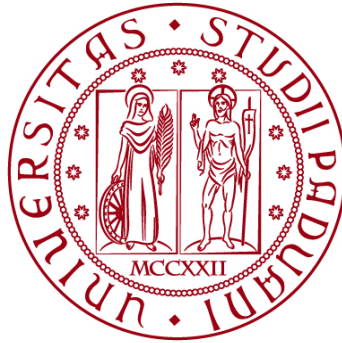


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Biologia



ELABORATO DI LAUREA

**Bleaching e microplastiche: crescenti minacce per le
barriere coralline**

**Tutor: Prof.ssa Maria Gabriella Marin
Dipartimento di Biologia**

Laureanda: Lara Costantini

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INDICE

INTRODUZIONE	3
CAPITOLO I: Le barriere coralline	5
CAPITOLO II: I cambiamenti climatici	7
CAPITOLO III: Le microplastiche	9
CAPITOLO IV: Il bleaching.....	11
CAPITOLO V: Bleaching e microplastiche negli anemoni di mare	16
CONCLUSIONI.....	18
LETTERATURA CITATA.....	20

INTRODUZIONE

La popolazione umana è una parte cospicua della biosfera che consuma energia e produce rifiuti in grandi quantità. Negli ultimi decenni si è assistito all'aumento dell'attività antropica e dell'inquinamento, che hanno comportato quelli che definiamo cambiamenti climatici. I cambiamenti climatici sono responsabili, direttamente e non, di numerose modifiche agli ecosistemi, sia terrestri che marini, compromettendo interi habitat e nicchie ecologiche.

I cambiamenti climatici più importanti dipendono dal cosiddetto "effetto serra".

Tra i gas serra, l'anidride carbonica (CO₂) è il principale responsabile dell'acidificazione degli oceani e, insieme all'aumento delle temperature della superficie marina, è il principale responsabile di fenomeni di riduzione di crescita e di morte di molti organismi ed interi ecosistemi, tra cui le barriere coralline.

Le barriere coralline sono l'ecosistema marino più biologicamente diversificato sulla Terra e uno degli ambienti più fragili, che viene distrutto ad un ritmo molto elevato. Scogliere coralline sono presenti in 109 diversi paesi ed in almeno 93 di questi sono state danneggiate o distrutte dall'attività umana (Brown, 1998). I danni alle barriere coralline non comportano solo la distruzione di quest'ultime, ma portano anche all'estinzione di numerose forme di vita marina tropicale.

L'effetto serra è responsabile di un fenomeno particolare chiamato bleaching, o sbiancamento dei coralli, che consiste nella perdita del rapporto di simbiosi tra i coralli e le microalghe, denominate zooxantelle, che vivono in essi. Questo fenomeno può essere una conseguenza dell'acidificazione degli oceani, dovuta all'aumentato assorbimento della CO₂ da parte della superficie marina, seguito da un abbassamento del pH. L'aumento delle emissioni di CO₂ e un suo maggiore assorbimento da parte delle masse d'acqua vanno a compromettere la deposizione di carbonato di calcio da parte di molti organismi che costruiscono strutture calcaree, come i coralli di barriera. L'acidificazione degli oceani è quindi considerata una minaccia per le barriere coralline, perché va a ridurre il tasso di calcificazione dei coralli e perché influisce sulla simbiosi esistente tra i coralli e i dinoflagellati simbiotici.

Ma un'altra causa di alterazione dei rapporti simbiotici e di aumentato stress per i coralli è rappresentata dall'aumento delle temperature della superficie marina. A causa dell'incremento di CO₂ nell'atmosfera si assisterà ad una sempre maggiore frequenza di eventi di sbiancamento, con serie conseguenze per la crescita e la riproduzione dei coralli. Un trend in espansione del fenomeno a livello globale è stato rilevato a partire dagli anni '70.

Oltre ai fattori legati ai cambiamenti climatici ci sono altre fonti di stress che minacciano la sopravvivenza e la salute della barriera corallina, tra cui l'inquinamento da acque reflue, l'utilizzo di fertilizzanti e pesticidi, le numerose fuoriuscite di petrolio e derivati, la pesca eccessiva e le tecniche di pesca distruttive. I danni provocati da queste alterazioni antropiche possono diventare molto gravi se non vengono in qualche modo controllate.

Tra i fattori che minacciano gli ecosistemi, marini e terrestri c'è anche l'inquinamento da microplastiche. Nel 2018 solamente l'Europa ha prodotto 81,8 milioni di tonnellate, e il mondo intero ne ha prodotte 359 milioni. La presenza di microplastiche, primarie e secondarie, comporta danni molto gravi agli organismi che vivono in numerosi habitat. Un esempio è la presenza di reti fantasma, reti da

pesca che sono state abbandonate, perse oppure eliminate in mare, che possono intrappolare, ferire e uccidere numerosi animali. I danni possono essere provocati anche dall'ingestione di micro- e nanoplastiche per filtrazione.

Nonostante per molti anni le conseguenze dell'effetto serra, e quindi il bleaching, e il fenomeno dell'inquinamento da microplastiche siano stati studiati indipendentemente l'uno dall'altro, recenti studi hanno dimostrato che non sono fenomeni completamente separati, ma i loro effetti combinati possono insieme diventare delle minacce sempre più frequenti e gravi per numerosi ecosistemi, tra cui le barriere coralline.

CAPITOLO I: Le barriere coralline

Le barriere coralline sono uno degli ecosistemi più importanti per la biodiversità del pianeta e sono tipiche dei mari e degli oceani tropicali. Nello specifico sono localizzate in una fascia molto estesa, che si può approssimare tra i 30° latitudine nord e 30° latitudine sud. Questi ecosistemi possono essere suddivisi in tre regioni principali: la regione dell'Indo-Pacifico, la regione dell'Atlantico occidentale e la regione del Mar Rosso. La regione indo-pacifica si estende attraverso la Polinesia e l'Australia e poi attraverso l'Oceano Indiano fino all'Africa. Questa è la zona che ospita il più grande e ricco insieme di barriere coralline in termini di specie di coralli e pesci che le popolano. La regione dell'Atlantico occidentale si estende invece dalla Florida al Brasile. Il Mar Rosso è infine la più piccola delle tre regioni, posizionata tra l'Africa e l'Arabia Saudita (Brown, 1998).

Si può riassumere dicendo che circa il 60% delle barriere coralline si trova nell'Oceano Indiano, il 25% nell'Oceano Pacifico e il restante nei Caraibi.

Le componenti della barriera corallina, come i coralli e gli invertebrati, si trovano soltanto in queste regioni perché hanno un range di tolleranza termica ben definito, necessitando di una temperatura che non si abbassi al di sotto dei 20°C e che non sia molto più calda (Stafford-Deitsch, 1992).

La maggior parte delle barriere si è formata con lo scioglimento dei ghiacciai, in seguito all'ultimo periodo glaciale, con l'innalzamento del livello del mare e il successivo allagamento della piattaforma continentale. Una volta avvenuto l'insediamento delle comunità, le barriere coralline hanno iniziato a svilupparsi verso l'alto. La barriera corallina può essere accompagnata da una scogliera marginale, cui fa seguito in direzione del mare una laguna più o meno estesa. All'interno di questa si trovano coralli a guglia o a rilievo montuoso, che formano delle zone chiamate "chiazze di barriera", o patch reef. Dalla laguna si passa alla retro-scogliera, una zona in cui i coralli sono più abbondanti, che immette poi nel piano di scogliera. Successivamente si arriva alla cresta di scogliera e infine alla scarpata fronte-scogliera.

Gli ecosistemi delle barriere coralline devono la loro esistenza all'interazione tra due organismi: un animale, che appartiene al phylum Cnidaria, ed una microalga, appartenente al gruppo dei Dinoflagellati. Le microalghe simbiotiche nei tessuti del corallo sono chiamate zooxantelle.

Possiamo distinguere i coralli in due categorie: la prima comprende specie di corallo che possono ospitare più cladi di zooxantella, sia in profondità sulla stessa barriera corallina, sia in diverse aree geografiche, sia all'interno della stessa colonia. La maggior parte dei coralli ospita però un singolo clade di zooxantella: solo il 23% delle specie di corallo campionate ospita più cladi di zooxantella. Il restante 77% delle specie di corallo ospita un solo clade (Goulet, 2006).

I Cnidari, il cui nome riflette la presenza di cnidociti urticanti sulla superficie dei tentacoli, possono presentare due forme: una mobile, detta medusa, ed una sessile, detta polipo. Il polipo aderisce al substrato mediante un disco pedale opposto alla bocca, la quale è posta al centro del disco orale da cui si dipartono i tentacoli. La medusa, invece, ha una forma ad ombrello con una superficie orale detta subombrella ed una opposta detta esombrella. La bocca è situata all'estremità di un'appendice definita manubrio. I Cnidari si dividono in due grossi gruppi: antozoi (organismi privi di medusa) e medusozoi (organismi dotati di medusa). Nelle barriere coralline, i coralli e gli anemoni sono organismi marini invertebrati della

classe Anthozoa. I coralli che costituiscono le barriere coralline nello specifico sono chiamati coralli ermatipici; gli altri coralli sono chiamati anermatipici. I primi sono solitamente coralli di tipo duro, con uno scheletro formato da carbonato di calcio, i secondi sono per la maggior parte coralli molli. La principale differenza tra coralli duri e coralli molli è che solo i coralli duri contengono zooxantelle all'interno dei loro tessuti (Brown, 1998).

Le zooxantelle sono contenute nel gastroderma del polipo. Il polipo, sostenendole, beneficia dei prodotti della fotosintesi attuata dalle zooxantelle, molecole organiche che arrivano a rappresentare fino al 90% dell'intero apporto alimentare del corallo, garantendo l'energia necessaria per tutti i processi vitali dell'organismo. Le zooxantelle, in cambio, vengono protette dallo scheletro calcareo del polipo, hanno accesso a grandi quantità di nutrienti e infine ricavano l'anidride carbonica dai prodotti della respirazione del polipo per usarla nella fotosintesi. La relazione tra animale e alga è dunque una simbiosi mutualistica, in cui entrambi i contraenti del rapporto traggono benefici dalla reciproca interazione.

Questa interazione tra Cnidari e Dinoflagellati è la ragione per cui le barriere coralline possono svilupparsi solo entro determinati valori di temperatura e profondità. Perché avvenga lo svolgimento della fotosintesi è necessaria una quantità adeguata di luce, che diventa quindi un fattore limitante. Una quantità di luce non ottimale può andare a compromettere il processo di fotosintesi e quindi, indirettamente, anche la salute dei Cnidari. Infine, l'associazione tra alghe, che sono produttori primari, e Cnidari, che sono consumatori, rende possibile il riciclo dei nutrienti che si pensa possa essere alla base dell'elevata produttività presente nelle barriere coralline (Hoegh-Guldberg, 1999).

Negli ultimi decenni le barriere coralline stanno subendo danni irreparabili. Dagli anni '50 a livello mondiale la copertura di coralli vivi è diminuita di circa la metà. Il 63% della biodiversità associata alla barriera corallina è diminuita con la perdita di estensione corallina (Eddy et al., 2021).

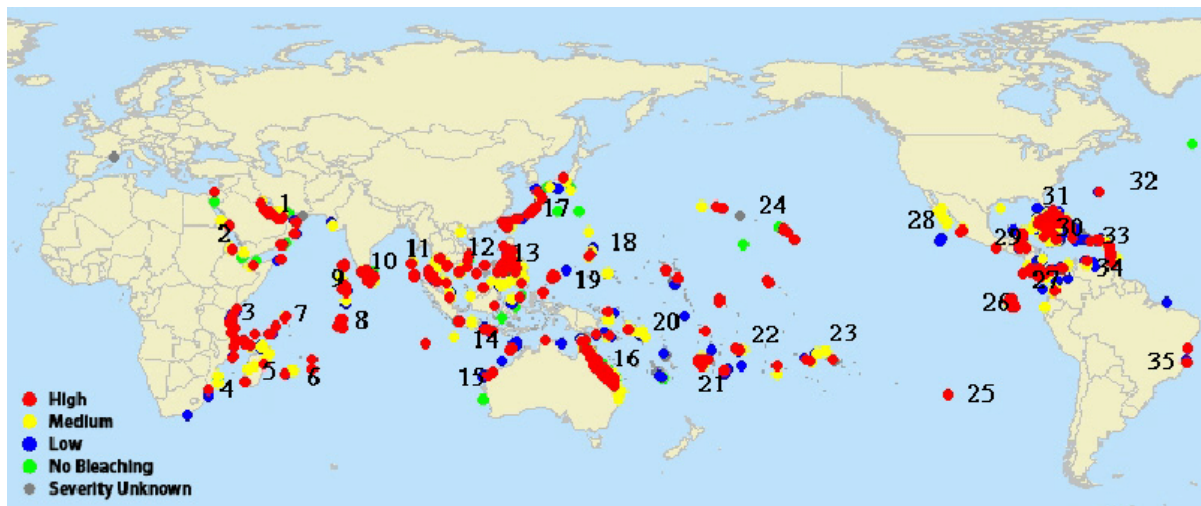


Figura 1: Distribuzione delle barriere coralline colpite dal bleaching (da Chumkiew et al., 2011)

La perdita di estensione corallina non è dovuta soltanto a minacce antropiche, ma anche naturali, quali fenomeni atmosferici come cicloni, uragani e piogge intense che possono abbassare la salinità del mare, maree estremamente basse che possono portare all'esposizione dei coralli, varie malattie e la presenza sempre maggiore di popolazioni di predatori. L'impatto umano si realizza in maniera diretta e determinante attraverso un prelievo di pesca non sostenibile e pratiche di pesca distruttive, attraverso l'apporto di nutrienti e pesticidi, acque reflue grezze, con la costruzione di strade e dighe e con l'inquinamento da idrocarburi dovuto alla navigazione. Ma una delle minacce che arreca danni più gravi è legata all'effetto serra dalle cui conseguenze dipende l'aumento del bleaching e delle aree di barriera interessate dal fenomeno (Figura 1). Lo sbiancamento del corallo si verifica quando il corallo è stressato, ad esempio per la temperatura dell'acqua troppo elevata (Brown, 1998).

Queste numerose minacce influiscono sulla vita degli organismi che popolano la barriera corallina. Lo sfruttamento eccessivo e continuo della barriera corallina negli ultimi decenni ha portato alla scomparsa di una porzione elevata delle barriere coralline in tutto il mondo. Alcuni studiosi ritengono che se non si diminuisce il tasso di deterioramento si arriverà alla perdita della maggior parte delle barriere coralline in poche decine di anni. Per garantire la sopravvivenza di questi ecosistemi è di primaria importanza diminuire i livelli di CO₂ atmosferici. Senza questa riduzione si potrebbe arrivare ad essere obbligati a sfruttare nuove strategie di conservazione per la protezione delle barriere coralline rimanenti (Ateweberhan et al., 2013).

CAPITOLO II: I cambiamenti climatici

L'aumento della popolazione umana e delle sue attività ha portato ad un maggior sfruttamento delle risorse naturali. Il consumo di queste risorse dipende da due fattori: il numero totale di individui e il tasso di consumo pro capite. Entrambi sono aumentati costantemente negli ultimi 50 anni.

Una conseguenza principale dell'industrializzazione è l'aumento della concentrazione dei gas serra, responsabili dell'effetto serra, tra i quali si trovano il vapore acqueo, l'anidride carbonica, il metano, l'ozono e gli ossidi di azoto (Cassia et al., 2018).

Le radiazioni solari raggiungono la superficie terrestre, che riemette una frazione delle radiazioni sotto forma di raggi infrarossi. I gas serra assorbono le radiazioni termiche rilasciate dalla superficie terrestre e le emettono nuovamente. Parte delle radiazioni viene quindi spedita nuovamente verso la superficie terrestre, provocando l'innalzamento della temperatura.

L'aumento della temperatura atmosferica, e quindi del mare e degli oceani, comporta diverse conseguenze, come variazioni della produttività, alterazioni della circolazione atmosferica e oceanica, lo scioglimento dei ghiacci, variazioni della salinità, aumento del livello del mare, cambiamenti dei regimi di precipitazione ed evaporazione, ed infine, nel complesso, variazioni nell'abbondanza e distribuzione delle specie e nella composizione delle comunità.

La CO₂ è un gas rilasciato da processi naturali, come la respirazione e le eruzioni vulcaniche, ma anche dalle attività umane, come deforestazione e uso di combustibili fossili.

La sua concentrazione nell'atmosfera tende a mantenersi stabile grazie all'equilibrio tra la fascia verde fotosintetica terrestre e il sistema dei carbonati del mare. L'aumento del consumo dei combustibili fossili e la ridotta capacità di rimozione di CO₂ da parte della fascia verde stanno determinando un aumento dell'input di CO₂ nell'atmosfera.

Dalla rivoluzione industriale le emissioni di gas come anidride carbonica, metano e protossido di azoto, stanno aumentando a ritmi molto elevati. La CO₂ è ritenuta la responsabile del 50-60% del riscaldamento globale: i suoi livelli atmosferici sono passati da 280 ppm, presenti nell'era preindustriale, ai circa 417 ppm di oggi. Il tasso di crescita nel 2020 è stato di 2,34 ppm/anno. Ad oggi si ritiene che i combustibili fossili emettano 7,7 petagrammi di CO₂ ogni anno, e la deforestazione 1,1 petagrammi all'anno. In totale si parla di 8,8 petagrammi di emissioni ogni anno, dove un petagrammo è un miliardo di tonnellate. Pertanto, la superficie terrestre dall'inizio del 20° secolo si è riscaldata a livello globale di oltre 1 °C.

Circa il 30-40% della CO₂ emessa nell'atmosfera viene assorbita nei mari e negli oceani. In mare il carbonio è presente sotto forma di ione carbonato, acido carbonico, ione bicarbonato e anidride carbonica. L'acqua marina reagisce con l'anidride carbonica e dà acido carbonico (H₂CO₃), che dissocia formando ioni idrogeno, bicarbonato e carbonato. Dall'equilibrio tra le diverse forme chimiche dipende il cosiddetto effetto tampone, che attenua possibili variazioni di pH. Le variazioni del pH possono essere causate naturalmente da processi respiratori molto intensi o da processi di decomposizione batterica. L'effetto tampone in mare non agisce in tempi brevi, ma secondo scale temporali molto variabili. L'apporto di CO₂ in quantità elevate dall'atmosfera alle superfici marine, invece, avviene in maniera continua ed il sistema tampone non riesce ad essere all'altezza del suo compito perché la variazione è troppo insistente nel tempo. Trovandosi a dover contrastare un eccesso di ioni idrogeno, il carbonato di calcio (CaCO₃) sarà disponibile in minor concentrazione. L'acidificazione ha quindi diverse conseguenze, una delle quali è la dissoluzione del carbonato. Lo scheletro delle strutture coralline è formato da carbonato di calcio, così come gusci calcarei di molluschi, fitoplancton, zooplancton, o crostacei. Più aumenta l'acidificazione, maggiore sarà la dissoluzione del carbonato di calcio e maggiore la difficoltà nel deporre strutture carbonatiche. Così si crea il problema dell'acidificazione delle acque marine: l'aumento di CO₂ nell'atmosfera negli ultimi anni è senza precedenti e se il trend delle emissioni non sarà contrastato porterà ad una variazione del pH di 0,3/0,4 unità entro la fine del secolo. Alcuni modelli matematici hanno previsto una riduzione di 0,7 unità entro il 2300. Ad oggi il pH si è ridotto di 0,1 unità negli ultimi decenni.

Se l'attuale tendenza nelle emissioni venisse mantenuta, si potrebbe arrivare ad una compromissione della biodiversità, con conseguenze gravi per il funzionamento dell'ecosistema, alterando la biogeografia del pianeta (Blowes et al., 2019).

L'equilibrio CO₂ - Carbonato

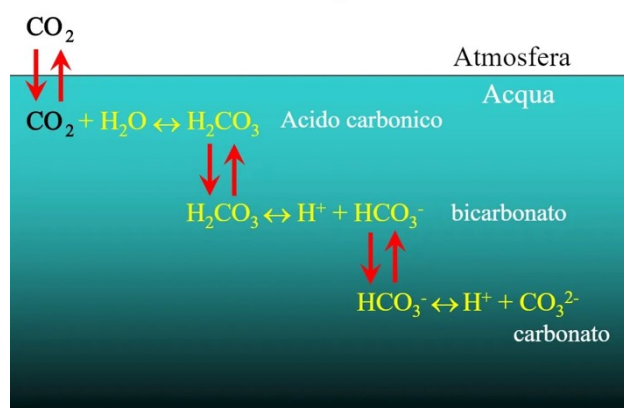


Figura 2: Relazione tra CO₂ e H₂O (da Biancardi, 2019)

CAPITOLO III: Le microplastiche

Insieme al cambiamento climatico una sempre più crescente minaccia per le barriere coralline, e gli altri ecosistemi marini, è rappresentata dalla diffusione delle microplastiche.

La produzione di materie plastiche può, in generale, essere fatta risalire all'inizio del secolo scorso, ma è andata aumentando in maniera esponenziale negli ultimi 70 anni. La plastica si ottiene attraverso diversi processi a partire da combustibili fossili, come petrolio, carbone e gas naturale. Moltissimi tipi di polimeri con diverse proprietà trovano vaste applicazioni in produzioni e prodotti di ogni tipo ed uso. Accanto ad una notevolissima versatilità di impiego, la plastica è caratterizzata da una grande resistenza alla degradazione che sta portando ad un accumulo in ambiente di rifiuti di plastica, compresi quelli derivanti dalla frammentazione di plastiche di dimensioni maggiori. Le plastiche sono classificate su base dimensionale come megaplastiche (>1 m), macroplastiche (<1 m), mesoplastiche (<2,5 cm) e microplastiche (<5 mm), anche se possono esserci modalità alternative di definizione. Le plastiche di dimensioni maggiori visualizzabili ad occhio nudo sono chiamate macroplastiche o megaplastiche. Una parte considerevole dei rifiuti di origine terrestre viene accumulata negli oceani e oltre il 65% dei rifiuti è composto da macroplastiche non degradabili (Thushari et al., 2020).

Dei 10 miliardi di tonnellate di plastica prodotte fino ai nostri giorni, gran parte dei rifiuti derivanti vengono inceneriti o riciclati, ma si stima che dal 12% al 18% dei rifiuti di plastica finisca negli ecosistemi terrestri e marini (Brahney et al., 2021).

Tra il 1950 e il 2015 sono stati prodotti circa 6300 milioni di tonnellate di rifiuti di plastica, di cui il 9% è stato riciclato, il 12% è stato incenerito e il 60% è stato accumulato nelle discariche o nell'ambiente naturale (Geyer et al., 2017).

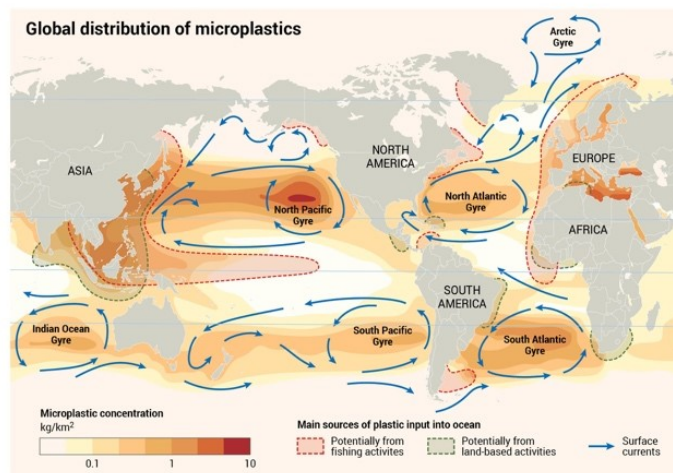


Figura 3: Distribuzione globale di microplastiche (da Pravettoni et al., 2019)

Le materie plastiche comportano numerosi problemi agli ecosistemi terrestri e marini. Innanzitutto, continuano a rilasciare gas serra per tutta la durata del loro ciclo vitale. La produzione di plastica tra il 2015 e il 2050 si pensa porterà ad una produzione di oltre 56 miliardi di tonnellate di anidride carbonica equivalente (CO₂e) in gas serra (Ford et al., 2022).

Oltre ad emettere gas serra, le materie plastiche vanno a danneggiare fisicamente gli ecosistemi in cui si trovano, per effetti tossicologici dovuti all'ingestione di plastica, soffocamento, fame, dispersione e rafting di organismi (Thushari et al., 2020).

Le microplastiche e i cambiamenti climatici sono strettamente collegati. I cambiamenti climatici influenzano fortemente la diffusione della plastica: sono infatti responsabili di eventi climatici estremi, come tempeste tropicali, forti venti e l'innalzamento del livello dell'acqua, che possono disperdere i rifiuti plastici e non tra diversi ecosistemi terrestri e marini, o intrappolare residui plastici in sedimenti costieri. Forti piogge possono comportare un aumento elevato della quantità di plastica che dai fiumi viene immessa nell'oceano (Ford et al., 2022).

Secondo alcuni studi, il livello di microplastiche dei diversi ecosistemi costieri e marini varia tra 0,001 e 140 particelle/m³ nell'acqua e tra 0,2 e 8766 particelle/m³ nei sedimenti in diverse aree nel mondo (Thushari et al., 2020).

L'inquinamento da microplastiche inoltre danneggia ecosistemi già vulnerabili a causa dei cambiamenti climatici. Un esempio è la correlazione tra fenomeni di bleaching ed esposizione a microplastiche. Il bleaching singolarmente, porta, tra le altre cose, all'estinzione di varie specie e in alcuni casi morte della barriera corallina. La plastica invece può influenzare negativamente la fecondazione dei gameti, la crescita degli organismi e le loro prestazioni fotosintetiche e aumenta la probabilità di sviluppare malattie nei coralli (Ford et al., 2022). L'affondamento delle particelle di plastica porta anche ad un aumento della loro biodisponibilità per gli organismi presenti nella colonna d'acqua e nei sedimenti del fondo. Le particelle inoltre possono essere trasportate su lunghe distanze da venti e correnti, ciò comporta la dispersione di specie non autoctone e la diffusione di malattie (Romanó de Orte et al., 2019).

È necessario dire che in alcuni studi si è visto che le microplastiche hanno comportato effetti relativamente benefici ai coralli, anche se non duraturi. Ad esempio, l'esposizione alle microplastiche può portare ad un aumento temporaneo dell'efficienza fotosintetica dei simbionti algali: in laboratorio, in alcuni coralli esposti a microplastiche, è stata osservata una regolazione delle prestazioni fotosintetiche per aumentare l'acquisizione di energia necessaria a fronteggiare l'impatto delle microplastiche, soprattutto tramite un'attivazione dei sistemi mucociliari. Gli effetti positivi sull'attività fotosintetica sono diminuiti però nel tempo, suggerendo quindi che qualsiasi sovraregolazione della fotosintesi sia in realtà transitoria. È quindi improbabile che questo meccanismo aumenti l'acquisizione di energia dei coralli a lungo termine (Reichert et al., 2019).

Inoltre, l'esposizione a microplastiche può preparare i coralli a successivi periodi di stress a breve termine (Reichert et al., 2021). In alcuni coralli, infatti, è stato osservato che esposizioni prolungate a condizioni di stress possono provocare successivi aumenti della loro tolleranza all'agente stressogeno (Barshis et al., 2013). Lo studio degli impatti dei cambiamenti climatici è un campo ancora non molto esplorato, ma ciò che si è visto fino ad ora è che le microplastiche possono comportare danni ancora più gravi ad alcuni organismi che popolano la barriera corallina, già precedentemente colpiti dal bleaching. Fenomeni come bleaching ed esposizione alle microplastiche non sono quindi necessariamente isolati ma possono essere collegati ed influire in maniera sinergica sullo stato di benessere dei coralli.

CAPITOLO IV: Il bleaching

Definiamo il bleaching come il fenomeno caratterizzato dalla perdita del rapporto di simbiosi tra i polipi di Cnidari, come coralli ed anemoni, e le alghe unicellulari fotosintetizzanti note come zooxantelle. Può essere considerato un fenomeno episodico, di cui gli eventi più gravi sono solitamente accompagnati da fenomeni che coinvolgono oceano e atmosfera, come El Niño-Southern Oscillation (ENSO) (Hughes et al., 2017). È stato osservato che la maggior parte dei coralli di barriera si sbianca quando la temperatura raggiunge 1 °C al di sopra della temperatura media del mese più caldo per la durata di un mese, mentre muore se si supera il valore mensile medio più elevato di 2 °C per la durata di un mese o di un 1 °C per due mesi (Goreau and Hayes, 2021).

Sono state distinte tre tipologie di bleaching:

- Bleaching fisiologico: si ha una diminuzione della densità dei simbionti presenti nell'organismo nella stagione calda rispetto a quella stagione fredda, a causa della diminuzione della biomassa del tessuto ospitante. Le estati prolungate possono ridurre la densità delle alghe fino a farle scendere a livelli tali che lo sbiancamento diventa evidente. A meno che i coralli non recuperino la densità e la biomassa delle alghe prima dell'estate successiva, ciò può portare alla morte dei tessuti e delle colonie (Jones, 2008).
- Bleaching da stress algale: comporta lo squilibrio delle alghe simbiotiche a condizioni di temperature elevate e/o di elevata irradiazione;
- Bleaching da stress animale: le cellule di corallo contenenti le zooxantelle vengono rimosse dallo strato di cellule gastrodermico.

Nessuno di questi metodi di sbiancamento esclude gli altri (Fitt et al., 2001).

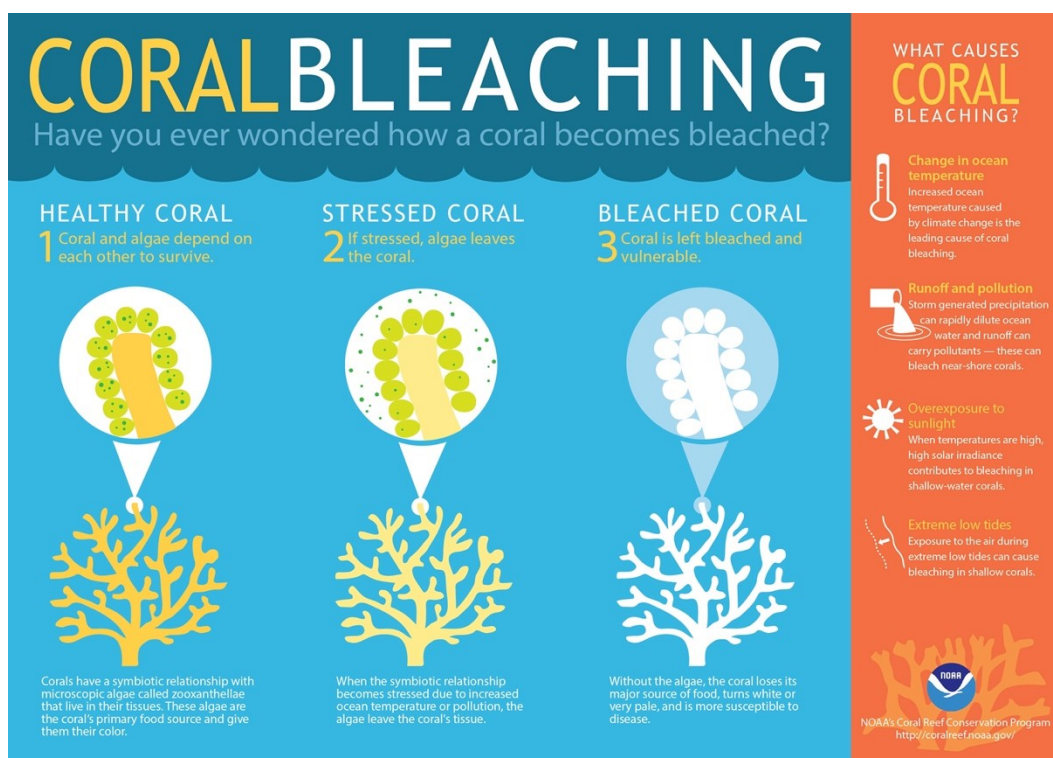


Figura 4: Schema dello sbiancamento di un corallo (Da https://oceanservice.noaa.gov/facts/coral_bleach.html)

Il bleaching è stato osservato per la prima volta precedentemente al 1979, nei Caraibi, nelle isole Hawaii e in alcune aree della Grande Barriera Corallina australiana, che hanno mostrato stress termico cumulativo paragonabile a quello osservato durante gli eventi attuali di sbiancamento dei coralli (Barton et al., 2005). Dagli anni '80 in poi episodi di bleaching, indotti soprattutto dall'innalzamento delle temperature oceaniche, avvengono con una regolarità circa annuale (Baker et al., 2008). La temperatura superficiale media globale delle acque marine si è riscaldata di 0,4–0,8 °C dalla fine del diciannovesimo secolo in maniera eterogenea, quindi diversamente nello spazio e nel tempo (Barton et al., 2005).

Le barriere coralline sono ecosistemi dinamici, con coralli e organismi calcificanti che secernono scheletri, ma che allo stesso tempo sono soggetti a processi di erosione diventando produttori finali di sabbia. Questo ecosistema riesce a sopravvivere solo se la crescita netta rimane positiva: i fattori che riducono la crescita e la riproduzione e/o i fattori che aumentano la mortalità degli organismi che vivono nella barriera corallina hanno la capacità di distruggere l'equilibrio tra crescita ed erosione portando al declino della barriera (Knowlton et al., 2008).

Il bleaching è responsabile della riduzione delle scogliere coralline in molte località e della modifica della struttura corallina. Si stima che tra il 50% e il 70% di tutte le barriere coralline sia minacciato direttamente dalle attività umane (Hoegh-Guldberg, 1999). Sono numerose le conseguenze sulla biodiversità nelle aree tropicali marine causate dalla riduzione e dalla modifica delle barriere coralline.

Il bleaching è, inoltre, responsabile dell'aumento delle malattie dei coralli e quindi del loro indebolimento o morte e, di conseguenza, della perdita di habitat per i pesci e invertebrati associati alle barriere coralline.

Le barriere coralline colpite dal bleaching possono comunque continuare a svolgere la loro funzione primaria in base alla quantità di copertura corallina che viene persa e alla capacità di adattamento delle comunità coralline residue (Hughes et al., 2017). I coralli sbiancati possono riprendersi dallo stress legato all'aumento delle temperature, ma la crescita dei tessuti e dello scheletro in genere diminuisce o cessa del tutto (Baker et al., 2008).

Alla base dei fenomeni di bleaching dei coralli si ha l'innalzamento della temperatura dei mari e degli oceani. I coralli di barriera e le zooxantelle infatti, come detto precedentemente, sono confinati nelle acque poco profonde della zona fotica, vicini ai loro limiti di tolleranza termica. Lo sbiancamento è stato associato ad ambienti ad alto irraggiamento che sperimentano condizioni insolitamente calde, in genere 1,0–1,5 °C al di sopra delle temperature medie massime stagionali (Baker et al., 2008). Tuttavia, l'innalzamento della temperatura, nonostante sia una delle cause principali, non è l'unica: anche l'interazione tra l'alta temperatura e l'irraggiamento può essere responsabile dei fenomeni di bleaching. L'aumento della radiazione solare, sia nella regione visibile dello spettro (con una lunghezza d'onda tra i 400 ai 700 nm) che nell'ultravioletto (con una lunghezza d'onda tra i 290 ai 400 nm), può concorrere allo sbiancamento di massa dei coralli. Una particolare attenzione viene data al ruolo della radiazione ultravioletta. Ci sono tre fattori principali che determinano la quantità di raggi UV che ricevono i coralli:

- il primo fattore è in relazione all'ozono stratosferico, la cui concentrazione è aumentata di molto negli ultimi decenni;
- il secondo fattore riguarda i cambiamenti climatici che alterano i modelli meteorologici con variazioni della copertura nuvolosa, modificando l'irraggiamento da UVB in un dato luogo;
- il terzo fattore è l'attenuazione dei raggi UV nella colonna d'acqua. L'attenuazione varia in base alla presenza di particolato e al carbonio organico disciolto (DOC).

I primi due fattori influenzano la quantità di raggi UV che penetrano attraverso l'atmosfera fino alla superficie degli oceani, il terzo agisce a livello di penetrazione della radiazione in colonna d'acqua (Brown, 1996).

Il bersaglio principale dello sbiancamento dei coralli sembra essere l'apparato fotosintetico delle zooxantelle. Il bleaching comporta la perdita di zooxantelle e quindi la diminuzione dei pigmenti fotosintetici nei coralli che hanno subito sbiancamento. Anche l'efficienza fotosintetica delle zooxantelle è risultata compromessa a causa dell'aumento della temperatura (Brown, 1996).

La barriera corallina può subire fenomeni di bleaching più o meno gravi, che comportano diverse reazioni da parte dei coralli, dipendenti anche dalla presenza di alghe bentoniche. Infatti, in seguito ad eventi di bleaching il tessuto corallino può riprendersi, riguadagnando le zooxantelle, oppure può essere colonizzato da alghe bentoniche in seguito alla sua morte. Eventi di sbiancamento di massa su larga scala possono quindi provocare una massiccia crescita di alghe sul nuovo substrato disponibile, fornito dallo scheletro del corallo morto.

In un esperimento del 2002 è stato possibile osservare che dopo un fenomeno di bleaching la mortalità dei tessuti corallini risultava più alta in presenza che in assenza di alghe. La maggior parte delle aree di corallo sbiancato ricoperte da un tappeto algale non è stata in grado di riprendersi, presumibilmente a causa dell'inibizione competitiva da parte delle alghe. Il tessuto corallino sbiancato che non era invece stato colonizzato da masse algali è riuscito a riacquistare

uniformemente zooxantelle. È quindi possibile che i danni provocati dallo stress che ha prodotto il bleaching vengano peggiorati dalla competizione con le alghe (Diaz-Pulido et al., 2002).

Quando lo sbiancamento è più grave, tutti i coralli possono sbiancarsi e perdere quindi la relazione simbiotica con le zooxantelle. In caso di sbiancamento meno grave, il fenomeno è fortemente selettivo e comporta la presenza di coralli “vincitori”, più resistenti, e coralli “vinti”, che sbiancano di più. I coralli sbiancati che si riprendono e sopravvivono presentano solitamente una crescita ridotta dei tessuti e dello scheletro, o totalmente interrotta: rispetto ai tessuti normalmente pigmentati, i tessuti sbiancati mostrano una biomassa e uno spessore ridotti, con concentrazioni inferiori di lipidi, proteine e carboidrati. Si è ipotizzato che specie di corallo con morfologie massicce ed incrostanti abbiano un elevato tasso di sopravvivenza grazie ad una maggiore efficienza nella rimozione di tossine cellulari potenzialmente dannose (Baker et al., 2008). Le colonie massicce presentano infatti un tessuto più spesso che protegge le zooxantelle sottostanti da forti intensità luminose. Una certa fotoprotezione può consentire alla fotosintesi di continuare, andando a contrastare così presenza e formazione di radicali altrimenti tossici (Loya et al., 2001).

Una barriera corallina si definisce modestamente sbiancata quando i coralli colpiti sono in una percentuale minore del 10% o tra il 10 e il 30%. Una barriera corallina colpita da uno sbiancamento più grave presenta una percentuale di organismi colpiti che va dal 60% in su (Hughes et al., 2017).

Anche all'interno di una stessa regione il bleaching non è uniforme, con zone più o meno colpite. Questa variabilità deriva da diversi fattori, come le oscillazioni delle condizioni ambientali, l'eterogeneità delle superfici della barriera corallina, le differenze genetiche negli ospiti o nei simbiotici e le differenze nella storia ambientale (Baker et al., 2008).

La possibilità che le barriere coralline possano continuare a sopravvivere e svolgere le loro funzioni dipende da diversi fattori, come la quantità di copertura corallina persa, quali specie vengono eliminate, la capacità delle comunità residue di adattamento e il cambiamento dell'equilibrio tra la crescita della scogliera e la bioerosione (Baker et al., 2008).

Si è osservato che anche il sovrasfruttamento dei pesci erbivori può compromettere la resilienza delle barriere coralline e rallentare o bloccare il loro recupero dallo sbiancamento e da altri disturbi, portando ad uno shift ecosistemico verso comunità composte prevalentemente da alghe (Aronson et al., 2003).

I coralli sbiancati, oltre a perdere la relazione di simbiosi con le zooxantelle, risultano essere meno capaci di rimuovere i sedimenti dalle loro superfici.

I sedimenti si accumulano da tre a quattro volte in più rispetto a quanto avviene sui coralli normalmente pigmentati. Indipendentemente dallo stato di bleaching nel corallo, la continua deposizione di sedimenti senza rimozione è stata vista portare ad un aumento di circa tre volte della quantità di sedimento rimanente sui coralli. I coralli sono quindi obbligati a sviluppare una serie di meccanismi per pulire la loro superficie dai sedimenti, che coinvolge principalmente il trasporto muco-ciliare e il movimento dei tentacoli, in modo da ridurre l'impatto sull'organismo e sulle zooxantelle. Questi processi "attivi" sono associati a forze "passive" come la gravità e il flusso. Se i sedimenti non vengono rimossi dalla superficie ad una velocità equivalente alla deposizione, i sedimenti possono accumularsi e soffocare il tessuto del corallo (Bessell-Browne et al., 2017).

Alcuni studi hanno però dimostrato che lo sbiancamento dei coralli può rappresentare una forma di adattamento promuovendo una risposta rapida al cambiamento ambientale. Senza lo sbiancamento, infatti, le combinazioni non ottimali ospite-simbionte persistono, portando alla fine ad una significativa mortalità dell'ospite. Solitamente i cambiamenti nelle comunità di simbionti possono risultare lenti. Lo sbiancamento dei coralli permette la rimozione rapida di questi simbionti, facilitando la loro sostituzione con altre alghe più adatte alle nuove condizioni ambientali. Ciò va a contrastare l'opinione comune secondo cui lo sbiancamento è dannoso da tutte le prospettive e supporta il ruolo dei simbionti come agenti adattativi (Baker, 2001). Questi cambiamenti adattativi contribuirebbero ad aumentare la resistenza delle barriere coralline in via di recupero a futuri fenomeni di sbiancamento (Baker et al., 2004).

La frequenza e la portata di questi eventi negli ultimi decenni sono senza precedenti, con centinaia di aree di barriera corallina colpite dallo sbiancamento. Ad oggi, nessuna regione dei mari tropicali e subtropicali del mondo sembra al sicuro da questo fenomeno.

La scomparsa delle barriere coralline e la possibilità di salvarle dipendono da fattori naturali e antropici. L'aumento dei fenomeni di bleaching comporta e comporterà in futuro lo sviluppo di modalità di adattamento da parte degli organismi che popolano la barriera corallina.

Il bleaching, pur considerando gli aspetti positivi che ne possono derivare, continuerà ad essere una minaccia molto grave per le barriere coralline per i prossimi 30-50 anni, anche nei migliori scenari possibili (Baker et al., 2008). Se lo sbiancamento diventasse un evento annuale e quindi ricorrente, si stima che oltre il 90% delle barriere coralline potrebbe andare incontro ad un degrado a lungo termine. Ad oggi si sa che i coralli possono riprendersi da un isolato evento di sbiancamento o da eventi che avvengono a distanza di alcuni anni, ma non è noto se e in quale modo i coralli possano sopravvivere ad eventi ricorrenti annuali.

L'impatto cumulativo di eventi di bleaching annuali può portare alla sensibilizzazione di alcune specie di coralli a questo fenomeno e, quindi, inevitabilmente ad un declino a lungo termine di quest'ultime, mentre altre specie potrebbero acclimatarsi e persistere, se sono fenotipicamente plastiche (Grottoli et al., 2014). Con plasticità fenotipica o polifenismo si intende la capacità di organismi dello stesso genotipo di sviluppare un diverso o diversi fenotipi in base alle condizioni ambientali esterne. Le condizioni di evoluzione di un fenomeno di sbiancamento dipendono dunque da un complesso insieme di fattori e dalla loro interazione portando a risultati nel tempo difficilmente prevedibili. Ad esempio, c'è stato un recupero complessivo delle barriere coralline nell'Oceano Indiano, dove molte di queste sono state devastate da un unico grande evento di sbiancamento nel 1998. Al contrario, la copertura corallina sulle barriere occidentali ha continuato a ridursi in seguito a molteplici eventi di sbiancamento minori (Baker et al., 2008).



Figura 5: Differenze nella barriera corallina pre e post bleaching (da Fisher et al., 2016).

CAPITOLO V: Bleaching e microplastiche negli anemoni di mare

Le microplastiche sono un'emergenza ambientale che contribuisce in modo determinante all'inquinamento dei mari aggravando l'impatto dei cambiamenti climatici. L'aumento della temperatura del mare e l'aumento dell'inquinamento minacciano il destino delle barriere coralline e di milioni di persone che dipendono da esse.

Ad oggi si pensa che le microplastiche comportino danni minori rispetto a fenomeni come il bleaching nel ciclo vitale dei coralli e degli altri organismi che popolano le scogliere coralline, ma si sa poco su quali potrebbero essere i loro effetti a lungo termine. L'esposizione alle microplastiche è sicuramente dispendiosa dal punto di vista energetico, perché comporta l'ingestione e la successiva espulsione da parte dell'organismo. Si possono innescare meccanismi di rigetto, simili a quelli utilizzati dai coralli per gestire la loro esposizione ai sedimenti. Si è visto inoltre che l'esposizione cronica alle microplastiche nei coralli ha provocato risposte specie-specifiche, inclusa una diminuzione della crescita (Axworthy et al., 2019).

Gli studi sugli effetti delle microplastiche in organismi colpiti dal bleaching sono relativamente pochi, poiché si è iniziato a studiare questi due fenomeni non più singolarmente, ma in combinazione, da pochi anni.

Si sa che la forma più abbondante tra le microplastiche nell'acqua di mare è rappresentata dalle microfibre di plastica. In uno studio del 2019, "Response of bleached and symbiotic sea anemones to plastic microfiber exposure", gli autori hanno indagato l'ingestione di microfibre da parte di una specie di anemone di mare, *Aiptasia pallida*, utilizzando tre diversi tipi di polimeri: nylon, poliestere e polipropilene (Romanó de Orte et al., 2019). I polimeri sono stati offerti sia ad anemoni dotati di zooxantelle simbiotiche, che sbiancati, senza simbiotiche. Per questo esperimento sono state preparate microfibre di plastica da tre diversi tipi di corde fluorescenti disponibili in commercio. I tre tipi di corde erano costituiti da 100%

poliestere, 100% nylon e 100% polipropilene. Inoltre, per verificare che la presenza di una preda nelle vicinanze dell'organismo andasse ad influenzare l'ingestione delle microfibre tramite i segnali chimici derivati dalla preda è stato preparato, insieme alla sospensione di microfibre, un omogeneizzato di gamberetti.

I risultati ottenuti hanno mostrato che l'ingestione di microfibre di plastica da parte degli anemoni di mare aumentava in presenza dell'omogeneizzato di gamberi: la sua aggiunta nella vasca sperimentale provocava una reazione immediata degli anemoni, che comprendeva il movimento dei tentacoli, l'apertura della bocca e l'inclinazione del corpo.

Il comportamento degli anemoni sbiancati si distingueva però da quello degli anemoni provvisti di simbiotici: la maggior parte degli anemoni sbiancati ha ingerito microfibre di nylon in assenza di gamberetto, a differenza degli anemoni simbiotici, che ha ingerito più microfibre in presenza di una preda. Questa differenza può essere legata ad una strategia utilizzata dagli anemoni sbiancati per compensare la loro carenza di energia aumentando i tassi di ingestione.

Inoltre, gli anemoni con le zooxantelle simbiotici hanno espulso le microfibre più rapidamente rispetto agli anemoni in condizioni di bleaching, per tutti i tipi di polimeri usati nell'esperimento.

Per gli anemoni sbiancati le prime espulsioni di microfibra si sono verificate almeno un giorno dopo l'ingestione, mentre dopo 24 ore la maggior parte degli anemoni in simbiosi aveva già espulso tutte le fibre. A quarantotto ore dall'ingestione, ad eccezione di un organismo, tutti gli anemoni provvisti di zooxantelle risultavano aver espulso le fibre, mentre tra gli organismi sbiancati una elevata percentuale tratteneva ancora le fibre all'interno. Secondo questo studio gli organismi che hanno perso la reazione simbiotica possono aumentare l'eterotrofia per soddisfare il fabbisogno energetico. Gli anemoni sbiancati possono essere quindi particolarmente suscettibili agli effetti negativi dell'inquinamento da microplastiche. I risultati ottenuti indicano che lo stato simbiotico degli organismi gioca un ruolo nella loro capacità di rifiutare la plastica: la velocità di ingestione delle microfibre plastiche da parte degli anemoni di mare e il tempo necessario per la loro eliminazione dipende dallo stato simbiotico dell'anemone, oltre che dalla presenza di prede. Nello studio di Romanó de Orte e colleghi (2019) si suggerisce che l'aumento del tempo di conservazione delle microfibre all'interno dell'organismo sbiancato possa dipendere dall'abbassamento delle riserve di energia, che comporta un peggioramento delle condizioni di salute dell'animale. L'ingestione cronica di microfibre a cui gli anemoni sono sottoposti nei loro habitat a causa dell'inquinamento può quindi risultare energeticamente dispendiosa, ma la situazione peggiora se hanno subito fenomeni di bleaching. Questo esperimento conferma l'interazione tra bleaching e inquinamento da microplastiche, i cui effetti negativi possono sommarsi creando minacce sempre più gravi e frequenti alle barriere coralline.

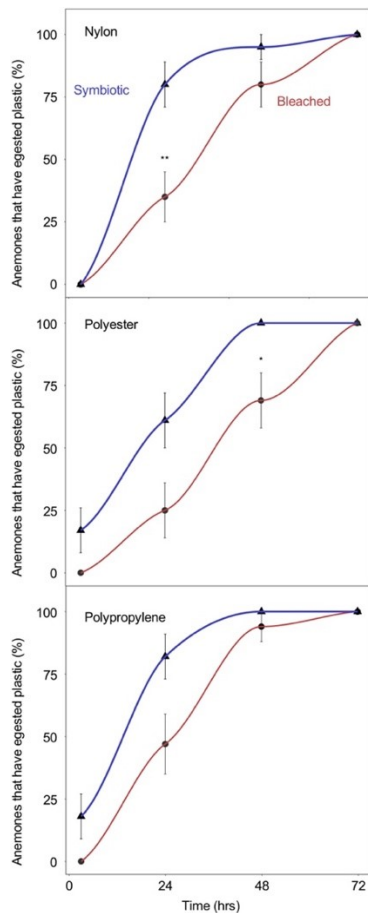


Figura 6: Differenze di egestione di tre differenti tipi di microplastiche in anemoni simbiotici e anemoni sbiancati (da Romanó de Orte et al.,2019)

CONCLUSIONI

I cambiamenti climatici rappresentano una delle maggiori preoccupazioni del mondo scientifico e di gran parte della popolazione globale. Ad oggi si ritiene che questi fenomeni siano dovuti principalmente all'emissione elevata di CO₂ nell'atmosfera a partire dall'attività antropica e, quindi, che l'unico modo per preservare gli ecosistemi colpiti dai cambiamenti climatici sia diminuire le concentrazioni di CO₂ rilasciate.

Tra gli ecosistemi più colpiti dai cambiamenti climatici ci sono le barriere coralline. Questi ecosistemi sono sottoposti a diversi effetti legati ai cambiamenti climatici: prima di tutto un aumento della temperatura dell'acqua, che rappresenta una delle maggiori cause di sbiancamento dei coralli. Il riscaldamento globale sta raggiungendo record mai visti in precedenza, con l'allungamento del periodo caratterizzato da temperature di tipo estivo e un corrispondente accorciamento della tregua "invernale" dalle temperature più calde (Heron et al., 2016). L'innalzamento delle temperature si sta infatti aggravando sempre di più: si è visto che è necessaria un'anomalia di 1 °C che duri un mese per causare il bleaching della barriera corallina. Nel 2020 le anomalie di temperatura nell'Oceano Artico hanno superato i 5 °C (Goreau and Hayes, 2021).

Oltre al riscaldamento e all'acidificazione delle acque marine, gli organismi presenti sulle scogliere coralline si trovano a dover fronteggiare molteplici forme di impatto antropico, che i cambiamenti climatici possono peggiorare. Variazioni

nel regime di venti e correnti possono influire sulla distribuzione globale dei contaminanti ambientali e in particolare delle microplastiche, la cui diffusione in molti ambienti costieri, e non solo, diventa sempre più preoccupante. Le barriere coralline devono adattarsi, quindi, a numerosi cambiamenti, che non sono necessariamente fenomeni indipendenti l'uno dall'altro. Gli effetti derivati dall'innalzamento delle temperature si uniscono agli effetti delle microplastiche, creando minacce sempre crescenti per il mantenimento degli ecosistemi di barriera corallina.

Se questi fenomeni continueranno ad essere presenti ed a colpire gli ecosistemi di tutto il mondo si avrà un calo drastico di biodiversità, come si sta già iniziando ad osservare, con gravi ripercussioni non solo a livello ecologico, ma anche sulla situazione economica e sociale dell'intero pianeta.

LETTERATURA CITATA

- Aronson R.B., Bruno J.F., Precht W.F., Glynn P.W., Harvell C.D., Kaufman L., Rogers C.S., Shinn E.A., Valentine J.F. 2003. Causes of reed degradation. *Science*, 302(5650):1502-4
- Ateweberhan M., Feary D.A., Keshavmurthy S., Chen A., Schleyer M.H., Sheppard C.R.C. 2013. Climate change impacts on coral reefs: Synergies with local effects, possibilities for acclimation, and management implications. *Marine Pollution Bulletin*, 74(2): 526-539.
- Axworthy J.B., Padilla-Gamiño J.L. 2019. Microplastics ingestion and heterotrophy in thermally stressed corals. *Scientific Reports*, 9(1):18193
- Barshis D.J., Ladner J.T., Oliver T.A., Seneca F.O., Traylor-Knowles N., Palumbi S.R. 2013. Genomic basis for coral resilience to climate change. *PNAS*, 110(4): 1387-1392.
- Barton A.D., Casey K.S. 2005. Climatological context for large-scale coral bleaching. *Coral Reefs*, 24: 536-554
- Baker A.C. 2001. Reef corals bleach to survive change. *Nature*, 411: 765-766
- Baker A.C., Glynn P. W., Riegl B. 2008. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80(4): 435-471
- Baker A.C., Starger C.J., McClanahan T.R., Glynn P.W. 2004. Corals' adaptive response to climate change. *Nature*, 430: 741
- Bessell-Browne P., Negri A.P., Fisher R., Clode P.L., Jones R. 2017. Cumulative impacts: thermally bleached corals have reduced capacity to clear deposited sediment. *Nature*. 7: 2716
- Biancardi S. 2019. Acidificazione degli oceani: cosa significa? *Biomaterra*. <https://www.biomaterra.com/2019/10/24/acidificazione-degli-oceani-cosa-significa/>
- Blowes S.A., Antão L.H., Bates A., Bruelheide H., Chase J.M., Moyes F., Magurran A., McGill B., Dornelas M. 2019. The geography of biodiversity change in marine and terrestrial assemblages. *Science*, 366(6463): 339-345.
- Brahney J., Mahowald N., Prank M., Prather K.A. 2021. Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle. *PNAS*, 118(16).
- Brown B.E. 1997. Coral Bleaching: causes and consequences. *Coral reefs*, 16: S129-S138.

Brown R., Gentry-Gruber J., Hardesty J., Meyer M., Roth M., Thompson J., Weir W. 1998. *Coral Reef, Teacher's guide*. San Rafael, CA.

- Cassia R., Nocioni M., Correa-Aragunde N., Lamattina L. 2018. Climate Change and the Impact of Greenhouse Gases: CO₂ and NO_x, Friends and Foes of Plant Oxidative Stress. *Frontier in Plant Science*, 9:273.
- Chumkiew S., Jaroensutasinee M., Jaroensutasinee K. 2011. Impact of Global Warming on Coral Reefs. *Walailak Journal of Science and Technology*. 8:111-129.
- Diaz-Pulido G., McCook L.J. 2002. The fate of bleached corals: patterns and dynamics of algal recruitment. *Marine Ecology Progress Series*. 232: 115–128.
- Eddy T.D., Lam V.W.Y., Reygondeau G., Bruno J.F, Ota Y., Cheung W.W.L. 2021. Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services. *One Earth*. 4(9): 1278-1285.
- Fisher H., Quaille I. 2016. Worst ever bleaching on Great Barrier Reef. *Made for Minds*. <https://p.dw.com/p/1I699>
- Fitt W.K., Brown B.E., Warner M.E., Dunne R. P. 2001. Coral bleaching: interpretation of thermal tolerance limits and thermal thresholds in tropical corals. *Coral reefs*. 20: 51-65
- Ford H.V., Jones N.H., Davies A.J., Godley G.J., Jambeck J.R., Napper I.E., Suckling C.C., Williams G.J., Woodall L.C., Koldewey H.J. 2022. The fundamental links between climate change and marine plastic pollution. *Science of The Total Environment*. 806(1):150392
- Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7): e1700782
- Grottoli A.G., Warner M.E., Levas S.J., Aschaffenburg M.D., Schoepf V., McGinley M., Baumann J., Matsui Y. 2014. The cumulative impact of annual coral bleaching can turn some coral species winners into losers. *Global change biology*, 20(12): 3823-3833.
- Goreau T.J.F., Hayes, R.L. 2021. Global warming triggers coral reef bleaching tipping point. *Ambio* 50, 1137–1140
- Goulet T.L. 2006. Most corals may not change their symbionts. *Marine Ecology Progress Series*, 321:1–7
- Heron S.F., Maynard J.A., van Hooidonk R., Eakin C.M. 2016. Warming Trends and Bleaching Stress of the World's Coral Reefs 1985–2012. *Scientific Reports*. 6: 38402.

- Hoegh-Guldberg O., 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *CSIRO*, 50: 839-66
- Hughes T.P., Kerry J.T., Wilson S.K. 2017. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 543: 373-377.
- Jones R.J. 2008. Coral bleaching, bleaching-induced mortality, and the adaptive significance of the bleaching response. *Marine Biology*, 154: 65-80
- Knowlton N, Jackson JBC. 2008. Shifting Baselines, Local Impacts, and Global Change on Coral Reefs. *PLoS Biology* 6(2): e54.
- Loya Y., Sakai K., Yamazato K., Nakano Y., Sambali H., van Woesik R. 2001. Coral bleaching, the winners and the losers. *Ecology Letters*, 4 (2001), 122-131
- Pravettoni R., Rekacewicz P. 2019. Global distribution of microplastics. *GRID*. <https://www.grida.no/resources/13339>
- Reichert J., Arnold A.L. Hoogenboom M.O., Schubert P., Wilke T. 2019. Impacts of microplastics on growth and health of hermatypic corals are species-specific. *Environmental Pollution*, 254, Part B.
- Reichert J., Tirpitz V., Anand R., Bach K., Knopp J., Schubert P., Wilke T., Ziegler M. 2021. Interactive effects of microplastic pollution and heat stress on reef-building corals. *Environmental Pollution*, 290 :118010
- Romanó de Orte M, Clowez S., Caldeira K. 2019. Response of bleached and symbiotic sea anemones to plastic microfiber exposure. *Environmental Pollution*, 249: 512-517.
- Stafford-Deitsch J. 1992. La barriera corallina, Un safari nel mondo dei coralli. Edizioni Edison.
- Thushari G.G.N., Senevirathna J.D.M. 2020. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*. 6(8): e04709

Sitologia:

<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/history.html>

https://oceanservice.noaa.gov/facts/coral_bleach.html