura anglosassone è detta “*horizon glow*”, può risultare attrattiva. Esperimenti eseguiti in laboratorio sul passeriforme *Zonotrichia leucophrys* Forster (Williams, 1978) documentano come l’effetto disturbante della luce diffusa si manifesti in misura diversa in relazione all’età degli individui: quelli immaturi mostrano un evidente disorientamento, a differenza degli adulti. Luci d’orizzonte sono inoltre un ben noto fattore di attrazione per uccelli testati in “gabbie d’orientamento” come gli imbuti di Emlen, deviando le scelte direzionali dalla giusta rotta di migrazione (Baldaccini e Bezzi, 1989).

L’influenza esercitata dalle

luci artificiali disposte lungo la costa (fari) o in mare aperto (es. luci di navi) sugli uccelli marini o su altre specie ornitiche in fase di migrazione è nota già da fine '800, tanto da costituire un elemento utile allo studio delle rotte migratorie (Gauthreaux e Belser, 2006). Una ricerca svolta nel secolo scorso prese in esame 45 fari costieri sulla costa della Columbia Britannica, evidenziando che nove di essi risultavano pericolosi per gli uccelli in transito, tanto da causare la morte di circa 6.000 esemplari/anno (Munro, 1924). Un'altra indagine (Merriam, 1885) sui fari disposti sulle coste degli Stati Uniti e dell'America centrale e meridionale rivelò che il fenomeno delle collisioni non si manifestava in maniera omogenea, ma interessava le aree di maggiore addensamento delle correnti migratorie, come ad esempio le coste settentrionali di Cuba.

Con il procedere dell'urbanizzazione è cresciuta la tendenza a costruire edifici di notevole altezza e questa caratteristica architettonica può costituire un problema per gli Uccelli. In un report del WWF canadese si legge che «... la collisione di uccelli migratori contro edifici e vetrate è un problema esistente su scala mondiale che si traduce in una mortalità annuale nell'ordine di milioni di individui nel solo Nord America» (Evans Ogden, 1996). Che il fenomeno sia di assoluta rilevanza lo testimonia il numero di ricerche ad esso dedicate: una monografia sull'argomento pubblicata da Avery *et al.* (1980) riporta oltre mille riferimenti bibliografici. L'altezza rappresenta un fattore critico anche per manufatti come le antenne e le torri utilizzate per la trasmissione di segnali radio o di altro tipo, come le luci di avvertimento per i mezzi aerei. In passato uno dei dispositivi di più largo utilizzo era dato dalla collocazione di

luci rosse continue alternate con luci lampeggianti del medesimo colore. A partire dal 1970 sono state introdotte anche luci bianche intermittenti e sincronizzate, disposte a diverse altezze. Allo stato attuale entrambi i dispositivi sono in uso. Gauthreaux e Belser (2006) hanno esaminato le traiettorie degli Uccelli che hanno sorvolato nella primavera e nell'autunno 1986 un'area della Georgia in cui è posta un torre alta 366 metri. Sulla torre erano collocate luci bianche intermittenti. Grazie a un confronto con un'area di controllo priva di luci artificiali, sono state rilevate differenze significative nelle traiettorie di volo, con la tendenza degli uccelli ad abbandonare traiettorie lineari in prossimità della torre per iniziare a girare intorno all'ostacolo o ad assumere un volo orientato secondo linee curve. Sempre nel corso del 1986 i medesimi ricercatori studiarono in parallelo la migrazione autunnale di uccelli che transitavano nei pressi di una torre per la trasmissione di segnali tv dotata di luci rosse e di una torre provvista invece di luci bianche a intermittenza in Sud Carolina, ponendole a confronto con un'area che fungeva da controllo. I risultati indicarono che in prossimità della torre con luci rosse gli uccelli deviavano la loro traiettoria avvicinandosi alle sorgenti luminose e il volo cessava di essere lineare; il fenomeno si manifestava con maggiore frequenza rispetto a quanto avveniva nei pressi della torre illuminata con le luci bianche intermittenti. Rispetto all'area di controllo, tuttavia, anche la torre con luci bianche, se pure in misura inferiore, interferiva con il volo migratorio. Sempre in tema di fonti luminose e qualità dell'orientamento, uno studio di Wiltschko e Wiltschko (2002) ha analizzato l'influenza delle frequenze luminose

con il meccanismo di magneto-ricezione che guiderebbe gli uccelli passeriformi durante la migrazione. Secondo questo studio, che ha preso in esame tre specie di passeriformi, frequenze corrispondenti alla componente blu-verde non hanno effetti significativi sul meccanismo di orientamento, al contrario delle componenti gialla e rossa.

Interferenze con le rotte migratorie possono venire dalle fiamme prodotte da raffinerie o pozzi metaniferi. Sage (1979) rilevò forti perdite di Uccelli in migrazione sul Mare del Nord che include numerose piattaforme per l'estrazione petrolifera. La pericolosità di quest'area è stata confermata in tempi più recenti da Poot *et al.* (2008). In letteratura è disponibile anche un'osservazione riferita al territorio italiano (Tornielli, 1951) e relativa a un pozzo metanifero in fiamme. Analogo pericolo è stato riscontrato anche nel caso di uccelli marini stanziali, uccisi per effetto delle ustioni provocate dalla fonte di calore che li aveva attratti (Wiese *et al.*, 2001; Burke *et al.*, 2005). Anche le luci delle imbarcazioni possono essere motivo di morte per collisione: negli inverni tra il 2006 e il 2009 sono stati documentati per le acque marine della Danimarca 41 episodi di collisione, che nel 78% dei casi avevano avuto luogo entro 4 Km dalla costa (Merkel e Johansen, 2011). Non meno pericolosi per le rotte migratorie sono gli impianti di illuminazione notturna a servizio degli aeroporti; a tal proposito va ricordato lo studio promosso dal Parco Lombardo della Valle del Ticino (Fornasari, 2002) sull'impatto dell'aeroporto di Malpensa. La struttura aeroportuale è disposta in un punto nevralgico, che interseca due importanti rotte migratorie autunnali che si dipartono dall'alta pianura dopo che gli Uccelli provenienti da nord hanno

volato attraverso le valli alpine. Da osservazioni svolte a partire dal 2000 risulta che l'illuminazione delle piste e delle torri di controllo interferisce in vario modo. Anzitutto il volo migratorio può subire uno stop in conseguenza del fatto che gli uccelli attratti dalle sorgenti luminose atterrano nei loro pressi. Sono inoltre possibili deviazioni delle rotte migratorie al punto da determinare, in alcuni casi, un'inversione del percorso.

La mortalità indotta dalle fonti artificiali di illuminazione è molto deleteria per specie il cui status conservazionistico è già precario per effetto di fattori di minaccia diversi dall'inquinamento luminoso. Nel caso degli Uccelli marini, Montevicchi (2006) stila un elenco di 9 specie minacciate per le quali è stata riconosciuta una particolare vulnerabilità. Nel caso di due rare specie endemiche delle Hawaii (*Puffinus newelli* Henshaw e *Pterodroma sandwichensis* Henshaw), ad esempio, i nidiacei possono soccombere per effetto delle luci artificiali nella fase in cui abbandonano il nido (realizzato nell'entroterra) e si dirigono per la prima volta verso la costa (Day *et al.*, 2003). Nell'isola hawaiana di Kauai fu accertato nel 1981 che la metà degli individui di queste specie periti per effetto dell'attrazione a luci artificiali era stata uccisa dall'impianto di illuminazione di un hotel posto in prossimità dello sbocco in mare del fiume Huleia, lungo la rotta che i nidiacei seguivano per portarsi dalle colonie di nidificazione verso la costa (Telfer *et al.*, 1987). La filtrazione e la riduzione della dispersione della luce verso l'alto determinò una netta riduzione dei livelli di mortalità. Incoraggiata da questo risultato, la Contea di Kauai attivò un programma finalizzato a filtrare le fonti di illuminazione artificiale allo scopo di tutelare gli uc-

celli nella fase più delicata, ovvero quella che coincide con l'involto degli uccelli giovani verso la costa (Day *et al.*, 2003).

Anche gli Uccelli che popolano gli ambienti terrestri sono potenzialmente esposti agli effetti negativi derivanti dall'esposizione alla luce artificiale, in particolar modo le specie legate agli ambienti aperti, come le praterie. Di particolare interesse, in tal senso, è uno studio condotto in Olanda (De Molenaar *et al.*, 2000) sugli effetti di un sistema di illuminazione stradale a carico della pittima reale (*Limosa limosa* L.) specie ben diffusa in Olanda. Questa specie è considerata un buon indicatore della capacità portante delle praterie umide nei confronti dell'avifauna. Fino al 1990 il contingente nidificante in Olanda (50.000 coppie) rappresentava la metà della popolazione mondiale e dunque la conservazione di questa specie nel territorio olandese è da considerare un'azione prioritaria. L'area scelta per lo studio (230 ettari di superficie) è gestita da un'associazione olandese per la conservazione della natura e in essa la densità delle coppie nidificanti (50 nidi/100 ettari) è la più elevata tra quelle rilevate su scala nazionale. L'area è attraversata da una strada a forte scorrimento (90.000 veicoli/anno). Diversa la conformazione del paesaggio agrario ai due lati della strada: a ovest un ambiente più aperto, con prevalenza di vegetazione erbacea bassa, a est una distesa di praterie schermata da siepi che funzionavano anche da filtro nei confronti delle luci stradali. Gli autori avevano la possibilità di spegnere le luci ai lati della strada e inoltre avevano posizionato una fila aggiuntiva di luci alimentate da un gruppo di generatori elettrici all'interno dell'area posta a est rispetto alla strada. Furono messi a confronto i dati sulla

nidificazione riferiti al 1998 (anno in cui furono tenute spente tutte le luci artificiali) e il 1999, anno in cui invece era funzionante sia l'illuminazione stradale che quella posizionata nell'area a est della strada. I risultati indicarono che l'illuminazione artificiale non determinava effetti significativi sulla consistenza della colonia riproduttiva e sulla distribuzione dei nidi. Il solo aspetto che sembrava risentire dell'inquinamento luminoso, per altro in misura contenuta, era quello legato alla fenologia in fase riproduttiva: i nidi disposti più vicini alle fonti luminose venivano realizzati più precocemente rispetto a quelli disposti a distanze crescenti dalle sorgenti luminose. Secondo gli Autori, la fedeltà al sito riproduttivo e la elevata qualità dell'habitat sono efficaci fattori di compensazione in grado di neutralizzare i possibili effetti perturbanti dell'inquinamento luminoso. In ambienti riproduttivi più soggetti a fattori di stress antropogenici di varia natura, invece, il disturbo dato dall'inquinamento luminoso non viene tamponato a dovere. Lo dimostrano gli studi di Reijnen (1995) sulla pittima reale che in contrasto con le risultanze di De Molenaar *et al.* (2000) hanno rilevato un impatto diretto dell'impianto di illuminazione artificiale a servizio di un tratto autostradale sulla scelta dei siti per la nidificazione.

### Mammiferi

La totalità dei pipistrelli, la gran parte dei roditori, i piccoli carnivori, il 20% dei Primati e l'80% dei marsupiali hanno abitudini notturne. Non poche specie di Mammiferi, inoltre, sono attive sia di giorno che di notte. Per diverse specie con abitudini notturne è stata accertata una sensibilità nei confronti dei livelli luminosi naturali correlata alle diverse fasi del ciclo

lunare (Beier, 2006). Al crescere del livello di luminosità che culmina con la fase di luna piena, si rilevano riduzione dell'attività o restrizione dell'area di foraggiamento, fenomeni che sarebbero da ricondurre alla necessità di compensare con una minore attività l'accresciuto rischio di predazione. Se la luce naturale ha questi effetti, non deve sorprendere il fatto che i Mammiferi siano un gruppo faunistico molto esposto anche agli effetti dell'inquinamento luminoso (Beier, 2006).

Come per altri Vertebrati, metabolismo e comportamento dei Mammiferi sono regolati da un orologio biologico sincronizzato da discontinuità ambientali giornaliere e/o stagionali. Per alcune specie di Ungulati, addirittura, è stata suggerita l'esistenza di cicli correlati alle diverse fasi lunari in grado di sincronizzare l'estro (Skinner e van Jaarsveld, 1987).

Nel corso dell'evoluzione, i cicli endogeni si sono modificati per massimizzare l'efficienza delle attività trofiche, ridurre il rischio di predazione, migliorare le cure parentali. Una loro non corretta sincronizzazione con gli eventi ambientali può dunque incidere su tutti questi aspetti della biologia di una specie. Esperienze di laboratorio dimostrano che esposizioni anche brevi -nell'ordine di 10-15 minuti- a luce da lampade a bulbo o incandescenti corrispondenti a livelli di luminosità pari a 0,3 lux possono determinare nei micromammiferi uno spostamento delle attività giornaliere nell'ordine di 1-2 ore (Halle e Stenseth, 2000). Variazioni nei ritmi di attività e dilazioni nell'ordine di 40' delle attività giornaliere sono state osservate altresì in condizioni di laboratorio anche per lo scoiattolo volante *Glaucomys volans* L. in risposta ad esposizione a luce artificiale (De Coursey, 1986). Il ritmo circadiano ha notevole im-

portanza sulla produzione di melatonina. Dauchy *et al.* (1997) hanno dimostrato che l'esposizione a luce anche di modesta intensità durante la notte può bloccare la produzione di questo ormone, favorendo la crescita di tumori in topi di laboratorio. Malgrado l'osservazione non riguardi animali selvatici, essa suggerisce l'ipotesi che la luce artificiale possa avere effetti significativi sullo stato fisiologico dei Mammiferi anche in natura. Si consideri che negli esperimenti sopra citati sono stati riprodotti livelli di luminosità molto bassi, inferiori o uguali a 1 lux, mentre in media gli standard di illuminazione stradali prevedono che il livello di illuminamento a terra sia di almeno 4 volte superiore.

In condizioni naturali, come ad esempio in risposta alle fasi di luna piena, i Mammiferi possono modulare la loro attività trofica concentrandola nelle ore più buie della notte, ma in risposta a luci artificiali fisse, questa forma di adattamento è impossibile. In tal caso gli animali possono essere costretti ad alimentarsi anche in prossimità di fonti luminose artificiali per fronteggiare periodi in cui il cibo è scarso, rinunciando temporaneamente alle loro attitudini foto-fobiche. È il caso ad esempio di *Hystrix indica* Kerr (Alkon e Saltz, 1988) che in tal modo si espone però ad un accresciuto rischio di predazione. Soluzione alternativa da parte di altre specie è quella di compensare l'aumentato rischio di predazione evitando qualsiasi attività di foraggiamento in condizioni di luminosità non ottimale, comportamento che in laboratorio è stato osservato nel caso di *Phyllotis darwini* Waterhouse (Vasquez, 1994). Se questo roditore viene esposto a un'intensità luminosa che simula quello della luna piena, esso reagisce trasferendo nel rifugio che

ha a disposizione -al riparo dalla luce- il 40% del cibo messo a disposizione, mentre tale comportamento è raro quando gli animali sono tenuti in condizioni di oscurità. L'ipotesi è che per alcune specie fotofobiche non esistano soluzioni adattative alla presenza di luci artificiali e dunque in tal caso la presenza di fonti luminose artificiali potrebbe significare una inevitabile restrizione delle aree di foraggiamento. Una conferma in tal senso sembra arrivare da due studi svolti in natura. Il primo (Kotler, 1984) ha documentato come la comunità di quattro specie di roditori viventi in ambiente desertico fosse influenzata in negativo dalla presenza di una fonte luminosa artificiale che determinava una riduzione pari al 21% della quantità di semi raccolti nell'area illuminata artificialmente. Il secondo (Bird *et al.*, 2004) è stato condotto sulla costa della Florida e ha preso in esame il roditore *Peromyscus polionotus leucocephalus* Howell. Lungo transetti illuminati da lampade a bassa pressione al sodio furono disseminati bocconi di cibo e la stessa operazione fu condotta in un'area buia che fungeva da controllo. La quantità di cibo raccolta lungo i transetti posti in condizioni di oscurità era significativamente superiore rispetto a quella che gli animali asportavano dai transetti esposti alla luce artificiale.

L'illuminazione stradale può condizionare il rischio di collisione dei Mammiferi contro i veicoli. In linea teorica, luci più intense dovrebbero ridurre la mortalità dando migliori possibilità al guidatore di vedere l'animale in fase di attraversamento e dunque di evitarlo. La realtà non sembra confermare questa ipotesi: il potenziamento dei sistemi di illuminazione stradale, che pure ha avuto luogo negli Stati Uniti, non ha sortito alcuna dimi-

nuzione degli incidenti da collisione con i cervi (Beier, 2006). La tipologia e l'intensità delle luci artificiali possono rendere difficoltoso per gli animali evitare le collisioni. I bastoncini presenti nell'occhio di molte specie di Mammiferi prettamente notturni vengono prontamente saturati dalla barriera di luce che affianca la sede stradale. Malgrado esistano Mammiferi notturni dotati anche di un rudimentale sistema a cono che può essere attivato nell'arco di pochi secondi, in quei secondi si determina un accecamento temporaneo che può risultare fatale. Per queste specie anche l'uso di lampade che riproducano le lunghezze d'onda della luce solare non produce vantaggi di sorta. In compenso, si ritiene che l'utilizzo di lampade al sodio a bassa pressione (589 nm) possa costituire il compromesso migliore per ridurre il rischio di collisione, dal momento che tali dispositivi garantiscono una buona visione da parte del guidatore e nel contempo sembrano minimizzare l'interferenza con il sistema visivo degli animali (Beier, 2006).

Un aspetto di notevole rilevanza sotto il profilo conservazionistico riguarda l'eventualità che l'inquinamento luminoso possa interferire con la continuità delle reti ecologiche. Studiando la popolazione di puma (*Puma concolor* L.) della California meridionale Beier (1995) ha scoperto che gli individui immaturi di questo felino durante i loro movimenti di esplorazione del territorio tendono a evitare percorsi che –pur più favorevoli per quanto riguarda la topografia e la struttura vegetazionale– sono interessati dal fenomeno della luce diffusa. In più occasioni gli animali mostravano di arrestare il loro percorso in presenza di barriere costituite da luci artificiali per aggirarle, transitando attraverso fasce di territo-

rio non illuminate.

I pipistrelli, animali simbolo della notte, si sono adattati in taluni casi in maniera opportunistica a sfruttare le luci artificiali per trarne un vantaggio diretto. Concentrando il loro volo intorno alle fonti luminose, sono in grado infatti di approfittare dell'addensamento di insetti attratti dalle sorgenti luminose (Rydell, 2006). Il fenomeno dell'attrazione dei pipistrelli e delle loro prede verso le luci artificiali si manifesta in tutto il Mondo e non sono poche le specie che ricavano buona parte del loro cibo proprio da questa modalità di predazione, che è da considerare un adattamento assai recente ed è prova di plasticità comportamentale. Poiché numerose specie di pipistrelli sono minacciate di estinzione (Patriarca e Debernardi, 2010) indagare le dinamiche di questa modalità predatoria è importante anche ai fini della loro conservazione. Per altro non va dato per scontato che tale abitudine sia unicamente portatrice di vantaggi. La luce artificiale infatti interferisce in fase di migrazione, aumenta il rischio di predazione, genera disordini metabolici legati alle variazioni degli orologi biologici. Inoltre l'attrazione verso le luci artificiali non è un fenomeno generalizzato all'interno del gruppo: esistono anzi specie di pipistrelli totalmente fotofobe che da esse si tengono lontane, come ad esempio le specie afferenti al genere *Myotis* sp. e *Plecotus* sp. (Furlonger *et al.*, 1987; Rydell, 1992). Analogo comportamento è esibito in Inghilterra da *Rhinolophus ferrumequinum* Schreber, il cui territorio di caccia può includere strade illuminate da lampade a vapori di mercurio, senza che però gli individui di questa specie si avvicinino alle sorgenti luminose (Jones *et al.*, 1995).

Tornando alle specie che sfruttano le luci artificiali per la preda-

zione di insetti, Rydell (2006) li classifica in tre categorie in relazione al tipo di volo. Alla prima appartengono le specie di taglia maggiore (da 30 a 100 grammi in peso, es. *Eumops perotis* Schinz o *Tadarida teniotis* Rafinesque) che perlustrano strati di atmosfera elevati disposti al di sopra di manufatti in grado di emettere verso l'alto fasci di luce diffusa, come ad esempio impianti sportivi o aeroporti. Il secondo gruppo comprende specie appartenenti ai Vespertilionidi (es. *Lasiurus* sp. o *Nyctalus noctula* Schreber) di media grandezza (10-30 grammi) che tipicamente volano seguendo traiettorie tendenzialmente rettilinee appena al di sopra delle file di lampioni stradali. Un terzo gruppo comprende le specie di taglia minore (< 10 grammi) che catturano gli insetti volteggiando intorno ai singoli lampioni o attraversando il cono di luce che gli stessi proiettano verso il basso. Queste specie di Chiroteri in grado di sfruttare la presenza della luce artificiale sono favorite dalla presenza di impianti di illuminazione realizzati con lampade ai vapori di mercurio e, in misura inferiore, con lampade ai vapori di sodio ad alta pressione, in ragione del fatto che sono queste le lampade più attrattive nei confronti degli insetti (Rydell, 1992).

Grazie all'introduzione dei *bat detector* e della tecnica *radio tracking* è stato possibile dimostrare che per talune specie la concentrazione di individui in caccia in prossimità di aree illuminate artificialmente è superiore a quella rilevabile in ambienti non illuminati. È quanto rilevato ad esempio per *Eptesicus nilssonii* Keyserling e Blasius e *Vespertilio murinus* L. in Scandinavia: la densità di queste specie in strade illuminate artificialmente era da 3 a 20 volte maggiore rispetto ad aree prive di lampioni (Rydell, 1992). In linea generale, tali

differenze si misurano soprattutto in aree abitate suburbane o rurali, dove la densità di pipistrelli in prossimità dei sistemi di illuminazione stradale è massima, mentre essa tende a diminuire nei centri cittadini, presumibilmente perché in essi è più bassa la densità di insetti intorno ai lampioni e maggiore è la disponibilità di punti luce.

Dallo studio appena citato svolto in Scandinavia da Rydell (1992) su *Eptesicus nilssonii* emerge che l'efficienza di cattura degli insetti intorno alle lampade è più bassa rispetto a quella che si registra al buio. La maggiore densità degli insetti in prossimità delle luci, tuttavia, compensa la minore efficienza e inoltre le prede sono più grandi: tipicamente farfalle notturne, mentre lontano dalle luci artificiali prevale la cattura di Ditteri e Coleotteri. Il risultato è che la quantità di cibo prelevata dai pipistrelli vicino ai lampioni (e l'energia da essa ricavabile) è maggiore di quella che gli stessi potrebbero ottenere in aree prive di luci artificiali. La maggiore facilità di cattura di prede più grandi in prossimità dei lampioni non è da mettere in relazione alla sola attrattività che essi esercitano sulle falene, ma anche al fatto che, come dimostra uno studio di Acharya e Fenton (1999), la luce artificiale, in particolare quella che proviene da lampade ai vapori di mercurio, inibisce i meccanismi di difesa degli insetti, come ad esempio il cambio della traiettoria di volo o il lasciarsi cadere a terra. Alcuni autori (Rydell, 1992; Arlettaz *et al.*, 2000) ipotizzano che alcune popolazioni europee di pipistrelli (es. *Eptesicus nilssonii* e *Pipistrellus pipistrellus* Kaup) siano in espansione proprio in risposta alla progressiva diffusione di impianti di illuminazione notturna. È un'ipotesi difficile da dimostrare per la difficoltà che si incontra nell'ot-

tenere stime numeriche affidabili. In letteratura esiste però una ricerca, condotta in alcune vallate della Svizzera, che dimostra come la realizzazione di nuovi impianti di illuminazione artificiale in un territorio possa favorire una specie a scapito di un'altra. In seguito all'introduzione di impianti di illuminazione notturna (Arlettaz *et al.*, 2000) la specie *Rhinolophus hipposideros* Bechstein (già vittima di un declino generalizzato nel suo areale) si è infatti estinta a vantaggio di *Pipistrellus pipistrellus*, a dimostrazione del fatto che gli effetti dell'illuminazione artificiale si possono manifestare anche a livello ecologico, alterando ad esempio le dinamiche di competizione fra le specie.

Di recente è stato dimostrato che *Myotis myotis* Borkhausen possiede un meccanismo bussolare magnetico (Wang *et al.*, 2007) utilizzato per l'orientamento, unitamente ad altri sistemi di riferimento, come le variazioni di luminosità del cielo legate al tramonto del sole, come accade per uccelli migratori su lunga distanza (Marchetti *et al.*, 1998). Questa scoperta, se confermata per altre specie di pipistrelli, renderebbe necessari studi più approfonditi per valutare l'interferenza dell'inquinamento luminoso e delle luci d'orizzonte in particolare con le strategie di orientamento presenti in questi micromammiferi.

Per i pipistrelli il rischio di essere predati può aumentare in condizioni di alterata luminosità. Lo dimostrano le osservazioni svolte in Piemonte da Debernardi *et al.* (2010): in ambienti usati come posatoi diurni e soggetti anche solo a una debole illuminazione la predazione di individui di *Myotis emarginatus* Geoffroy da parte della gazza (*Picapica* Brisson) determinava una dispersione delle colonie. L'intro-

duzione di luci artificiali in grotte o altri ambienti usati come posatoi diurni e invernali è annoverata fra i fattori che più di altri possono determinare come effetto l'abbandono del sito da parte dei pipistrelli e ciò rappresenta un fattore di cui tenere conto quando gli ambienti utilizzati come posatoi (es. grotte) sono meta di fruizione turistica (Laidlaw e Fenton, 1971). Un fattore di disturbo altrettanto importante è dato dalla collocazione di luci artificiali all'esterno degli accessi ai posatoi diurni attraverso i quali periodicamente i pipistrelli sono obbligati a transitare (Erkert, 1982). *Myotis emarginatus* può utilizzare come rifugio diurno edifici dotati di illuminazione esterna; in tal caso i giovani hanno un peso inferiore rispetto a quello dei nati in colonie non sottoposte all'interferenza della luce (Boldogh *et al.*, 2007). Secondo Patriarca e Debernardi (2010) si tratta di un danno significativo, dal momento che il peso al termine della fase di svezzamento è fondamentale in prospettiva della sopravvivenza nella successiva fase di ibernazione.

## CONCLUSIONI

L'impatto dell'inquinamento luminoso sui viventi è un problema ancora in parte sottovalutato e misconosciuto (Lyytimäki, 2013). Gli organismi regolano i loro ritmi di attività principalmente sulla base della disponibilità quotidiana e stagionale di luce solare e dunque la sua influenza sugli orologi biologici è notevole. Malgrado questa considerazione sia sorretta da numerose evidenze sperimentali, per decenni si è dato per scontato che la continua e crescente immissione di luce artificiale nella parte più bassa della troposfera potesse essere impunemente tollerata dalle componenti biologiche, specie umana compresa. Non poche evidenze epi-

demologiche documentano per altro danni alla salute umana, anche gravi, come un aumento dell'incidenza del tumore al seno e al colon (Chepesiuk, 2009). Per non parlare delle implicazioni economiche del problema. Stime elaborate da un gruppo di ricerca dell'Università del Missouri ha quantificato in 7 bilioni di dollari, pari a circa 5.300 miliardi di euro/anno, il costo (impatto su salute umana ed ecosistemi, spreco energetico, ecc.) dell'inquinamento luminoso (Galloway *et al.*, 2010).

La popolazione mondiale è cresciuta in modo esponenziale negli scorsi decenni e l'aumento non mostra nell'immediato alcuna tendenza ad esaurirsi. L'espansione delle aree urbane che ne deriverà è destinata ad aumentare la dotazione di impianti di illuminazione notturna. È dunque da prevedere una recrudescenza degli effetti del fenomeno su scala planetaria che si sovrappone a un quadro già oggi preoccupante. Secondo i dati di Cinzano *et al.* (2001a) nel 61,8% del territorio degli USA e nell'85,3% dell'Unione Europea la luminosità dei cieli notturni è di almeno il 10% superiore a quella naturale. Anche aree apparentemente distanti dal problema, in realtà ne sono coinvolte. Il monitoraggio degli effetti della luce diffusa a danno della barriera corallina (Aubrecht *et al.*, 2008) ha ad esempio evidenziato che le acque marine al largo del Porto Rico e ampie aree del Mar Rosso e del Golfo Arabo già allo stato attuale sono soggette a danni gravi.

Quali le azioni praticabili per fronteggiare il problema? Soluzioni nell'ambito della progettazione degli impianti di illuminazione in grado quanto meno di ridurre le dispersioni di luce erogata dagli impianti sono già state individuate e risultano praticabili (Cinzano,

1997; Di Sora, 2009). Fino a non molto tempo fa l'illuminotecnica ha avuto come obiettivo quello di dimensionare impianti rispondenti a standard qualitativi di natura funzionale ed estetica. Il risparmio energetico, ad esempio, solo in tempi recenti ha guadagnato l'attenzione che merita. Attenzione che per altro non si è ancora pienamente tradotta sul territorio nazionale in norme utili a evitare situazioni di deleterio e ottuso spreco. La riflessione in corso sulla necessità di ridurre i consumi di energia (e con essa i costi) è comunque un'opportunità importante anzi tutto sotto il profilo culturale. Da essa può scaturire un nuovo modello di progettazione nel campo dell'illuminotecnica capace di integrare i criteri estetici e funzionali con le esigenze di risparmio e di riduzione dell'inquinamento luminoso a tutela anche degli ecosistemi. Un approccio di questo tipo significherebbe progettare con criteri più moderni il nuovo, ma avviare una riqualificazione di quanto già esiste. In tempi di crisi ciò potrebbe fare da volano per la creazione di nuove competenze professionali e applicazioni tecnologiche: un esempio di *green economy*, che tuttavia fino ad oggi non sembra trovare spazio reale di sviluppo. Anche il tentativo di approvare una legge nazionale per il contenimento dell'inquinamento luminoso (DDL 1296/92) non è andato a segno e l'elaborazione della norma tecnica UNI 10819 "Requisiti per la limitazione della dispersione verso l'alto del flusso luminoso" non ha soddisfatto le richieste di chi chiedeva norme davvero efficaci per affrontare il problema (Di Sora, 2010). Oggi buona parte delle Regioni italiane sono dotate di normative in materia, ma il quadro è assai disomogeneo e alcune di queste leggi appaiono inadeguate (Di Sora,

2009). Sono attivi anche regolamenti comunali che tuttavia non sono estesi all'intero territorio nazionale e non sempre trovano piena applicazione (Di Sora, 2010). L'emanaazione di leggi da parte delle Regioni è il risultato di una encomiabile mobilitazione delle associazioni astrofile italiane. Non a caso i provvedimenti legislativi di solito fissano fasce di rispetto per le aree circostanti gli osservatori astronomici. L'impatto ecologico è un aspetto che rimane in secondo piano, anche se non viene ignorato: la legislazione lombarda, ad esempio, contiene riferimenti ai possibili danni da inquinamento luminoso all'interno delle aree naturali protette. La dotazione di norme legislative e tecniche, per quanto non ancora sufficientemente incisive, è da considerare un primo passo importante.

Va sottolineato però che la sola revisione dei criteri di progettazione da applicare in ambito illuminotecnico non è in prospettiva una misura di per sé sufficiente per attivare politiche efficaci ed utili ad aggredire il problema. Problema che nell'ambito delle politiche di conservazione delle risorse biologiche finora è stato sostanzialmente ignorato, e non solo in Italia. Per usare le parole di Rich e Longcore (2006): «... se ci svegliassimo una mattina e capissimo che tutto lo sforzo messo in atto nell'ambito delle politiche di conservazione degli ultimi trent'anni ha riguardato solamente la metà del mondo biologico, vale a dire gli organismi con abitudini diurne?». Affrontare gli effetti ecologici dell'inquinamento luminoso richiederà giocoforza non solo un ripensamento delle politiche di conservazione della natura, ma anche dell'intera pianificazione urbanistica e territoriale. L'inquinamento luminoso è infatti un problema che necessita anche e so-

prattutto di un approccio su scala di paesaggio: un'espansione urbana in un'area considerata di scarso pregio naturalistico, solo per fare un esempio, può compromettere la conservazione di specie interessanti collocate in aree adiacenti per effetto del fenomeno della luce diffusa. Non meno dannosa può essere la realizzazione di un impianto di illuminazione che vada a intersecare un corridoio ecologico strategico per i movimenti di specie di interesse naturalistico. È necessario che la consapevolezza dei danni indotti dalla luce artificiale possa entrare tra i fattori critici oggi utilizzati come criteri di riferimento nei piani territoriali, con la stessa dignità di altri parametri, come la frammentazione degli habitat o la degradazione della vegetazione spontanea. Per rimanere nell'ambito delle misure di natura pianificatoria, misura oltre modo urgente per la riduzione dell'inquinamento luminoso è il contenimento dell'*urban sprawl* (città diffusa), fenomeno che è stato oggetto di attenzione anche da parte dell'Unione Europea (European Environment Agency, 2006). Ugualmente preziosi possono essere interventi di mitigazione studiati per risolvere problematiche di carattere locale, come nel caso già descritto a proposito della messa a terra dell'illumina-

zione stradale a tutela dei siti riproduttivi delle tartarughe marine in Florida (Bertolotti e Salmon, 2005). Anche l'utilizzo di sorgenti luminose meno attrattive e disturbanti per la fauna selvatica o la loro filtrazione può sortire effetti positivi, ma va detto che questo tipo di intervento richiede un'attenta conoscenza e valutazione delle priorità conservazionistiche su scala locale. Non esiste purtroppo una sorgente luminosa in assoluto poco offensiva per gli organismi viventi; solo per fare un esempio, le luci gialle sono la soluzione meno impattante per gli insetti e le tartarughe marine, ma hanno effetto disorientante sulle salamandre (Longcore e Rich, 2006). Certamente l'effetto sulla componente biologica di una sorgente luminosa dovrà divenire uno dei criteri per valutarne la qualità; nuove applicazioni tecnologiche, come ad esempio la prospettata adozione di sistemi di illuminazione a led che possono garantire interessanti vantaggi sotto il profilo del risparmio energetico, dovranno essere opportunamente studiate anche per quel che riguarda i loro effetti sulla componente biologica. Non è per nulla scontato infatti che l'introduzione di nuove soluzioni tecnologiche sia di per sé indolore per gli esseri viventi e per la salute umana. Una recente ana-

lisi comparativa sugli effetti a carico della salute umana della luce emessa da diverse sorgenti luminose dimostra ad esempio che la luce bianca emessa da led ha l'effetto di sopprimere la produzione di melatonina in misura cinque volte superiore rispetto a lampade attualmente in uso, come quelle ai vapori di sodio ad alta pressione (Falchi *et al.*, 2011). In definitiva il problema è complesso, ma questo non toglie che soluzioni finalizzate a contenere le ricadute negative del fenomeno siano possibili. Allo stato attuale un ostacolo non trascurabile all'avvio di azioni efficaci per fronteggiare il problema è l'insufficiente percezione della sua gravità. Il mondo dell'astronomia si è speso molto in tema di divulgazione, ottenendo primi risultati molto importanti, ma il percorso è ancora irto di ostacoli. La crescente disponibilità di dati sui danni ecologici e sanitari offre l'opportunità al mondo della biologia e della medicina di impegnarsi per contribuire a costruire una maggiore conoscenza e consapevolezza collettiva del problema.

#### Ringraziamenti

Un grazie a Monica Masanta, ad Allison Schwer, a Cristina e Stella Verdi e ai Revisori per le loro preziose indicazioni.

#### Bibliografia

- Acharya L., Fenton M.B., 1999. Bat attacks and moth defensive behaviour around street lights. *Canadian Journal of Zoology*, **771**: 27-33.
- Agee H.R., 1972. Sensory response of the compound eye of adult *Heliothis zea* and *H. virescens* to ultraviolet stimuli. *Annals of the Entomological Society of America*, **65**: 701-705.
- Albrecht C., Elvidge C.D., Longcore T., Rich C., Safran J., Strong A.E., Eakin C.M., Baughb K.E., Tuttleb B.T., Howard A.T., Erwin E.H., 2008. A global inventory of coral reef stressors based on satellite observed nighttime lights. *Geocarto International*, **23**: 467-479.
- Ali M.A., 1959. The ocular structure, retinomotor and photo-behavioral responses of juvenile Pacific salmon. *Canadian Journal of Zoology*, **37**: 965-996.
- Ali M.A., 1962. Influence of light intensity on retinal adaptation in Atlantic salmon (*Salmo salar*) yearlings. *Canadian Journal of Zoology*, **40**: 561-570.
- Alkon P.U., Saltz D., 1988. Influence of season and moonlight on tempo-

- rary activity patterns of Indian crested porcupines (*Hystrix indica*). *Journal of mammalogy*, **69**: 71-80.
- Anderson J.D., Graham E., 1967. Vertical Migration and Stratification of Larval *Ambystoma*. *Copeia*, **2**: 371-374.
- Arlettaz R.S., Godat S., Meyer H., 2000. Competition for food by expanding pipistrelle bat population *Pipistrellus pipistrellus* might contribute to the decline of lesser horseshoe bats *Rinolophus hipposideros*. *Biological Conservation*, **93**: 55-60.
- Avens L., Lohmann K.J., 2004. Navigation and seasonal migratory orientation in juvenile sea turtles. *Journal of Experimental Biology*, **207**: 1771-1778.
- Avery M.L., Springer P.F., Dailey N.S., 1980. *Avian mortality at man made structures: an annotated bibliography* (revised). US Fish and Wildlife Service, FWS/OBS - 80/54.
- Baker J., 1990. Toad aggregations under street lamps. *British Herpetological Society Bulletin*, **31**: 26-27.
- Baldaccini N.E., Bezzi E.M., 1989. Orientational responses to different light stimuli by adult and young Sedge Warblers (*Acrocephalus schoenobenus*) during autumn migration: a funnel technique study. *Behaviour*, **110**: 115-124.
- Banta A.M., 1912. The Influence of Cave Conditions Upon Pigment Development in Larvae of *Ambystoma tigrinum*. *The American Naturalist*, **544**: 244-248.
- Bauer R., 1993. *Investigation of the attraction of nocturnal insects by artificial lights*. Diploma thesis, Department of Biology, University of Konstanz, Germany.
- Bebas P., Cymborowsky B., Giebulowicz J.M., 2001. Circadian rhythm of sperm release in males of the cotton leafworm, *Spodoptera littoralis*: in vivo and in vitro studies. *Journal of Insect Physiology*, **47**: 859-866.
- Beier P., 1995. Dispersal of juvenile cougars in fragmented habitat. *Journal of Wildlife Management*, **59**: 228-237.
- Beier P., 2006. Effects of Artificial Night Lighting on Terrestrial Mammals. In: Rich C. & Longcore T. (eds), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press: 19-42.
- Bertolotti L., Salmon M., 2005. Do Embedded Roadway Lights Protect Sea Turtles? *Environmental Management*, **36** (5): 702-710.
- Bird B.L., Branch L.C., Miller D.L., 2004. Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice. *Conservation Biology*, **18**: 1435-1439.
- Biswas N.M., Chakraborty J., Chanda S., Sanyal S., 1978. Effect of continuous light and darkness on the testicular histology of toad (*Bufo melanostictus*). *Endocrinologia Japonica*, **25**: 521-522.
- Boldogh S., Dobrosi D., Samu P., 2007. The effects of the illumination of buildings on house-dwelling bats and its conservation consequences. *Acta Chiropterologica*, **9** (2): 527-534.
- Briggs W.R., 2006. Physiology of Plant Responses to Artificial Lighting. In: Rich C. and Longcore T. (eds), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press: 389-412.
- Brown L.N., 1984. Population outbreak of pandora moths (*Coloradia pandora* Blake) on the Kalibab Plateau, Arizona (Saturniidae). *Journal of the Lepidopterists' Society*, **38**: 65.
- Buchanan B.W., 1993. Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs. *Animal Behaviour*, **45**: 893-899.
- Burke C.M., Davoren G.K., Montevecchi W.A., Wiese F.K., 2005. Seasonal and spatial trends of marine birds along offshore support vessel transects and at oil platforms on the Grand Bank. In: Armsworthy S.L., Cranford P.J., Lee K. (eds), *Offshore oil and gas environmental effects monitoring: approaches and technologies*. Batelle Press, Columbus, Ohio: 587-614.
- Canyon D.V., Hii J.L.K., 1997. The gecko: an environmentally friendly biological agent for mosquito control. *Medical and Veterinary Entomology*, **11**: 319-323.
- Casagrande R., Giulini P., 2000. City lights and urban green. *Memorie Società Astronomica Italiana*, **71**: 50-58.
- Case T.J., Fisher R.N., 2001. Measuring and predicting species presence: coastal sage scrub case study. In: Hunsaker C.T., Goodchild M.F., Friedl M.A. and Case T.J. (eds), *Spatial uncertainty in ecology: implications for remote sensing and GIS applications*, Springer - Verlag, New York: 47-71.
- Cathey H.M., Campbell L.E., 1975a. Security lighting and its impact on the landscape. *Journal of Arboriculture*, **1**: 187.
- Cathey H.M., Campbell L.E., 1975b. Effectiveness of five vision-lighting sources on photo-regulation of 22 species of ornamental plants. *Journal American Society for Horticultural Science*, **100**: 65-71.
- Charlwood J.D., Paru R., Dagoro H., Lagom M., 1986. Influence of moonlight and gonotrophic age on biting activity of *Anopheles farauti* (Diptera: Culicidae) from Papua New Guinea. *Journal of Medical Entomology*, **23** (2): 132-135.
- Chepesiuk R., 2009. Missing the Dark: Health Effects of Light Pollution. *Environmental Health Perspectives*, **117**: 20-27.
- Cinzano P., 1997. *Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno*. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venezia, 225 pp.
- Cinzano P., 2000. The growth of light pollution in north eastern Italy from 1960 to 1995. *Memorie Società Astronomica Italiana*, **71**: 50-58.
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., 2001a. The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notes Royal Astronomical Society*, **328**: 689-707.
- Cinzano P., Falchi F., Elvidge C.D., 2001b. *Rapporto ISTIL 2001, Stato del cielo notturno e inquinamento luminoso in Italia*, Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso, Thiene, 80 pp.
- Collins C.T., Watson A., 1983. Field Observations of Bird Predation on Neotropical Moths, *Biotropica*, **15**: 53-60.
- Crawford D.L., Hunter T.B., 1990.

- The battle against light pollution. *Sky & Telescope*, **80**: 23-29.
- Da Silva-Nunes V., 1988. Vocalizations of treefrogs (*Smilisca sila*) in response to bat predation. *Herpetologica*, **44** (1): 8-10.
- Dauchy R.T.L., Sauer L.A., Blask D.E., Vaughan G.M., (1997). Light contamination during the dark phase in "photoperiodically controlled" animal rooms: effect on tumor growth and metabolism in rats. *Laboratory Animal Science*, **47**: 511-518.
- Day R.H., Cooper B.A., Telfer T.C., 2003. Decline of Townsend's (Newell's) shearwaters (*Puffinus auricularis newelli*) on Kauai, Hawaii. *Auk*, **120**: 669-679.
- Debernardi P., Patriarca E., Toffoli R., 2010. *Monitoraggio delle colonie di Chiroteri riproduttive e svernanti di particolare interesse conservazionistico note in Piemonte e dati preliminari sull'attività di swarming. Stato delle conoscenze al 30 aprile 2010*. CRC, Regione Piemonte - Direzione ambiente - Settore pianificazione e gestione aree naturali protette relazione interna.
- De Coursey P.J., 1986. Light-sampling behavior in photoentrainment of a rodent circadian rhythm. *Journal Comparative Physiology*, **159**: 161-169.
- De Molenaar J.G., Jonkers D.A., Sanders M.E., 2000. *Road illumination and nature. III. Local influence of road lights on a black-tailed godwit Limosa limosa population*. Wageningen, The Netherlands: Alterra.
- Deutschlander M.E., Borland S.C., Phillips J.B., 1999. Extraocular magnetic compass in newts. *Nature*, **400**: 324-325.
- D'Istria M., Monteleone P., Serino I., Chieffi G., 1994. Seasonal variations in the daily rhythm of melatonin and NAT activity in the Harderian gland, retina, pineal gland, and serum of the green frog, *Rana esculenta*. *General and Comparative Endocrinology*, **96**: 6-11.
- Di Sora M., 2009. *L'inquinamento luminoso*. Gremese editore, 194 pp.
- Di Sora M., 2010. Normativa e legislazione sull'inquinamento luminoso, 1996-2010. *Astronomia*, **2**: 8-9.
- Eisenbeis G., 2006. Artificial Night Lighting and Insects: Attraction of Insects to Streetlamps in a Rural Setting in Germany. In: Rich C. and Longcore T. (eds) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 281-304.
- Emmet A.M., 1991. Chart showing the life history and habits of the British Lepidoptera. In: A.M. Emmet & Heath (eds.) *The moths and butterflies of Great Britain and Ireland*, Harley Books, Colchester, Essex, UK **7** (2): 61-303.
- Erkert H.G., 1982. Ecological aspects of bat activity rhythms. In: Kunz T.H. ed. *Ecology of bats*. Plenum Press, New York: 201-242.
- European Environment Agency, 2006. *Urban sprawl in Europe. The ignored challenge*, 56 pp.
- Evans Ogden L.J., 1996. *Collision course: the hazards of lighted structures and windows to migrating birds*. WWF Canada, Toronto, 53 pp.
- Falchi F., Cinzano P., Elvidge C.D., Keith D.M., Haim A., 2011. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management*, **92** (10): 2714-2722.
- Fatzinger C.W., 1973. Circadian rhythmicity of sex pheromone release by *Dioryctria abietella* (Lepidoptera Pyralidae) and the effect of a diel light cycle on its precopulatory behavior. *Annals of the Entomological Society of America*, **66**: 1147-1153.
- Flik B.J.G., Aanen D.K., Ringelberg J., 1997. The extent of predation by juvenile perch during diel vertical migration of *Daphnia*. *Archiv für Hydrobiologie. Beihefte. Ergebnisse der Limnologie*, **49**: 51-58
- Folmar L.C., Dickhoff W.W., 1981. Evaluation of some physiological parameters as predictive indices of smoltification. *Aquaculture*, **231**: 309-324.
- Fornasari L., 2002. Malpensa airport and bird migration: a matter of light pollution. In: Cinzano P. (ed) *Light pollution and the protection of night environment*, ISTIL, Venezia: 123-136.
- Frank D.K., 2006. Effects of Artificial Night Lighting on Moths. In: Rich C. and Longcore T. (eds) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 305-344.
- Furlonger C.L., Dewar H.J., Fenton M.B., 1987. Habitat use by foraging insectivorous bats. *Canadian Journal of Zoology*, **65**: 284-288.
- Gal G.E., Loew E.R., Rudstam L.G., Mohammadian A.M., 1999. Light and diel vertical migration: spectral sensitivity and light avoidance by *Mysis relicta*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **56**: 311-322.
- Gallaway T., Olsen R.N., Mitchell D.M., 2010. The economics of global light pollution. *Ecological Economics*, **69**: 658-665.
- Gancedo B., Alonso-Gómez A.L., De Pedro N., Delgado M.J., Alonso Bedate M., 1996. Daily changes in thyroid activity in the frog *Rana perezi*: variation with season. *Comparative Biochemistry and Physiology*, **114**: 79-87.
- Garber S.D., 1978. Opportunistic feeding behavior of *Anolis cristatellus* (Iguanidae: Reptilia) in Puerto Rico. *Transaction of the Kansas Academy of Science*, **81**: 79-80.
- Gaudreau N., Boisclair D., 2000. Influence of moon phase on acoustic estimates of the abundance of fish performing daily horizontal migration in a small oligotrophic lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **57**: 581-590.
- Gauthreaux S.A., Belser C.G., 2006. Effects of Artificial Night Lighting on Migrating Birds. In: Rich C. and Longcore T. (eds), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 67-93.
- Giebultowicz J.M., 2000. Molecular mechanism and cellular distribution of insect circadian clocks. *Annual Review of Entomology*, **45**: 769-793.
- Gill D.E., 1978. The metapopulation ecology of the red spotted newt, *Notopthalmus viridescens* (Rafinesque). *Ecology*, **60**: 800-813.
- Giller P.S., Malmquist B., 1998. *The biology of streams and rivers*. Oxford University Press, 143 pp.
- Godin J.G.J., 1982. Migration of salmonid fishes during early life history phases: daily and annual tim-

- ing. In: Brannon E.L and Salo E.O. (eds.), *First International Salmon and Trout Migratory Behavior Symposium*. Seattle, Washington: 22-50.
- Gramentz D., 2008. The distribution, abundance and threat of the salt-water crocodile, *Crocodylus porosus*, in the Bentota Ganga, Sri Lanka. 16 pp.
- Green C.B., Liang M.Y., Steenhard B.M., Beasharse J.C., 1999. Ontogeny of circadian and light regulation of melatonin release in *Xenopus laevis* embryos. *Development Brain Research*, **117**: 109-116.
- Hailman J.P., 1982. Extremely low ambient light levels of *Ascapus truei*. *Journal of Herpetology*, **16**: 83-84.
- Halle S., Stenseth N.C. (eds), 2000. *Activity patterns in small mammals: an ecological approach*. Springer, Berlin, 320 pp.
- Haney J.F., 1993. Environmental control of diel vertical migration behaviour. *Archiv. für Hydrobiologie, Beihefte. Ergebnisse der Limnologie*, **39**: 1-17.
- Hartstack A.W., Hollingsworth J.P., Lindquist D.A., 1968. A technique for measuring trapping efficiency of electric insect traps. *Journal of Economic Entomology*, **61**: 546-552.
- Henderson R.W., Powell R., 2001. Responses by the West Indian herpetofauna to human-influenced resources. *Caribbean Journal of Science*, **37**: 41-54.
- Hoar W.S., Keenleyside M.H.A., Goodall R.G., 1957. Reactions of juvenile Pacific salmon to light. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, **14**: 815-830.
- Jones G., Duvergé P.L., Ransome R.D., 1995. Conservation biology of an endangered species: field studies of greater horseshoe bats. In: Racey P.A. & Swift S.M. (eds). *Ecology, evolution and behaviour of bats*. Symposia of the Zoological Society of London, Clarendon Press, Oxford: 309-324.
- Kay Lorne J., Salmon M., 2007. Effects of exposure to artificial lighting on orientation of hatchling sea turtles on the beach and in the ocean. *Endangered Species Research*, **3**: 23-30.
- Kawamura G., Naohara T., Tanaka Y., Nishi T., Anraku K., 2009. Near-ultraviolet radiation guides the emerged hatchlings of loggerhead turtles *Caretta caretta* (Linnaeus) from a nesting beach to the sea at night. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, **42**: 19-30.
- Kolligs D., 2000. Ecological effects of artificial light sources on nocturnally active insects, in particular on moths (Lepidoptera), *Faunistisch - Ökologische Mitteilungen Supplement*, **28**: 1-136.
- Kotler B.P., 1984. Risk of predation and the structure of desert rodent communities. *Ecology*, **65**: 689-701.
- Laidlaw G.W.J., Fenton M.B., 1971. Control of nursery colony populations of bats by artificial light. *Journal of wildlife management*, **35**: 843-846.
- Lee J.H., Hung C.F., Ho C.C., Chang S.H., Lai Y.S., Chung J.G., 1997. Light - induced changes in frog pineal gland N-acetyltransferase activity. *Neurochemistry International*, **31**: 533-540.
- Lloyd J.E., 2000. On research and entomological education IV; quantifying mate search in a perfect insect-seeking true facts and insight (Coleoptera Lampyridae, *Photinus*). *Florida Entomologist*, **83**: 211-228.
- Lloyd J.E., 2006. Stray Light, Fireflies, and Fireflyers. In: Rich C., Longcore T. (Eds), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press, USA: 345-364.
- Luschi P., Papi F., Liew H.C., Chan E.H., Bonadonna F., 1996. Long - distance migration and homing after displacement in the green turtle (*Chelonia mydas*): a satellite study. *Journal of Comparative Physiology*, **178**: 447-452.
- Lyytimäki J., 2013. Nature's nocturnal services: Light pollution as a non-recognised challenge for ecosystem services research and management. *Ecosystem Services*, **3**: 44-48.
- Marchetti C., Bezzi E.M., Baldaccini N.E., 1998. Orientation in relation to the setting sun in some passerine trans-saharian migrants. *Ethology, Ecology & Evolution*, **10**: 143-157.
- Massey P., Gronwall C., Pilachowsky A., 1990. The spectrum of the Kitt Peak night sky. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **102**: 1046-1051.
- Merkel F.R., Johansen K.L., 2011. Light-induced bird strikes on vessels in Southwest Greenland. *Marine Pollution Bulletin*, **62**: 2330-2336.
- Merriam C.H., 1885. Preliminary report of the committee on bird migration. *Auk*, **2**: 53-65.
- Meylan A., B., Schroeder B., Mosier A., 1995. Sea turtle nesting activity in the state of Florida 1979-1992. *Florida Marine Research Publications*, **52**: 1-51.
- Miller T.A., Stryker R.G., Wilkinson R.N., Esah S., 1970. The influence of moonlight and other environmental factors on the abundance of certain mosquito species in light-traps collections in Thailand. *Journal of Medical Entomology*, **7** (5): 555-561.
- Montevocchi W.A., 2006. Influences of Artificial Light on Marine Birds. In: Rich C. and Longcore T. (eds), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 94-113.
- Moore M.V., Pierce S.M., Walsh H.M., Kvalvik S.K., Lim J.D., 2000. Urban light pollution alters the diel vertical migration of *Daphnia*. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, **27**: 779-782.
- Moore M.V., Kohler S.J., Cheers M., 2006. Artificial Light at Night in Freshwater Habitats and Its Potential Ecological Effects. In: Rich C. and Longcore T. (eds) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 365-384.
- Munro J.A., 1924. A preliminary report on the destruction of birds at lighthouses on the coast of British Columbia. *Canadian Field-Naturalist*, **38**: 141-145.
- Nelson K.A., 2002. *The effect of filtered high pressure sodium lighting on hatchling loggerhead (Caretta caretta) and green turtle (Chelonia mydas) hatchlings*. M.S. thesis, Flor-

- ida Atlantic University, Boca Raton.
- Nemeth R.S., Anderson J.J., 1992. Response of juvenile coho and chinook salmon to strobe and mercury vapor lights. *North American Journal of Fisheries Management* **12**: 684-692.
- Neumann D., 1976. Entrainment of semi-lunar rhythm. In: P. Decoursey ed., *Biological Rhythms in the marine environment*. Univ. of South Carolina Press, Columbia: 115-127.
- Nowinzsky L., Szabó S., Tóth G., Ekk I., Kiss M., 1979. The effect of the moon phase and the intensity of polarized moonlight on the light trap catches. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, **88**: 337-353.
- Olle M., Viršile A., 2013. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, **22** (2): 223-234.
- Osterbrock D.E., Walker M.F., Koski A.T., 1976. The spectrum of light pollution at Mount Hamilton. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **88**: 349-352
- Patriarca E., Debernardi P., 2010. *Bats and light pollution*. Ente di Gestione del Parco Naturale Laghi di Avigliana, 27 pp.
- Perry G., Fisher R.N., 2006. Night Lights and Reptiles: Observed and Potential Effects. In: Rich C. and Longcore T. (eds) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 169-191.
- Petren K., Bolger D.T., Case T.J., 1993. Mechanism in the competitive success of an invading sexual gecko over an asexual native. *Science*, **259**: 354-358.
- Philips J.B., Borland S.C., 1992a. Behavioural evidence for use of a light-dependent magnetoreception mechanism by a vertebrate. *Nature*, **359**: 142-144.
- Philips J.B., Borland S.C., 1992b. Wavelength specific effects of light on magnetic compass orientation of the eastern red-spotted newt *Notophtalmus viridescens*. *Ethology, Ecology and Evolution*, **4**: 33-42.
- Philips J.B., Borland S.C., 1994. Use of a specialized magnetoreception system for homing by the eastern red-spotted newt *Notophtalmus viridescens*. *Journal of Experimental Biology*, **188**: 275-291.
- Philips J.B., Deutschlander M.E., Freaque M.J., Borland S.C., 2001. The role of extraocular photoreceptors in newt magnetic compass orientation: parallel between light-dependant magnetoreception and polarized light detection in vertebrates. *Journal of Experimental Biology*, **204**: 2543-2552.
- Picchi M., Azzani L., Avolio L., Brombin O., Camerini G., 2013. Fireflies and land use in an urban landscape: the case of *Luciola italica* L. (Coleoptera: Lampyridae) in the city of Turin. *Journal of Insect Conservation*, **17**: 797-805.
- Poot H., Ens B.J., De Vries H., Maurice A.H., Donners M.A.H., Wernand M.R., Marquenie J.M., 2008. Green Light for Nocturnally Migrating Birds. *Ecology and Society*, **13**: 47-59.
- Prinslow T.E., Whitmus C.J., Dawson J.J., Bax N.J., Snyder B.P., Salo E.O., 1980. *Effects of wharf lighting on outmigrating salmon*. FRI-UW-8007. Fisheries Research Institute, University of Washington, Seattle.
- Protasov V.R., 1970. *Vision and near orientation of fish*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 175 pp.
- Rand A.S., Bridarolli M.E., Dries L., Ryan M.J., 1997. Light levels influence female choice in Túngara frogs: predation risk assessment? *Copeia*, 1997 (2): 447-450.
- Reijnen M.J.S., 1995. *Disturbance by car traffic as a threat to breeding birds in the Netherlands*. PhD thesis, Rijksuniversiteit, Leiden.
- Ricciutti E., 1978. Night of the grunting fish. *Aubudon*, **80**: 92-97.
- Rich C., Longcore T., (eds), 2006. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press, Washington DC: 458 pp.
- Rodda G.H., Perry G., Rondeau R.J., Lazell J., 2001. The densest terrestrial vertebrate. *Journal of Tropical Ecology*, **17**: 331-338.
- Roman A., Cinzano P., Giacometti G.M., Giuliani P., 2000. Light pollution and possible effects on higher plants. *Memorie Società Astronomica Italiana*, **71**: 59-70.
- Rydell J., 1992. Exploitation of insects around streetlamps by bats in Sweden. *Functional Ecology*, **6**: 744-750.
- Rydell J., 2006. Bats and their Insect Prey at Streetlights. In: Rich C. & Longcore T. (eds), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 43-60.
- Sage B., 1979. Flare up over North Sea birds. *New Scientist*, **81**: 464-466.
- Salmon M., 2006. Protecting Sea Turtles from Artificial Night Lighting at Florida's Oceanic Beaches. In: Rich & Longcore, (eds) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 141-168.
- Salmon M., Reiners R., Lavin C., Wyneken J., 1995. Behavior of logger-head sea turtles on an urban beach. I. Correlates of nest placement. *Journal of Herpetology* **29**: 560-567
- Scheibe M.A., 2000. *Quantitative aspects of the attraction of roadway lighting to insects emerging from nearby waters with consideration of the spectral emission of different sources of light*. PhD Thesis, Fachbereich Biologie, Johannes Gutenberg Universität, Mainz
- Skinner J.D., van Jaarsveld A.S., 1987. Adaptive significance of restricted breeding in southern African Ruminants. *South African Journal of Science*, **83**: 657-663.
- Skutelsky O., 1996. Predation risk and state-dependent foraging in scorpions: effects of moonlight on foraging in the scorpion *Buthus occitanus*. *Animal Behaviour*, **52**: 49-57.
- Sidoti P., Ghislieri N., 2008. *La luce che oscura. Inquinamento luminoso nell'Oltrepo*. Istituto "C. Gallini" Voghera, 20 pp.
- Sower L.L., Shorey H.H., Gaston L.K., 1970. Sex pheromones of noctuid moths. XXI. Light - dark cycle regulation and light inhibition of sex pheromones release by females of *Trichoplusia ni*. *Annals of the Entomological Society of America*, **63**: 1090-1092.
- Stangel P.W., Semlitsch R.D., 1987. Experimental analysis of predation

- on the diel vertical migrations of a larval salamander. *Canadian Journal of Zoology*, **65**: 1554-1558.
- Sullivan B.K., 2000. Long term shifts in snake populations: a California site revisited. *Biological Conservation*, **94**: 321-325.
- Tabor R.A., Brown G., Hird A., Hager S., 2001. *The effect of light intensity on predation of sockeye salmon fry by Cottids in the Cedar River*. US Fish and Wildlife Service, Western Washington Office, Fisheries and Watershed Assessment Division, Lacey, Washington
- Taylor D.H., Adler K., 1973. Extraocular perception of polarized light by orienting salamanders. *Journal of comparative physiology*, **87**: 203-212.
- Taylor L.R., French R.A., Woiwod I.P., 1978. The Rothamsted insect survey and the urbanization of land in Great Britain. In: Frankie G.W. & Koehler C.S. (eds), *Perspectives in urban entomology*, Academic Press, London: 31-65.
- Telfer T.C., Sincock J.L., Byrd G.V., Reed J.R., 1987. Attraction of Hawaiian seabirds to lights: conservation efforts and effects of moon phase. *Wildlife Society Bulletin*, **15**: 406-413.
- Tornielli A., 1951. Comportamento di migratori nei riguardi di un pozzo metanifero in fiamme. *Rivista Italiana di Ornitologia*, **21**: 151-162.
- Van Anholt R.D., Van Der Velde G., Haddinger R.H., 1998. Can roach (*Rutilus rutilus* L.) be deflected by means of a fluorescent light? *Regulated Rivers; Research & Management*, **14**: 443-450.
- Vasquez R.A., 1994. Assessment of predation risk via illumination level: facultative central place foraging in the cricket rodent *Phyllotis darwini*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, **34**: 375-381.
- Verheijen E.J., 1985. The moon: a neglected factor in studies on collision of nocturnal migrant birds with tall lighted structures and with aircraft. *Die Vogel-warte*, **30**: 305-320.
- Vernberg F.J., 1955. Correlation of physiological and behavior indexes of activity in the study of *Plethodon cinereus* (Green) and *Plethodon glutinosus* (Green). *American Midland Naturalist*, **54**: 382-393.
- Vince-Prue D., 1994. The duration of light and photoperiodic responses. In: Kendrick, R.E., Kronenberg, G.H.M. (eds) *Photomorphogenesis in Plants*. Springer Netherlands: 447-490.
- Viviani V.R., Rocha M.Y., Hagen O., 2010. Fauna de besouros bioluminescentes Coleoptera: Elateroidea: Lampyridae; Phengodidae, Elateridae nos municípios de Campinas, Sorocaba-Votorantim e Rio Claro-Limeira SP, Brasil: biodiversidade e influência da urbanização. *Biota Neotropica*, **10**: 103-116.
- Wang Y., Pan Y., Parsons S., Walker M.M., Zhang S., 2007. Bats respond to polarity of a magnetic field. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, **274**: 2901-2905.
- Whitford W.G., Hutchinson V.H., 1965. Effect of photoperiod on pulmonary and cutaneous respiration in the spotted salamander, *Ambystoma maculatum*. *Copeia*, 1965: 53-58.
- Whiterington B.E., 1992. Behavioral responses of nesting sea turtles to artificial lighting. *Herpetologica* **48**: 31-39.
- Wiese F.K., Montevecchi W.A., Davoren G.K., Huettmann F., Diamond A.W., Linke J., 2001. Seabirds at risk around offshore oil platforms in the North-west Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*. **42**: 1285-1290.
- Williams J.N., 1978. Age dependant factors in the migratory behavior of the white-crowned sparrow, *Zonotrichia leucophrys leucophrys*. M.S. thesis, Clemson University, Clemson, South Carolina.
- Wilson A., 1998. Light pollution efforts to bring back the night sky. *Environmental Building News*, **7**: 8-14.
- Wiltshko W., Wiltshko R., 2002. Magnetic compass orientation in birds and its physiological basis. *Naturwissenschaften*, **89**: 445-452.
- Wise S.E., Buchanan B.W., 2006. Influence of Artificial Illumination on the Nocturnal Behavior and Physiology of Salamanders. In: Rich C. & Longcore T. (eds), *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Island Press: 221-251.
- Young M., 1997. *The natural history of moths*. T. & A.D. Poyser, London, 271 pp.
- Youthed G.J., Moran R.C., 1969. The lunar day activity rhythm of myrmecoleontid larvae. *Journal of Insect Physiology*, **15**: 1259-1271.