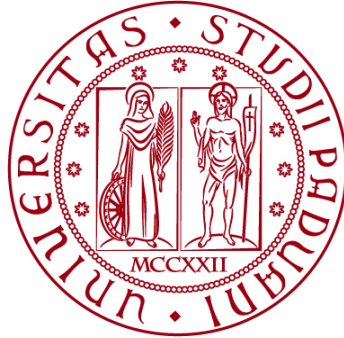


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Biologia



ELABORATO DI LAUREA

**La Sesta Estinzione: analisi delle repliche agli
scettici**

**Tutor: Prof. Dietelmo Pievani
Dipartimento di Biologia**

Laureanda: Lucia Bruscaignin

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INDICE	Pagina
CAPITOLO 1. Introduzione	3
1.1. Cosa sono le estinzioni?	3
1.2. Estinzioni di massa: le <i>Big Five</i> e la situazione attuale	4
CAPITOLO 2. Uomo, da scimmia nuda a forza distruttrice	8
2.1. Agricoltura: l'inizio del dominio dell'uomo sulla natura	8
2.2. Le maggiori cause di perdita della biodiversità	9
2.2.1. Land use change e deforestazione	9
2.2.2. Sovrasfruttamento	11
2.2.3. Specie aliene	11
2.2.4. Inquinamento	12
2.2.5. Climate change	13
CAPITOLO 3. Caso di studio	15
3.1 Cos'è il meccanismo TSD	15
3.2 Qual è il senso del meccanismo TSD	17
3.3 Adattamenti di <i>Caretta caretta</i> all'aumento delle temperature	18
CONCLUSIONI	20
BIBLIOGRAFIA	22

1. Introduzione

1.1 Cosa sono le estinzioni?

Il nostro pianeta si trova ad affrontare un'innequivocabile e rapida perdita della biodiversità, tanto che alcuni ricercatori si sono spinti a paragonarla alle cinque grandi estinzioni di massa del passato, definendola "Sesta estinzione di massa".

La domanda che sorge spontanea è: "Ha senso parlare di sesta estinzione di massa al giorno d'oggi o si tratta solo di inutile allarmismo?".

Prima di provare a dare una risposta è necessario chiarire brevemente cosa si intende per estinzione di massa.

Innanzitutto bisogna sottolineare che un'estinzione è un fenomeno comune ed essenziale per i processi evolutivi, e non qualcosa di intrinsecamente negativo: infatti, i tassi di diversificazione sono il risultato del bilancio tra la velocità con cui si originano nuove specie (speciazione) e con cui scompaiono (estinzione) (Rull, 2022). Il fatto che le estinzioni siano eventi comuni trova ulteriore conferma in un dato: negli ultimi 3,5 miliardi di anni, è scomparso circa il 99% dei 4 miliardi di specie che, secondo le stime, si sono evolute sulla Terra (Barnosky *et al.*, 2011).

Inoltre, quando si parla di estinzioni è utile distinguere tra estinzioni di fondo ed episodiche (si noti che le seconde non sono necessariamente estinzioni di massa). Le prime sono un normale processo che dipende da diversi fattori ecologici e biogeografici, come competizione, predazione, malattie, perdita di habitat, cambiamenti climatici, distribuzione sul territorio, ecc. sotto la regola della selezione naturale (Rull, 2022).

Solitamente, per caratterizzare tali fenomeni si utilizza come unità di misura il numero di estinzioni per milione di specie all'anno (E/MSY): il dato ottenuto è inversamente proporzionale alla durata della specie di un dato gruppo (Rull, 2022; Primm, 1995).

Le estinzioni di fondo hanno un tasso che fluttua tra 0,1 e 1 E/MSY per la maggior parte dei gruppi animali. Le estinzioni episodiche, invece, sono fenomeni molto più intensi e avvengono inaspettatamente quando una forza maggiore provoca una brusca ondata di estinzioni (Rull, 2022).

Dall'indice E/MSY si comprende quali sono le caratteristiche dei fenomeni di estinzione:

- l'intensità, o *magnitude*, che fa riferimento alla percentuale di specie che scompaiono;
- la velocità, "rate", ovvero quanto velocemente avviene il fenomeno.

I due parametri sono inevitabilmente collegati, ma abbiamo bisogno di entrambi per descrivere un fenomeno di estinzione (Richie and Roser, 2021).

A questo punto si può spiegare perché non tutte le estinzioni episodiche vengono classificate come estinzioni di massa. Il motivo è che, per rientrare in questa categoria, l'estinzione deve portare alla scomparsa almeno il 75% delle specie esistenti (Cowie, Bouchet and Fontaine, 2022).

La maggior parte degli autori (Sepkoski, 1996; Avise, Hubbell and Ayala, 2008; Barnosky *et al.*, 2011; Harper, Hammarlund and Rasmussen, 2014) accetta l'ipotesi secondo la quale si sarebbero verificate cinque grandi estinzioni di massa a partire dal Cambriano (Cowie, Bouchet and Fontaine, 2022).

1.2 Estinzioni di massa: le *Big Five* e la situazione attuale

Le “*Big Five*” sono le cinque grandi estinzioni di massa che hanno segnato la storia della vita; sono accomunate, cioè, dal fatto di avere portato all’estinzione più del 75% delle specie e dall’essere state causate da eventi naturali (vd. Tab. 1).

Tabella 1. Percentuali per genere e specie di organismi estinti durante le “*Big Five*” e alcune ipotetiche cause di questi eventi (fonte: Palombo, 2021).

Event	End (MYR Ago)	Extent * (Myr)	Genera Estimated Lost *	Species Estimated Lost *	Main Proposed Causes [2,10,11,16–18,21–23]	Other Proposed Causes
End-Ordovician	~443	3.3–1.9	57%	86%	Climate (alternating glacial and interglacial episodes) but [24]; sea level changes, regression followed by transgression phases, triggering ocean anoxia.	Volcanism revealed by high concentration of mercury traces, e.g., [30]; changes in atmospheric and oceanic geochemistry, e.g., [31].
Late-Devonian	~359	2.9–2	35%	75%	Global cooling followed by global warming; atmospheric carbon dioxide decrease; sea level rise associated with the spreads of anoxic waters from depth shelf into shallow waters.	Volcanism revealed by high mercury concentration, e.g., [32], methylmercury poisoning, e.g., [33]; meteorite impact, e.g., [34,35]; UV-B radiation [36].
End-Permian	~251	2.8–0.16	56%	96%	Siberian volcanism leading to high hydrogen sulphide, carbon dioxide levels, and halogenous levels in the oceans and atmosphere, but see [25,26]; ocean acidification; global greenhouse warming.	Meteorite impact but [19,20]
end-Triassic (P-Tr)	~200	8.3–0.6	47%	80%	Increase in temperature likely caused by magmatic activity (Central Atlantic Magmatic Province) and resulting augment of atmospheric carbon dioxide; release of greenhouse gases causing deep-ocean acidification; ocean calcification crisis.	Ocean anoxia, e.g., [37]
End-Cretaceous (K-Pg)	~65	2.5–less than 1 Myr	40%	76%	Long-term events: Deccan volcanism; carbon dioxide, inducing warming; tectonic uplift, accelerating erosion and contributing to ocean eutrophication and anoxic episodes. Rapid event: Chicxulub asteroid impact (Yucatán Peninsula Mexico), causing sudden cooling and a prolonged cold winter. see also [27–29]	Ocean acidification and Hg toxicity, e.g., [38–40]

Il fenomeno di estinzione attuale, che ha causato la perdita di molte specie nel corso di pochi secoli e ha spinto i biologi a parlare di Sesta Estinzione di massa (Barnosky *et al.*, 2011) in realtà si differenzia dalle *Big Five* per alcuni aspetti. Innanzitutto l’attuale evento estintivo è causato direttamente dalle azioni umane, in particolare dal cambiamento nell’uso dei terreni, dal sovrasfruttamento delle risorse, dall’inquinamento, dall’introduzione di specie aliene e dal cambiamento climatico. L’impatto di queste minacce alla biodiversità verrà approfondito nel secondo capitolo della tesi.

Un ulteriore carattere che distingue l’odierna perdita di biodiversità dalle precedenti è che l’attuale fenomeno riguarda principalmente le specie non marine, mentre gli eventi precedenti sono stati per la maggior parte definiti basandosi sui fossili marini, molti dei quali di invertebrati, sebbene l’evento di fine Cretaceo abbia portato all’estinzione dei dinosauri non-aviani (Cowie, Bouchet and Fontaine, 2022).

Una volta delineate le differenze tra il fenomeno attuale e le passate estinzioni di massa, possiamo cercare di capire se e perché la definizione “Sesta estinzione di massa”, suggerita dal paleoantropologo Leakey e dallo scrittore Lewin (Leakey and Lewin, 1995) sia pertinente o meno.

A questo scopo Barnosky e colleghi, integrando dati provenienti da database paleontologici e dalle liste delle specie estinte, hanno confrontato la moderna perdita di biodiversità con i tassi di estinzione di fondo. A tale scopo, i ricercatori hanno calcolato il tasso medio di estinzione per milione di anni per i mammiferi, taxon per il

quale i dati a disposizione sono maggiori, il quale ammonterebbe a circa 1,8 E/MSY, e hanno confrontato questo risultato con il numero di specie estinte rispetto a quelle note, vissute negli ultimi 500 anni. La terribile scoperta fatta è che le moderne estinzioni stanno avvenendo molto più velocemente del previsto.

Barnosky e colleghi sono arrivati in questo modo alla conclusione che la sesta estinzione di massa non è ancora in corso, ma è un evento che potrebbe accadere in futuro (Barnoski *et al.*, 2011).

Da Ceballos e colleghi (2015) viene adottato un simile approccio, i quali decidono di arrotondare a 2 E/MSY il tasso di estinzione dei mammiferi, assumendo possa essere rappresentativo per i vertebrati. Si noti che nonostante questa scelta iniziale, che tende a minimizzare la differenza tra tassi di estinzione di fondo e attuali, gli autori giungono alla stessa conclusione: ci si sta avviando verso una crisi globale di biodiversità. Viene infatti riportato che i moderni tassi di estinzione per i vertebrati sono da 8 a 100 volte più alti di quelli di fondo.

Per vagliare la verosimiglianza dei diversi calcoli riportati, proviamo a realizzare nuovamente il calcolo del tasso di estinzione dei mammiferi, utilizzando i dati più recenti della IUCN relativi al numero di specie estinte negli ultimi 500 anni, per poi confrontarlo con quello di estinzione di fondo calcolato da Ceballos e colleghi.

Utilizzando questa metodologia, si avrà quindi un tasso di estinzione di fondo pari a 2 E/MSY, che equivale all'estinzione di 2 specie su 10.000 ogni 100 anni. Se le specie conosciute di mammiferi sono 5968, l'aspettativa è di 1,2 mammiferi estinti ogni 100 anni, cioè 6 ogni 500 anni.

$$2:10000 = x:5968 \quad X_{100} = 1,2 \text{ in } 100 \text{ anni} \quad X_{500} = 1,2 \times 5 = 6 \text{ in } 500 \text{ anni}$$

In realtà la IUCN, che tiene traccia delle estinzioni dal 1500, riporta che si sono estinti 87 mammiferi su 5968, circa 14,5 volte il numero previsto usando i tassi dell'estinzione di fondo dei mammiferi.

È necessario, però, sottolineare che il confronto tra tassi di estinzione passati e attuali ha dei limiti. In primo luogo, il tasso delle estinzioni attuali viene estrapolato facendo riferimento ad un periodo molto limitato di tempo, dell'ordine delle decine o centinaia di anni, ma, come già evidenziato da Barnosky e colleghi nel 2011, i tassi di estinzione variano in modo consistente a seconda della lunghezza del periodo di tempo considerato.

Ne deriva che calcolare il tasso di estinzione relativo ad un periodo di tempo breve darà per risultato un numero molto più grande o più piccolo rispetto a quello ottenuto calcolando il tasso di estinzione in relazione a periodi di tempo dell'ordine del milione di anni. Pertanto, la validità del paragone tra tassi di estinzione calcolati su intervalli di tempo di lunghezza diversa può essere messa in discussione (Palombo, 2021).

Un altro punto critico è che sia il numero di specie che si stanno estinguendo nei tempi moderni (dal 1500) sia il numero di quelle che si estinsero nel passato è difficile da stimare. Per quanto riguarda le prime, infatti, i dati della IUCN che valutano lo stato

di estinzione sono disponibili solo per il 3% delle specie, ovvero per 142.500 dei circa 7 milioni di specie stimati (IUCN).

Inoltre, la maggior parte delle informazioni che ci consentono di calcolare il numero di specie esistenti riguardano i vertebrati, soprattutto mammiferi e uccelli; ma sono disponibili pochi dati sul numero di specie esistenti di invertebrati, specialmente per quanto riguarda gli organismi che abitano regioni remote o quelli appartenenti a gruppi tassonomici poco studiati o estremamente diversificati come gli insetti.

Di conseguenza, la moderna perdita di biodiversità è probabilmente sottostimata ed è basata su reperti fossili che difficilmente rappresentano la reale biodiversità del passato. Abbiamo infatti poche informazioni sugli organismi dal corpo molle e, soprattutto nel caso di specie terrestri, i reperti fossili portano a stime significativamente distorte a causa dei processi tafonomici e diagenetici (Palombo, 2021).

Un altro modo, già suggerito da Barnosky e colleghi nel 2011, per quantificare l'attuale crisi di biodiversità e capire se si può parlare di sesta estinzione di massa consiste nel considerare l'intensità delle estinzioni, ovvero calcolare la percentuale di specie estinte negli ultimi 500 anni, il periodo di tempo coperto dai database della IUCN.

Ho utilizzato quindi i più recenti dati della IUCN per calcolare la percentuale di specie estinte dei vertebrati, pari a $396/55812 = 0,709\%$ (vd. Tab. 2).

Tabella 2. La tabella riporta il numero di specie estinte rispetto a quelle note per ognuna delle classi di Vertebrati, si utilizzano i dati della IUCN.

Mammiferi	87/5968
Uccelli	164/11162
Rettili	32/10148
Anfibi	35/7296
Pesci ossei	78/21238

Si noti che la scelta di utilizzare i dati relativi solo ai Vertebrati, anziché considerare anche gli Invertebrati, non indica che il tasso di estinzione dei Vertebrati può essere rappresentativo per tutta la biodiversità, ma è motivata da due diverse ragioni.

La prima è che ci consente di fare stime al ribasso, fornendo quindi una prospettiva più ottimistica possibile. Se, infatti, provassimo a stimare la percentuale di specie estinte negli ultimi 500 anni, utilizzando i dati della IUCN e includendo gli invertebrati, si passerebbe da 0,709% a 0,925% (vd. Tab. 3).

Il maggiore tasso di estinzione rilevato per gli Invertebrati è spiegabile se si tiene conto che questi organismi mostrano intervalli di tolleranza meno ampi rispetto alle specie di maggiori dimensioni, ovvero ai Vertebrati (Cowie, Bouchet and Fontaine, 2022).

Tabella 3. Confronto tra il tasso di estinzione dei Vertebrati e degli Invertebrati, usando i dati della IUCN.

Vertebrati	$396/55812=0,709\%$
Invertebrati	$774/83669=0,925\%$

La seconda ragione è che i dati della IUCN relativi alle estinzioni sono molto più abbondanti per i Vertebrati. In particolare, per Uccelli e Mammiferi sono disponibili per il 100% e per il 91% delle specie descritte (IUCN 2021, Red List v.2021-3). Degli Invertebrati, invece, nonostante rappresentino circa il 97% delle specie animali conosciute (IUCN) e contino circa 1,5 milioni di specie descritte solo per l'1,77% è stato valutato il rischio di estinzione (vd. Fig. 1a, 1b) e per il 27,2 % di queste non si hanno dati a sufficienza (IUCN; Cowie, Bouchet and Fontaine, 2022).



Figura 1a. Riporta il numero di specie esistenti di Vertebrati e Invertebrati
 Figura 1b. Riporta il numero di specie di Vertebrati e Invertebrati per le quali si è calcolato il rischio di estinzione

Dati da: IUCN 2021, Red List v.2021-3.

Se consideriamo solo l'intensità del moderno fenomeno di estinzione siamo ben lontani dal 75% necessario per poter parlare di estinzione di massa. Quando proviamo ad includere nei calcoli il numero delle specie di Vertebrati minacciati, dato riportato dalla IUCN, si scopre, però, che dallo 0,709% di specie di Vertebrati estinte negli ultimi 500 anni, si potrebbe arrivare alla perdita di quasi il 18% delle specie esistenti nei prossimi secoli, percentuale che costituisce quasi 1/4 del valore soglia per poter parlare di estinzione di massa.

Tabella 4. Specie minacciate di Vertebrati per classe

Dati da: IUCN 2021, Red List v.2021-3.

Mammiferi	1333/5968	
Uccelli	1445/11162	10 024/55 812=0,1796
Rettili	1839/10148	17,96%
Anfibi	2488/7296	
Pesci ossei	2919/21238	

Consideriamo ora l'altra caratteristica delle estinzioni. ovvero la velocità. Utilizzando solo i dati relativi ai Vertebrati, supponiamo che le prossime estinzioni avvengano con la stessa velocità di quelle degli ultimi 500 anni e proviamo a calcolare quanti anni ci vorrebbero affinché si estingua il 75% dei Vertebrati.

$$0,7:500=75:X \quad X=53571 \text{ anni}$$

A questo punto siamo in grado di affermare che, considerando l'intensità dell'attuale fenomeno di perdita di biodiversità, ovvero la percentuale di specie estinte, siamo ben lontani dal 75% per poter parlare di estinzione di massa.

Tuttavia, prendendo in considerazione anche la velocità con cui le estinzioni si stanno verificando, e ipotizzando che continuino con la stessa velocità degli ultimi 500 anni, per arrivare al 75% di Vertebrati estinti sarebbero necessari solo 53.571 anni. Ciò significa che il fenomeno attuale sta avvenendo molto più rapidamente delle precedenti estinzioni di massa, la cui durata rientrava nell'ordine del milione di anni.

Nonostante la velocità di estinzione delle specie animali sia molto superiore a quella delle *Big Five*, non possiamo affermare che si stia verificando una sesta estinzione di massa. Una tale affermazione potrebbe essere avanzata solo a posteriori, qualora si estinguesse il 75% delle specie. Quel che si può affermare, a partire dalle conoscenze attuali, è che esistono i presupposti perché si verifichi una sesta estinzione di massa.

2. Uomo, da scimmia nuda a forza distruttrice

2.1. Agricoltura: l'inizio del dominio dell'uomo sulla natura

L'attuale perdita di biodiversità è causata dall'attività antropica. Prima di chiederci in che modo, è necessario capire quale sia stato il rapporto tra *Homo sapiens* e natura nel corso dei millenni e come sia cambiato nel tempo.

Homo sapiens compare circa 300.000 anni fa in Africa; per i successivi 200.000 anni, gli esseri umani non mostrano tratti che li distinguano in modo netto dalle altre specie del genere *Homo*, dalle quali si differenziano per l'anatomia meno robusta ma il cervello più grande.

Una tappa importante nella storia umana è segnata dalla migrazione fuori dall'Africa, iniziata più di 60.000 anni fa e protrattasi per i successivi millenni, al punto che 14.000 anni fa, prima della fine del Pleistocene, l'uomo si era già stabilito in tutti i continenti esclusa l'Antartide (Ellis, 2020).

Nel corso delle sue migrazioni, *Homo sapiens* ha generato un'ondata di estinzione nei nuovi continenti occupati. In particolare, la comunità scientifica si interroga, attualmente, sulla possibilità che la nostra specie abbia causato l'estinzione della megafauna (Cowie, Bouchet and Fontaine, 2022). La maggior parte degli studiosi è d'accordo nell'affermare che i cambiamenti climatici abbiano svolto un ruolo importante, ma le evidenze suggeriscono che l'uomo sia stato il maggior responsabile (Cowie, Bouchet and Fontaine, 2022).

Da ciò si comprende che le estinzioni di origine antropogenica non sono un fenomeno recente; ma in che modo l'uomo è diventato una forza così influente sul nostro pianeta da essere in grado di causare la sesta estinzione di massa?

Un decisivo aumento dell'impatto dell'uomo sulla natura si è verificato in seguito alla nascita dell'agricoltura, avvenuta più di 10.000 anni fa.

I primi metodi prevedevano un tipo di coltura itinerante che consisteva nel coltivare la terra per pochi anni e poi abbandonarla quando la fertilità del suolo diminuiva; successivamente, l'uomo mise a punto nuove tecniche per aumentare la produttività del suolo, tra cui l'introduzione dell'aratro, la concimazione e la modifica di bacini idrici e sistemi di irrigazione (Ellis, 2020).

La nascita dell'agricoltura ha da un lato sicuramente rivoluzionato la vita degli umani dal punto di vista dell'alimentazione e delle abitudini di vita, infatti, la costante disponibilità di cibo ha reso possibile il passaggio dal nomadismo alla stanzialità; dall'altro lato, ha modificato il rapporto che l'uomo aveva con la natura. Prima, infatti, la sopravvivenza degli umani era basata sulla raccolta e la caccia, pertanto, i primi erano vincolati dalle leggi e dai mutamenti della natura. Iniziando a lavorare e coltivare la terra, gli uomini non dovevano più solo adattarsi all'ambiente e a ciò che questo spontaneamente offriva, ma, per la prima volta, hanno iniziato a modificarlo a proprio vantaggio.

2.2. Le maggiori cause di perdita della biodiversità

2.2.1. Land use change e deforestazione

In un certo senso si potrebbe affermare che la nascita dell'agricoltura rappresenta un primo passo verso il dominio dell'uomo sulla natura e l'inizio di un fenomeno definito *land use change*.

Secondo l'IPBES, (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) fondata nel 2012 col fine di migliorare la comunicazione tra scienza e politica sulle questioni della biodiversità e dei servizi ecosistemici, le modifiche operate dall'uomo nell'utilizzo dei terreni rappresentano al giorno d'oggi la principale causa di perdita di biodiversità (Rull, 2022). Solo l'agricoltura e l'acquacoltura costituiscono una minaccia per 10 225 specie animali, pari al 55,9% di quelle valutate dalla IUCN.

Attualmente più del 50% della superficie di terreni è stato direttamente alterato dall'uomo, in gran parte convertendo le terre selvatiche in coltivazioni, pascoli e piantagioni di legname (Sage, 2020).

A questo proposito, si può operare una distinzione tra trasformazione intensiva del territorio e cambiamento estensivo nell'uso del suolo.

Il primo comporta la rimozione intenzionale, diretta e relativamente rapida della vegetazione naturale attraverso attività come il disboscamento agricolo, il taglio a raso, la costruzione di dighe, l'urbanizzazione e l'estrazione mineraria. In questo caso l'habitat naturale viene completamente eliminato e, laddove rimane, risulta frammentato; in questo modo, le dinamiche di metapopolazione vengono alterate, il successo riproduttivo e la diversità genetica ridotti.

In tali condizioni può accadere che alcune specie non si estinguano immediatamente, ma che persistano in popolazioni dal numero ridotto di individui; a questo punto, tuttavia, le dimensioni di queste e l'integrità dell'habitat scenderanno però al di sotto di soglie sostenibili, pertanto queste specie sono destinate all'estinzione. A questo proposito si parla di debito di estinzione (Sage, 2020).

Il secondo, ovvero il cambiamento estensivo dell'uso del suolo, avviene in modo graduale e comporta piccoli cambiamenti che si accumulano nel tempo e che spesso rimangono inosservati fino a che si supera una certa soglia che innesci una trasformazione radicale. Tra le attività antropiche che causano questo fenomeno vi sono, ad esempio, la creazione di strade o macchie in cui vengono tagliati gli alberi all'interno di una foresta: sono interventi pericolosi perché il manto d'erba può poi espandersi e sostituire e distruggere la foresta. Un altro esempio è il controllo del

fuoco, che causa la sostituzione delle piante tolleranti il fuoco con quelle non tolleranti. (Sage, 2020).

La conversione dei terreni ad altro uso è spesso legata alla deforestazione, consistente nella completa rimozione di alberi.

Attualmente le foreste ricoprono il 31% della superficie del pianeta, con un'estensione di 4,06 miliardi di ettari (FAO, 2020). Nel corso degli ultimi decenni abbiamo perso centinaia di milioni di ettari di foresta (vd. Fig.2), e la velocità di deforestazione ha raggiunto un picco tra il 1980 e il 1990 con una perdita di 15,1 milioni di ettari all'anno (Ritchie and Roser, 2021b).

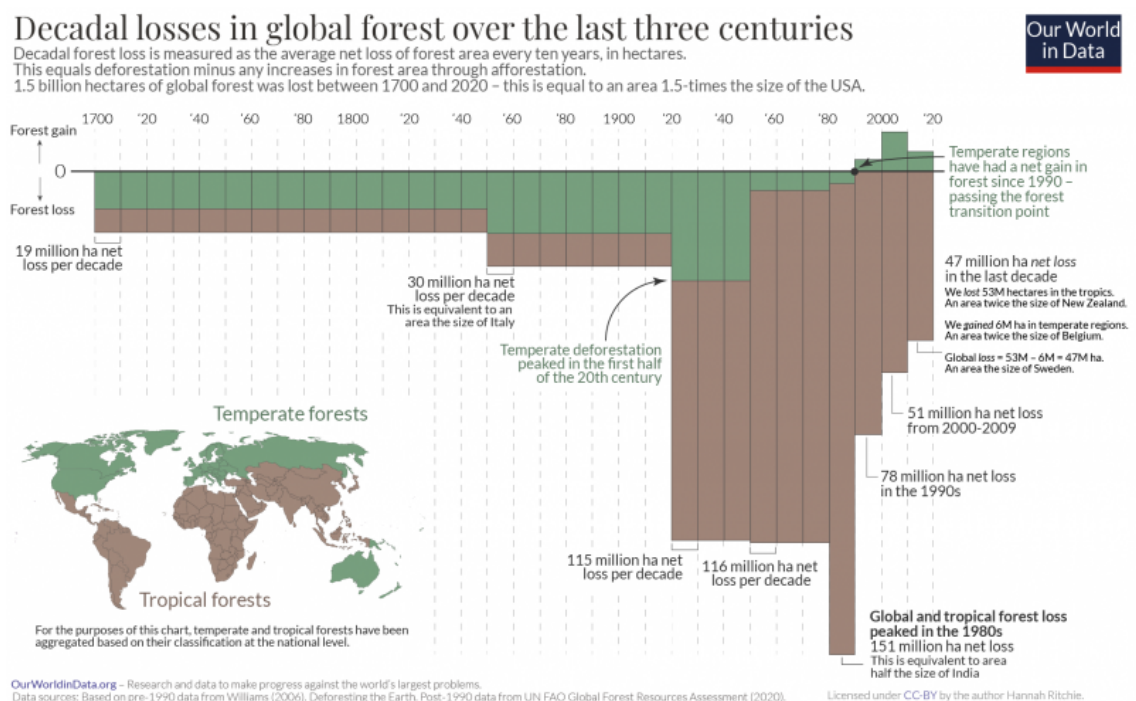


Figura 2. Dati relativi alla deforestazione degli ultimi tre secoli.

Fonte: Our World in Data

Negli anni successivi la velocità di deforestazione è diminuita, passando a 7,8 milioni di ettari persi all'anno tra il 1990 e il 2000, a 5,2 milioni tra il 2000 e il 2010 e a 4,7 milioni tra il 2010 e il 2020 (FAO, 2020).

Le più colpite dalla deforestazione sono le foreste tropicali, che costituiscono il 45% delle foreste globali e rappresentano gli ecosistemi più ricchi di biodiversità sulla Terra.

La causa principale della deforestazione tropicale è, ancora una volta, l'agricoltura; alcune precisazioni sono però necessarie. In America Latina le foreste vengono spesso convertite in pascoli o a terreni per la produzione di mangime per il bestiame; nei Paesi del Sud-est asiatico la deforestazione è primariamente causata dall'espansione agricola, soprattutto legata alla coltivazione della palma da olio. In Africa i terreni deforestati vengono convertiti a campi agricoli che vengono coltivati temporaneamente e poi abbandonati: in tal caso si parla di *shifting agriculture* (Curtis et al., 2018).

2.2.2. Sovrasfruttamento

Un'altra grande minaccia alla biodiversità è lo sfruttamento diretto delle specie. Per quanto riguarda le specie terrestri, la pressione che l'uomo esercitava su queste attraverso la caccia è diminuita con la nascita dell'agricoltura (Ellis, 2020).

Al giorno d'oggi però alcune specie rischiano di estinguersi in quanto vittime di uno dei più grandi *business* del Pianeta (WWF), il commercio di specie selvatiche, che è in continua crescita (Sage, 2020).

Alcuni degli esemplari prelevati in natura vengono usati per collezionismo o come animali da compagnia, o in altri casi vengono uccisi per venderne parti come le corna, le pelli e le ossa come trofei o per utilizzarli nella medicina tradizionale orientale.

In realtà le specie maggiormente colpite dal sovrasfruttamento sono le specie acquatiche. A questo proposito si parla più specificatamente di *overfishing*, fenomeno che si verifica quando i pesci vengono catturati a velocità maggiori di quanto le popolazioni possono riprodursi (Ritchie and Roser, 2021a).

Sebbene la domanda di pesce di mare e di acqua dolce da parte delle società umane abbia continuato ad esercitare forti pressioni sulle specie selvatiche che vivono in ambienti fluviali, lacustri, costieri e marini (Ellis, 2020), tali pressioni sono diventate molto più consistenti solo con la nascita della pesca industriale, che ha portato dal 1970 al 2010 al declino del 39% nelle popolazioni mondiali di organismi marini (Sage, 2020).

Spesso lo sfruttamento eccessivo delle risorse ittiche, oltre ad essere disastroso per gli stock ittici, lo è anche per le comunità locali di pescatori la cui sussistenza è strettamente legata a tali risorse.

Un esempio di ciò è stato il crollo, avvenuto, negli anni '70, dell'industria ittica peruviana dell'acciuga, causato dall'eccessivo sfruttamento di questa specie, la cui popolazione era diminuita in seguito ad una stagione influenzata da El Niño (Pierfederici, 2006).

Una simile situazione si è osservata nell'Atlantico Nord-occidentale, in particolare nell'area di mare al largo delle coste di Terranova, quando la pesca eccessiva del merluzzo ha portato nel 1992 al crollo all'1% rispetto al picco stimato per questa popolazione e al conseguente collasso dell'industria ittica legata a tale specie (Berry, 2020).

2.2.3. Specie aliene

L'economia di interi continenti subisce un impatto negativo da un'altra minaccia alla biodiversità, quella legata all'introduzione di specie aliene. Tali organismi solo in Europa tra il 1960 e il 2020 hanno causato danni pari a più di 100 miliardi di euro (Haubrock *et al.*, 2021).

Una specie è definita aliena quando viene introdotta in un'area che non rientra nella sua distribuzione storica (Ha and Schleiger, 2021b) e che non avrebbe potuto raggiungere autonomamente. Tali specie possono essere portate dagli umani in modo intenzionale - un esempio sono patate e pomodori, entrambi originari del Sud America, che, una volta introdotti in Europa, hanno rappresentato per secoli un'importante fonte

di reddito - oppure introdotti in modo non intenzionale, attraverso il trasporto di persone e merci per via aerea o marittima (efsa).

Un famoso esempio di specie introdotta in Europa e diventata invasiva è la nutria: importata dall'America per la sua pelliccia, ora presente allo stato selvatico, causa ingenti danni economici, danneggiando canali e sistemi di protezione contro le inondazioni, e altrettanti danni ecologici decimando specie indigene come i topi d'acqua (efsa).

Le specie invasive rappresentano una minaccia e vengono definite invasive quando raggiungono habitat naturali dove non vi sono concorrenti o predatori; inoltre possono causare una diminuzione nelle popolazioni di specie autoctone attraverso la competizione per le risorse, la predazione o poiché rappresentano un vettore di malattie e agenti patogeni (Ha and Schleiger, 2021b).

Agenti patogeni e specie aliene possono anche venire trasportati attraverso macro- e microplastiche. I detriti di plastica rappresentano, inoltre, una forma di inquinamento dannosa per una grande varietà di organismi marini. Si stima, infatti, che questo materiale abbia un impatto negativo su più di 800 specie marine e costiere sia in modo diretto, ad esempio attraverso l'ingestione o il soffocamento, sia in modo indiretto, quando la plastica danneggia gli habitat di tali specie (United Nations Environment Programme, 2021).

2.2.4. Inquinamento

Un altro tipo di inquinamento particolarmente dannoso per la biodiversità dei corsi d'acqua dolce e degli habitat marini è quello chimico, legato a sostanze di varia provenienza e natura, come ad esempio fosforo e azoto oltre ai metalli pesanti.

Questi due elementi, in particolare, possono entrare nei corsi d'acqua sia quando, utilizzati in modo eccessivo come fertilizzanti, vengono dilavati dal terreno, sia quando vengono scaricati dalle industrie, insieme ad altre sostanze chimiche.

Azoto e fosforo causano un processo detto eutrofizzazione poiché arricchiscono i corsi o bacini d'acqua dove si riversano di sostanze nutritive, stimolando la crescita di alghe, fitoplancton e cianobatteri (Ellis, 2020).

Questi organismi rappresentano una minaccia per l'ambiente acquatico perché bloccano la luce, impedendole di penetrare nelle acque sottostanti e inibendo così la crescita di specie vegetali, essenziali per gli habitat marini o lacustri (Ellis, 2020) ; possono inoltre produrre tossine, alcune delle quali dannose anche per gli organismi animali, e infine possono causare l'insorgenza di zone morte.

Le zone morte si formano quando i batteri utilizzano l'ossigeno per decomporre le alghe, il fitoplancton e i cianobatteri che, una volta morti, si depositano sul fondo. Queste zone, caratterizzate da acque con poco ossigeno nelle quali la maggior parte delle specie non può vivere, si formano spesso lungo le coste.

Il fenomeno delle deposizioni acide rappresenta un altro problema, che vede come protagonista l'azoto ed interessa sia gli ambienti acquatici sia quelli terrestri.

L'azoto, in particolare gli ossidi di azoto (NO e N₂O), viene emesso dai campi concimati, dagli incendi e in maggiore quantità dall'uso dei combustibili fossili, insieme all'anidride solforosa (SO₂); tali inquinanti in atmosfera si trasformano in acidi e poi ricadono sulla terra sotto forma di precipitazioni come la pioggia acida, che

può uccidere tutti gli alberi di una foresta e avere effetti disastrosi in ambienti acquatici come i laghi, che acidificati possono portare alla morte i pesci che vi abitano (United States Environmental Protection Agency).

2.2.5. Climate change

L'ossido di diazoto (N_2O) è anche un gas serra, come il metano e l'anidride carbonica. Questi gas vengono così definiti poiché, insieme al vapore acqueo, assorbono parte del calore irradiato dalla superficie terrestre quando viene riscaldata dalle radiazioni solari. Sono presenti naturalmente in atmosfera, ma le fonti antropiche ne hanno aumentato fortemente la presenza causando un innalzamento nelle temperature globali.

La CO_2 , il gas serra più abbondante, ha sempre subito variazioni considerevoli nel tempo. I climatologi, trivellando in profondità il ghiaccio dell'Antartide e della Groenlandia, sono riusciti a ricostruire i cicli della temperatura terrestre e dell'anidride carbonica mediante misurazioni degli strati di ghiaccio che si sono depositati nel corso di centinaia di migliaia di anni. Durante i numerosi cicli glaciali e interglaciali di questo periodo, il livello di anidride carbonica nell'atmosfera è aumentato e diminuito di pari passo con il riscaldamento e il raffreddamento della Terra.

Il primo a scoprire che l'attività antropica stava modificando l'atmosfera terrestre tramite l'accumulo di CO_2 fu Keeling, che fece installare, con i fondi stanziati dall'Anno geografico internazionale, un analizzatore a gas infrarossi in cima al vulcano Mauna Loa, nelle Hawaii (Ellis, 2020).

Nel 1960 pubblicò le sue ricerche che dimostravano l'esistenza di variazioni stagionali nella concentrazione della CO_2 (vd. Fig.3a), con i livelli di picco in corrispondenza dell'inverno nell'emisfero settentrionale e una riduzione durante la primavera e l'estate, durante la crescita delle piante nell'emisfero ricco di terre emerse (Ellis, 2020).

Oltre a ciò, i dati raccolti dal ricercatore e poi utilizzati per costruire quella che è stata definita curva di Keeling rivelarono un costante aumento dei livelli di CO_2 (vd. Fig.3b).

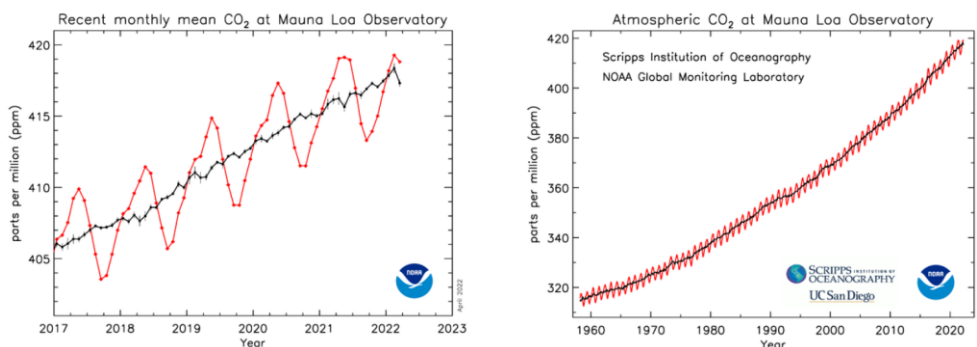


Figura 3a. Evidenzia le variazioni stagionali nella concentrazione di CO_2 atmosferica.
Figura 3b. La curva di Keeling rivela un andamento crescente nella concentrazione di CO_2 atmosferica.

Fonte: NOAA.

Le prime misurazioni, risalenti al 1958, riportano una concentrazione di CO_2 atmosferica inferiore a 316 ppm (NOAA), valori poco più alti di quelli preindustriali, corrispondenti a circa 280 ppm (NASA, 2022).

I livelli di CO₂ in atmosfera sono cresciuti vertiginosamente nel corso dell'ultimo secolo, insieme a quelli di metano e protossido di azoto, principalmente a causa dell'uso di combustibili fossili, e hanno raggiunto livelli mai visti prima durante tutto l'Olocene (Ellis, 2020).

Che il loro accumulo sia proporzionale al riscaldamento climatico trova conferma nei dati riportati dalla NOAA secondo i quali le temperature della terra e degli oceani sono aumentate ad una velocità media di 0,18°C per decade dal 1981, ovvero ad una velocità pari a più del doppio di quella del secolo precedente.

Inoltre i cinque anni più caldi dal 1880 al 2021 sono stati tutti dopo il 2015, con al primo posto il 2016, seguito dal 2020 (NOAA).

L'IPCC stima che se continueremo ad accumulare gas serra nell'atmosfera con il ritmo attuale, le temperature atmosferiche, già più alte di circa 1°C rispetto al livello preindustriale, aumenteranno mediamente di un altro mezzo grado tra il 2030 e il 2052 (IPCC, 2018).

Già ora si ritiene che il riscaldamento globale stia avendo un impatto negativo su molte specie del pianeta: ciò sta avvenendo in vari modi, e uno di questi è il cambiamento nel clima di diverse regioni.

Queste modifiche comprendono il raggiungimento di temperature estreme in alcune aree del pianeta e l'alterazione nella distribuzione e nell'intensità delle precipitazioni, che sempre più spesso sono concentrate in un numero minore di eventi, ma di maggiore intensità. Ciò a sua volta determina periodi di siccità più lunghi e una maggiore frequenza negli incendi.

Un esempio di un'anomala ondata di calore è quella che nell'agosto del 2021 ha fatto registrare 48,8°C a Siracusa, segnando un nuovo record europeo.

L'IPCC a questo proposito dichiara che le ondate di calore estreme, che di solito si verificavano ogni 50 anni, stanno già avvenendo ogni decade e se il riscaldamento globale raggiungerà 1,5°C ciò accadrà approssimativamente ogni 5 anni (Greenfield and Weston, 2021).

Il cambiamento nelle condizioni climatiche su scala regionale è associato a modifiche negli ecosistemi di tali regioni, e questo fa sì che le specie diventino meno adatte al proprio habitat, e che siano favorite specie non autoctone, meglio adattate a climi più caldi.

L'areale di molte specie verrà quindi ristretto, molte specie animali saranno spinte a migrare, se possibile, verso ambienti a latitudini maggiori, entrando in competizione con le specie locali (Ha and Schleiger, 2021a).

Già ora, secondo i dati riportati dall'IPBES, la distribuzione di quasi la metà dei mammiferi terrestri non volanti e quasi un quarto degli uccelli sta risentendo negativamente della crisi climatica (Greenfield and Weston, 2021).

Un esempio di ecosistema che sta subendo profonde modifiche è la tundra, dove iniziano ad essere presenti arbusti legnosi (IPCC, 2018). Un altro esempio è fornito da quanto sta accadendo in Groenlandia e in Antartide, dove dal 2002, secondo i dati riportati dalla NASA, sono andati persi rispettivamente 275 e 152 miliardi di tonnellate di ghiaccio (NASA, 2022). Lo scioglimento dei ghiacci non solo rappresenta una minaccia per le specie di queste aree, ma provocherà danni anche negli ecosistemi

costieri, nei delta dei fiumi e nelle piccole isole, causando un innalzamento del livello dei mari tra 0,26 e 0,77m entro il 2100, secondo le stime dell'IPCC (IPCC, 2018).

Gli oceani, che svolgono un ruolo importante nella regolazione della quantità di CO₂ in atmosfera, diventeranno più acidi in seguito al maggiore assorbimento di anidride carbonica.

La CO₂, infatti, reagendo con l'acqua, produce acido carbonico, sostanza che abbassa il pH dell'acqua e rende più difficile per i coralli e alcuni tipi di plankton e altri organismi la formazione dei loro scheletri interni e delle conchiglie. Così, la diminuzione del pH può rendere più difficile la crescita di questi animali.

Questi effetti, a loro volta, potrebbero alterare in modo consistente la biodiversità e la produttività degli ecosistemi oceanici e costieri (United States Environmental Protection Agency, 2021).

È inoltre risaputo che l'innalzamento delle temperature e l'acidificazione degli oceani sono responsabili dello sbiancamento dei coralli, il processo attraverso il quale i coralli espellono le alghe unicellulari (*Zooxanthellae*) che tipicamente conducono la fotosintesi e dalle quali ricavano gran parte del nutrimento (Spalding and Brown, 2015).

Vi è un'ultima categoria di conseguenze del riscaldamento globale sulla biodiversità che è probabilmente meno nota al pubblico: a questo argomento è dedicata la parte finale della tesi.

3. Caso di studio

3.1 Cos'è il meccanismo TSD

La domanda che mi sono posta è la seguente: “Come il cambiamento climatico può influire sulle specie che presentano sistema TSD secondo cui la determinazione del sesso dipende dalla temperatura d'incubazione delle uova, come nel caso delle tartarughe marine?”.

Per provare a trovare una risposta a questa domanda è prima necessario capire in che modo funziona il meccanismo TSD e con quali differenze nelle varie specie.

Questo sistema di determinazione del sesso è stato osservato in circa 400 specie di pesci e rettili (Lockley, Eizaguirre, 2021).

Nelle tartarughe marine la temperatura d'incubazione delle uova durante il periodo termosensibile dello sviluppo (TSP), tra gli stadi embrionali 21 e 26 (Monsinjon et al., 2019), determina l'attività dell'aromatasi, ormone deputato alla conversione del testosterone in estrogeni e quindi responsabile del differenziamento gonadico in senso femminile (Pieau et al., 2001).

Ciò significa che la determinazione del sesso viene influenzata dalle temperature dei nidi, le quali variano in base alla profondità a cui si trovano, alla quantità d'ombra e all'umidità a cui sono esposti. Queste variabili dipendono dal sito del singolo nido e determinano una variazione nella *sex ratio*, definita come il rapporto tra i due sessi, sia all'interno della popolazione sia tra popolazioni.

Per esempio la relazione tra precipitazioni e *sex ratio* è stata generalmente attribuita all'effetto rinfrescante della pioggia sui substrati dei nidi tramite l'evaporazione, anche se recentemente è stato anche suggerito che l'umidità di per sé possa avere un effetto sulla *sex ratio*.

Il meccanismo TSD può essere di tre tipi diversi.

Tipo 1a: è presente, tipicamente, nella maggior parte delle specie di tartarughe, tra cui *Caretta caretta*; prevede lo sviluppo di fenotipo maschile a temperature più fredde e di fenotipo femminile a temperature più calde.

Tipo 1b: Lo sviluppo in senso maschile o femminile è invertito rispetto al tipo 1a.

I maschi nascono a temperature più calde e le femmine a temperature più fredde; è tipico del tuatara (*Sphenodon punctatus*).

Tipo 2: È comune nei coccodrilli, specie nella quale i maschi vengono generati a temperature intermedie e le femmine a temperature estreme, sia calde sia fredde.

Ad una prima analisi il meccanismo TSD potrebbe sembrare fortemente svantaggioso poiché esporrebbe le popolazioni di specie che producono prole femminile ad alte temperature al rischio di femminizzazione in seguito all'eccessivo innalzamento della temperatura ambientale, causato dall'attuale cambiamento climatico (Tomillo, Spotila, 2020).

Questo rischio potrebbe essere particolarmente concreto per *Caretta caretta* e altre tartarughe marine, poiché nelle loro popolazioni non si osserva una tipica *sex ratio*: in queste specie, cioè, il rapporto tra il numero delle nascite di prole maschile e femminile non è pari a 1, ma è fortemente sbilanciato verso le femmine (Tomillo, Spotila, 2020). Per la maggior parte delle specie, infatti, è valido il Principio di Fisher, proposto per la prima volta nel 1930, secondo cui la produzione di prole presenta un rapporto simile a 1:1 tra maschi e femmine (Tomillo, Spotila, 2020). Come spiega il biologo evoluzionista William Hamilton in un famoso articolo pubblicato su Science nel 1967, «Supponendo che in una popolazione le nascite di maschi siano meno comuni delle femmine, i maschi che nasceranno avranno maggiori probabilità di accoppiarsi con le femmine e pertanto ci si aspetta producano più prole. Ne deriva che i genitori geneticamente predisposti a produrre maschi tenderanno ad avere in media un più alto numero di nipoti; quindi, i geni che favoriscono la produzione di maschi si diffonderebbero rapidamente e la nascita di individui maschi diventerebbe più comune. Qualora si raggiungesse una *sex ratio* di 1:1, non ci sarebbe più alcun vantaggio nel produrre maschi anziché femmine. Lo stesso esempio vale se consideriamo le femmine, ne deriva che il rapporto di equilibrio è 1:1».

Per capire il motivo per cui nelle popolazioni di tartarughe marine vengano prodotte molte più femmine e quindi per comprendere quali potrebbero essere i vantaggi associati alla determinazione del sesso temperatura-dipendente in queste specie, bisogna fare alcune considerazioni.

Nelle popolazioni di tali specie è la *sex ratio* primaria (PSR), ovvero il rapporto tra le covate prodotte, ad essere sbilanciata verso le femmine; la *sex ratio* operativa (OSR), che fa riferimento solo agli individui adulti che si riproducono in una certa stagione, è, invece, spesso vicina all'equilibrio (Tomillo and Spotila, 2020). Ciò si spiega se si considera la differenza dei costi riproduttivi per i due diversi sessi. Le femmine, infatti, oltre a dover migrare verso le aree di nidificazione, come fanno i maschi, devono anche trascorrere circa 2 mesi nei pressi della spiaggia dove nidificare, possibilmente senza

mangiare e investendo un'enorme quantità di energia nella produzione delle uova. I costi fisiologici a carico degli individui maschili, al contrario, consentono loro di riprodursi con maggiore frequenza. Si è osservato, ad esempio, che i maschi di *Caretta caretta* in Grecia migrano almeno due volte più spesso delle femmine e circa il 76% dei maschi torna nei siti di riproduzione in anni consecutivi (Tomillo and Spotila, 2020).

Tenendo a mente tali osservazioni, si capisce pertanto in che modo nelle tartarughe marine la maggior produzione di femmine abbia un significato adattativo. Queste osservazioni non sono tuttavia sufficienti a giustificare la presenza del meccanismo TSD in oltre 400 specie animali, e inoltre non chiariscono il motivo per cui nelle tartarughe marine i fenotipi femminili si formino a temperature più elevate secondo il meccanismo TSD di tipo 1a, mentre in altri organismi si osservino il tipo 1b o 2.

3.2 Qual è il senso del meccanismo TSD?

Per spiegare l'evoluzione del sistema TSD sono state proposte varie ipotesi. Tra queste vi è il Modello di Charnov-Bull della *fitness* differenziale, il quale suggerisce che i vantaggi sesso-specifici sono associati a particolari condizioni di temperatura dell'ambiente (Lockley, Eizaguirre, 2021). Secondo questa teoria, quindi, il meccanismo TSD assicura la produzione dei sessi alle rispettive temperature ottimali (Lockley, Eizaguirre, 2021). Tale ipotesi è valida per alcune specie di rettili, tra cui l'anfiboluro australiano (*Amphibolurus muricatus*) della famiglia degli agamidi, ma non per tutte.

Si è condotto, infatti, un esperimento (Warner & Shine, 2008) in cui le uova sono state incubate a differenti temperature e metà di queste sono state trattate con un inibitore dell'aromatasi. In questo modo è stato forzato lo sviluppo in senso maschile, indipendentemente dalle condizioni di temperatura dell'ambiente, e si è potuto dimostrare che la durata della vita e il successo riproduttivo era maggiore per i maschi incubati alle temperature che prevedono normalmente lo sviluppo di maschi (Lockley, Eizaguirre, 2021).

Gli studi condotti (Morjan & Janzen, 2003) utilizzando, invece, la tartaruga dal dorso di diamante (*Malaclemys terrapin*) non hanno portato a risultati che confermassero tale modello (Lockley, Eizaguirre, 2021).

Un'ipotesi più recente, avanzata da Rollinson nel 2019, è quella definita *Mighty Males hypothesis*, secondo cui i maschi dovrebbero essere prodotti a temperature che ne massimizzano la *fitness*; invece, le femmine dovrebbero essere prodotte in condizioni non ottimali. Ciò è spiegato dal fatto che il successo riproduttivo delle femmine è limitato principalmente dal numero di gameti e pertanto anche una femmina di minore qualità che nasce in condizioni non ottimali non soffrirebbe una riduzione nel successo riproduttivo nel corso della vita. D'altro canto, poiché il successo riproduttivo dei maschi è limitato dalla loro abilità nel competere per l'accoppiamento, prole maschile dovrebbe essere prodotta quando le condizioni ambientali ne massimizzano la *fitness* (Lockley, Eizaguirre, 2021).

Questa ipotesi consente di spiegare la determinazione del sesso temperatura-dipendente di tipo II, in cui le femmine vengono generate a temperature estreme e

quella di tipo Ia in cui la nascita delle femmine avviene a temperature più elevate (Lockley, Eizaguirre, 2021).

Alte temperature nelle tartarughe marine sono infatti associate ad una maggiore mortalità della prole, riducendo il successo nella schiusa e la *fitness* dei piccoli.

Da ciò si comprende quindi che l'effetto del cambiamento climatico su queste specie non è solo limitato all'effetto della temperatura sulla *sex ratio*, ma incide negativamente in modo diretto sulla sopravvivenza. L'ipotesi dei *Mighty males* non può, però, spiegare il meccanismo di tipo Ib, in cui i maschi vengono prodotti a temperature maggiori.

3.3 Adattamenti di *Caretta caretta* all'aumento delle temperature

Ora, tenendo a mente la differenza tra *sex ratio* primaria e operativa, dovrebbero essere chiari i vantaggi associati al meccanismo TSD nelle tartarughe marine, come *Caretta caretta*; ma per capire quali potrebbero essere gli effetti di un ulteriore aumento delle temperature di incubazione in queste specie, i cui siti di nidificazione producono principalmente femmine con un *bias* che tende in alcuni casi quasi al 100%, è necessario quantificare il loro potenziale adattativo, definito come l'abilità di popolazioni o specie di rispondere alla selezione attraverso cambiamenti fenotipici o molecolari (Monsinjon et al., 2019).

Un innalzamento delle temperature medie globali potrebbe, infatti, rendere sempre meno frequente la produzione di maschi e di conseguenza mettere in pericolo il successo riproduttivo a lungo termine delle popolazioni di *Caretta caretta*, se non riusciranno a stare al passo con le temperature previste e a mantenere una *sex ratio* che ne garantisca la sopravvivenza (Monsinjon et al., 2019).

Se da un lato ci si aspetta che le specie con un alto tasso di variabilità ereditabile e corti tempi di generazione rispondano velocemente alla selezione tramite la microevoluzione, dall'altro si teme che le specie con lunghi tempi di generazione possano avere limitate abilità di affrontare l'attuale cambiamento climatico che, nel caso delle tartarughe marine, si somma ad altre pressioni.

Le principali sono fenomeni come il *bycatch* (che consiste nella cattura accidentale di specie non destinate al commercio ittico e interessa, oltre alle tartarughe marine, molte altre specie tra cui uccelli, delfini, squali e razze) e l'inquinamento, che riducono la *fitness* degli adulti; l'aumento d'intensità di fenomeni meteorologici estremi, che potrebbero causare la distruzione di un alto numero di nidi; cambiamenti nel regime delle precipitazioni, che potrebbero portare a una riduzione del successo d'incubazione e interferire con la *sex ratio* della covata (Monsinjon et al., 2019).

Un adattamento alle temperature in aumento potrebbe avvenire teoricamente attraverso la microevoluzione di quella che viene definita *pivotal temperature*, la temperatura d'incubazione delle uova alla quale si producono lo stesso numero di maschi e femmine. Tuttavia, tale scenario risulta improbabile in *Caretta caretta* per almeno tre motivi: il primo è che tale carattere è relativamente conservato tra le popolazioni, il che suggerisce la presenza di forti vincoli genetici; il secondo riguarda i lunghi tempi di generazione che ostacolerebbero una rapida selezione genetica degli individui che ipoteticamente potrebbero presentare una deviazione in questo carattere.

Il terzo è che l'ereditabilità effettiva di questo carattere nelle tartarughe è bassa in condizioni naturali (Monsinjon et al., 2019).

Si ritiene quindi che le strategie più probabili che potrebbero consentire a questa specie ed altre tartarughe marine di adattarsi al riscaldamento globale siano la plasticità nel comportamento e nella fisiologia (Monsinjon et al., 2019).

Un esempio potrebbe essere la plasticità nella scelta del sito di nidificazione, ma a questo proposito bisogna ricordare che le tartarughe marine sono note per il *natal homing behaviour* (tornano a riprodursi nel sito dove sono nate) e presentano un alto tasso di fedeltà al sito di nidificazione. Ne deriva che un rapido cambiamento spaziale dei siti di nidificazione su scala regionale è improbabile, anche se alcune femmine di *Caretta caretta* hanno provato a nidificare a centinaia di km dai primi siti di nidificazione in Australia e a decine di km in Sud Africa. Un simile adattamento potrebbe essere efficace se rimangono disponibili siti di nidificazione con specifiche condizioni di temperatura, ma anche se così fosse, tale strategia potrebbe non essere risolutiva qualora i cambiamenti ambientali causassero un innalzamento del livello del mare tale da ridurre i siti di nidificazione accessibili (Monsinjon et al., 2019). Un'altra pressione che potrebbe impedire alle tartarughe marine di stabilire altri siti di nidificazione è rappresentata dal crescente sviluppo costiero, il quale costituisce un disturbo in questi habitat.

Un altro tipo di adattamento potrebbe consistere nello spostamento della stagione di nidificazione; tuttavia, se questo si rivelerà sufficiente per consentire alle tartarughe marine di resistere agli impatti del riscaldamento delle spiagge di nidificazione necessita ulteriori investigazioni (Monsinjon et al., 2019).

Monsinjon e colleghi, in uno studio pubblicato nel 2019, hanno calcolato i futuri cambiamenti fenologici che 7 popolazioni di tartarughe *Caretta caretta* dovrebbero attuare per mantenere un successo di schiusa elevato e una *sex ratio* simile a quella attuale.

Il modello ricostruito dai ricercatori presume che un innalzamento della temperatura di 1°C della superficie del mare dovrebbe spostare la stagione di nidificazione di 7 giorni in accordo con dati sperimentali di studi precedenti. Ne deriva che secondo gli scenari RCP4,5 e il più pessimistico RCP8,5, descritti dall'IPCC, che ipotizzano un riscaldamento degli oceani di 1,19 °C e di 2,89 °C rispettivamente, la stagione di nidificazione dovrebbe essere spostata di 8,3 per il primo scenario e di 20,2 giorni in avanti per il secondo.

Dallo studio emerge che, per lo scenario più ottimistico, 6 delle 7 popolazioni studiate andrebbero incontro ad una riduzione nel successo di schiusa, ad eccezione della popolazione che nidifica a latitudini maggiori (su una spiaggia turca affacciata sul Mediterraneo). Nel caso del secondo scenario gli effetti negativi riguarderebbero tutte le popolazioni e sarebbero particolarmente evidenti nelle popolazioni a basse latitudini, come quella che nidifica sulle coste della Florida dove le temperature sono già al limite per garantire la sopravvivenza della covata.

Secondo il modello, inoltre, tutte le popolazioni andrebbero incontro a femminizzazione, escludendo quella della Florida, nella quale si è osservato che il rapporto tra prole femminile e maschile diminuirebbe.

Tale eccezione si potrebbe spiegare tenendo presente che nella popolazione considerata il tasso di insuccesso nella schiusa delle uova è già elevato, soprattutto nella parte finale della stagione riproduttiva, quando le temperature sono più alte e vengono prodotte principalmente femmine.

Nella parte iniziale della stagione riproduttiva, quando le temperature sono minori e vengono prodotti i maschi, il tasso di successo è, invece, più alto.

Si comprende quindi come il fatto che in una popolazione non si osservi femminizzazione della prole dipenda dal fatto che il cosiddetto *debito climatico*, dato dalla differenza tra i cambiamenti fenologici necessari ed effettivi, ed espresso in giorni, sarebbe tale da causare una generale riduzione del successo di schiusa, in particolar modo alla fine della stagione riproduttiva (Monsinjon et al., 2019).

3.4 Perché è importante quantificare il potenziale adattativo di *Caretta caretta*

La quantificazione del potenziale adattativo delle tartarughe marine è essenziale per la loro conservazione (Monsinjon et al., 2019). A questo proposito, sono state proposte diverse strategie per la gestione delle popolazioni di *Caretta caretta*.

Una di queste consiste nella ricollocazione dei nidi, un'altra nell'aumentare la superficie di ombra disponibile nei siti di nidificazione, in modo artificiale oppure tramite l'arricchimento della vegetazione costiera.

Tuttavia, l'attuazione di simili strategie porterebbe ad un abbassamento delle pressioni di selezione naturale, che a sua volta potrebbe rallentare o impedire la comparsa di potenziali adattamenti locali in tali popolazioni; inoltre bisognerebbe indagare i possibili effetti negativi che spiagge ricche di vegetazione avrebbero sul successo di nidificazione ad opera delle femmine e su quello di incubazione delle uova.

Una strategia alternativa è rappresentata dalla migrazione assistita di siti di cova tramite lo spostamento delle uova in spiagge più fresche; anche questo approccio necessita di ulteriori ricerche per poter valutare i rischi e i benefici ad esso associati.

Oltre alle strategie proposte, sarà, inoltre, necessaria una cooperazione e collaborazione internazionale finalizzata alla salvaguardia delle tartarughe marine (Monsinjon et al., 2019).

Conclusioni

È lecito parlare di Sesta estinzione di massa o si tratta di inutile allarmismo?

Utilizzando i dati relativi alle percentuali di specie estinte riportati dalla IUCN non possiamo affermare che l'attuale evento estintivo abbia raggiunto un'intensità simile a quella delle cinque grandi estinzioni del passato, questa risulta infatti ancora ben lontana dalla fatidica soglia; tuttavia, la scelta di paragonare il fenomeno attuale alle *Big Five* risulta motivata se si considera la velocità con cui sta avvenendo la perdita di biodiversità.

È necessario inoltre sottolineare che lo scenario descritto sarebbe ancora più grave se prendessimo in considerazione anche gli Invertebrati; purtroppo, però, i dati finora raccolti dalla IUCN non sono sufficienti per quantificare i tassi di estinzione di tali organismi.

È quindi lecito affermare che i presupposti per il verificarsi di una Sesta estinzione di massa ci sono e una simile catastrofe si verificherà se l'umanità non ridurrà il proprio impatto sulla biodiversità.

Milioni di specie sono messe in pericolo da cinque principali minacce di origine antropica.

Al primo posto vi è il cambiamento d'uso dei terreni, iniziato con la nascita dell'agricoltura più di 10 000 anni fa. L'agricoltura, spesso legata alla deforestazione, porta, infatti, all'alterazione di habitat naturali e delle dinamiche ecologiche.

Altre minacce sono rappresentate dal sovrasfruttamento delle risorse biotiche e abiotiche, che comprende il commercio illegale di specie selvatiche, ma che interessa soprattutto le specie acquatiche, minacciate dalla pesca eccessiva, che si sta rivelando dannosa non solo per la biodiversità, ma anche per l'industria ittica.

Un'altra grande fonte di danno economico che mette a rischio la biodiversità è l'introduzione di specie aliene invasive che, tra il 1960 e il 2020, hanno causato solo in Europa danni dell'ordine del centinaio di miliardi di euro (Haubrock et al., 2021).

Inoltre la biodiversità subisce gli effetti negativi dell'inquinamento: particolarmente dannosi sono gli inquinanti chimici che, riversandosi nei corsi o bacini d'acqua, causano il fenomeno dell'eutrofizzazione, e che, una volta liberati in atmosfera, ricadono sulla superficie terrestre sotto forma di deposizioni acide.

L'umanità è responsabile anche del riscaldamento globale: in particolare, l'utilizzo dei combustibili fossili porta all'emissione di enormi quantità di gas serra, non solo CO₂ ma anche metano e protossido di azoto, che hanno portato ad un aumento di 1°C nelle temperature atmosferiche medie annuali rispetto i livelli preindustriali e che causeranno un ulteriore aumento di 0,5°C tra il 2030 e il 2052, secondo le stime dell'IPCC (IPCC, 2018).

Riguardo al cambiamento climatico è necessario svolgere alcune riflessioni poiché questo fenomeno minaccia la biodiversità sia in modo diretto sia in modo indiretto.

Il cambiamento nelle condizioni climatiche, infatti, causa direttamente la modificazione degli ecosistemi e rende le specie autoctone meno adatte al proprio habitat, spingendole in alcuni casi a migrare altrove o riducendone l'areale.

Negli oceani, inoltre, con il maggiore assorbimento di CO₂, si verifica acidificazione delle acque e viene messa a rischio la sopravvivenza di organismi come i coralli, alcuni tipi di plankton e altri organismi che sono dotati di conchiglia o scheletro interno.

L'innalzamento delle temperature può inoltre minacciare la biodiversità in modo più subdolo: è quanto avviene per *Caretta caretta*, una delle specie con sistema di determinazione del sesso dipendente dalla temperatura.

Dalla letteratura esaminata emerge, infatti, che in seguito al cambiamento climatico diverse popolazioni di questa specie, nonostante l'attuazione di cambiamenti fenologici, subiranno non solo una riduzione nel successo di schiusa delle uova, ma anche un aumento della già fortemente predominante componente femminile.

La quantificazione del potenziale adattativo delle tartarughe marine è necessaria per individuare la migliore strategia per la conservazione di questa specie che già sta subendo perdite a causa di fenomeni come il bycatch e l'inquinamento.

In conclusione credo che l'umanità possa e debba fermare il verificarsi di una sesta estinzione, che si verificherà se la pressione sulla biodiversità non verrà drasticamente ridotta tramite l'attuazione di politiche mirate. Le soluzioni sono disponibili, ma non c'è tempo per aspettare, è necessario agire ora.

Bibliografia

Barnosky, A.D. *et al.* (2011) 'Has the Earth's sixth mass extinction already arrived?', *Nature*, 471(7336), pp. 51–57. doi:10.1038/nature09678.

Berry, D. (2020) 'Cod Moratorium of 1992', *The Canadian Encyclopedia*. Available at: <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/cod-moratorium-of-1992>.

Ceballos, G. *et al.* (2015) 'Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction', *Science Advances*, 1(5), pp. 9–13. doi:10.1126/sciadv.1400253.

Cowie, R.H., Bouchet, P. and Fontaine, B. (2022) 'The Sixth Mass Extinction: fact, fiction or speculation?', *Biological Reviews*, 97(2), pp. 640–663. doi:10.1111/brv.12816.

Curtis, P.G. *et al.* (2018) 'Classifying drivers of global forest loss', *Science*, 361(6407), pp. 1108–1111. doi:10.1126/science.aau3445.

Ellis, E.C. (2020) *Antropocene: esiste un futuro per la terra dell'uomo?* Giunti.

FAO (2020) *Global Forest Resources Assessment - Key findings*. Available at: <https://www.fao.org/3/ca8753en/ca8753en.pdf>.

Greenfield, P. and Weston, P. (2021) 'The five biggest threats to our natural world ... and how we can stop them', *The Guardian* [Preprint]. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2021/oct/14/five-biggest-threats-natural-world-how-we-can-stop-them-aoe>.

Ha, M. and Schleiger, R. (2021a) *Climate change*. Available at: [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_\(Ha_and_Schleiger\)/03%3A_Conservation/3.02%3A_Threats_to_Biodiversity/3.2.07%3A_Climate_Change](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_(Ha_and_Schleiger)/03%3A_Conservation/3.02%3A_Threats_to_Biodiversity/3.2.07%3A_Climate_Change) (Accessed: 19 April 2022).

Ha, M. and Schleiger, R. (2021b) *Invasive Species*. Available at: [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_\(Ha_and_Schleiger\)/03%3A_Conservation/3.02%3A_Threats_to_Biodiversity/3.2.06%3A_Invasive_Species](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Ecology/Environmental_Science_(Ha_and_Schleiger)/03%3A_Conservation/3.02%3A_Threats_to_Biodiversity/3.2.06%3A_Invasive_Species) (Accessed: 15 March 2022).

Haubrock, P.J. *et al.* (2021) 'Economic costs of invasive alien species across Europe', *NeoBiota*, 67, pp. 153–190. doi:10.3897/neobiota.67.58196.

IPCC (2018) *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*,. Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.

Palombo, M.R. (2021) ‘Thinking about the biodiversity loss in this changing world’, *Geosciences (Switzerland)*, 11(9). doi:10.3390/geosciences11090370.

Pierfederici, G. (2006) *L’overfishing e i problemi della sovrapesca nel mondo*. Available at: <http://www.biologiamarina.eu/OverFishing.html> (Accessed: 15 March 2022).

Richie, H. and Roser, M. (2021) *Extinctions, 2021*. Available at: <https://ourworldindata.org/extinctions> (Accessed: 15 April 2022).

Ritchie, H. and Roser, M. (2021a) *Biodiversity*. Available at: <https://ourworldindata.org/fish-and-overfishing#citation> (Accessed: 20 April 2022).

Ritchie, H. and Roser, M. (2021b) *Forests and deforestation*. Available at: <https://ourworldindata.org/deforestation#not-all-forest-loss-is-equal-what-is-the-difference-between-deforestation-and-forest-degradation> (Accessed: 22 April 2022).

Rull, V. (2022) ‘Biodiversity crisis or sixth mass extinction?’, *EMBO reports*, 23(1), pp. 1–4. doi:10.15252/embr.202154193.

Sage, R.F. (2020) ‘Global change biology: A primer’, *Global Change Biology*, 26(1), pp. 3–30. doi:10.1111/gcb.14893.

Spalding, M. and Brown, B. (2015) ‘Warm-water coral reefs and climate change’, *Science* [Preprint]. doi:<https://doi.org/10.1126/science.aad0349>.

United Nations Environment Programme (2021) *Interlinkages between the Chemicals and Waste Multilateral Environmental Agreements and Biodiversity: Key Insights*. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/36088>.

United States Environmental Protection Agency (2021) *Climate Change Indicators: Ocean Acidity*. Available at: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-ocean-acidity> (Accessed: 28 April 2022).