ISSN:2594-6153

Impactos das mudanças climáticas e o estresse térmico em Recifes Coralíneos

Lucas Fiorin de Souza, Wilton Rodrigues de Souza Santos, Helen Sadauskas-Henrique

Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos-SP, Brasil

E-mail: ls253344@alunos.unisanta.br

Resumo: Recifes de corais estão entre os ecossistemas marinhos mais sensíveis as mudanças climáticas, especialmente ao aumento da temperatura da superfície do mar. Esta revisão de literatura, baseada em estudos publicados em 2000 e 2024, analisa os impactos térmicos sobre a fisiologia, ecologia e estrutura populacional dos corais. Os resultados indicam reorganização comunitárias, como a substituição de *Acropora* por *Porites*, alterações nas taxas de calcificação e efeitos mitigadores da turbidez sobre o branqueamento. Modelos bioenergéticos demonstram que temperaturas elevadas aceleram o metabolismo coralino e comprometem a simbiose com zooxantelas. Conclui-se que o estresse térmico, aliada à radiação solar e à turbidez, afeta de forma multifatorial os recifes, exigindo abordagens integradas para sua conservação.
Palavras-chave: Temperatura; Recife de corais; estresse térmico; branqueamento

Impacts of climate change and heat stress on coral reefs

Abstract: Coral reefs are among the most sensitive marine ecosystems to climate change, particularly to rising sea surface temperatures. This literature review, based on studies published between 2000 and 2024, examines thermal impacts on coral physiology, ecology, and population structure. Findings reveal community reorganizations, such as the replacement of *Acropora* by *Porites*, changes in calcification rates, and the mitigating effects of water turbidity on bleaching. Bioenergetic models show that elevated temperatures accelerate coral metabolism and disrupt symbiosis with zooxanthellae. It is concluded that thermal stress, combined with solar radiation and turbidity, affects reefs in a multifactorial manner, demanding integrated conservation strategies.
Keywords: temperature; Reef corals; stress termic; bleaching

Introdução

De acordo com estudos das últimas décadas, os recifes de corais têm sofrido um aumento no número de distúrbios ambientais associados a mudanças globais na temperatura e na luminosidade (MCCLANAHAN). Diversas alterações recentes observadas em recifes estão relacionadas a fenômenos localizados de eutrofização, ao surgimento de doenças e à pesca intensiva (CRABBE). Pesquisadores relataram mudanças ecológicas em áreas remotas ou com baixos níveis de influência humana, como ilhas isoladas e atóis recifais (Tim R). Alterações ecológicas nessas regiões remotas são causadas por fatores globais do que locais, que distinguem os fatores que influenciam a ecologia recifal em escalas locais e globais. Os recifes da cordilheira Maldive-Chagos representam uma das áreas com menor influência humana no oeste do Oceano Índico e, por isso as mudanças observadas nesses recifes são indicativas de alterações globais (M. James C).-Um dos distúrbios globais que mais afetam os recifes de corais foi o evento do El Niño de 1997-1998 (). A região de Maldive-Chagos é historicamente a mais

quente do Oceano Índico, e registros de satélite mostram que as maiores anomalias de temperatura em 1997-1998 ocorreram no noroeste do Oceano Índico, com temperaturas chegando a 31°C e anomalias de +1-3°C sustentadas por 2 anos (MENTZEL). Esta elevação térmica se associou a um evento de branqueamento generalizado nos corais escleractinios e a mortalidade entre maio e setembro de 1998 (SULLY). O aquecimento em larga escala representa um dos maiores distúrbios já registrados na história recente dos recifes de corais (Shannon). O fator forte da mudança ecológica para o GBR são anomalias prolongadas da temperatura da superfície do mar superior a 2°C em regiões amplas causaram uma onda de calor marinho que levava a um extenso branqueamento de corais (Sophie et al). Foi o terceiro evento de branqueamento de corais em massa do GBR em cinco anos, o que acabou levando mudanças nas assembleias de recifes de coral em uma escala regional (MENTZEL). Muita pesquisa foi realizada em diversos pontos de branqueamento de coral induzido pelo calor (). Pois não se sabe sobre onde começa a cascata de eventos de branqueamento e como as diferentes etapas interagem (Ferdinand et al). Para abordar a lacuna do ponto de vista dessa vista de modelagem, estendemos aqui um modelo bioenergético para simbiose dos corais e seus simbiontes de algas (Ferdinand et al). Esse modelo é responsável por estresse leve, onde a exposição ao excesso de luz leva a formação de ROS ().

Objetivos: O presente trabalho tem como realizar uma revisão de literatura sobre a impacto da temperatura das mudanças climáticas em Recifes de Coral.

Materiais e Métodos

Para identificação e realização da revisão de literatura foi realizado a busca de artigos científicos no mecanismo de pesquisa Google Acadêmico e na base de dados do Scopus e com método de inclusão foi separado artigos com publicações de 2000,2008, 2020, 2023, 2024. As palavras-chave utilizadas para o filtro de busca foram: temperature, coral reef, bleaching.

Resultados

Nossa busca resultou em 5 artigos nos quais foram verificados a metodologia usada, temperatura a espécie e as análises realizadas. O estudo conduzido por McClanahan (2000) revelou diferenças significativas na composição genérica de corais entre os anos de 1958 e 1999. A análise estatística por meio do teste de Kruskal-Wallis, aplicada às quatro categorias amostrais (1958, 1999 adultos, 1999 2,5 cm, 1999 0,5–2 cm), indicou diferenças altamente significativas ($\chi^2 = 16,7$; $p < 0,0008$).

Em 1958, os recifes eram dominados pelo gênero *Acropora*, enquanto em 1999 o gênero predominante passou a ser *Porites*. O gênero Astreopora, que em 1999 figurava entre os mais comuns, foi classificado como o menos frequente em 1958. A análise de agrupamento (cluster)

dos gêneros de coral indicou que os locais de amostragem substituíram os atóis como referência nas associações de ranking dos corais. As composições genéricas relativas entre 1958 e 1999 mostraram-se inteiramente distintas. Observou-se maior similaridade entre os locais na pesquisa de 1958, atribuída principalmente à dominância de Acropora naquele período.

Já o estudo de Crabbe (2008) investigou a correlação entre a temperatura do ar e as taxas de crescimento de corais da espécie *Porites lutea* na Grande Barreira de Corais, especificamente no distrito de Haapiti, Austrália. Foram realizadas medições experimentais em colônias de coral entre 1958 e 1990. A análise de regressão linear revelou uma correlação moderada entre a temperatura do ar e a taxa de calcificação anual (r = 0,28). Os resultados indicaram que um aumento de 1 °C na temperatura poderia levar a um acréscimo de aproximadamente 10,5% na densidade e de 4,5% na taxa de calcificação. As taxas de calcificação e de extensão dos corais mostraram-se altamente correlacionadas com a temperatura da superfície do mar e, em menor grau, com a radiação solar incidente. Em corais juvenis, a temperatura influenciou a transição entre o crescimento isométrico e alométrico, dependendo da variação térmica entre anos mais quentes e mais frios. As taxas de calcificação em colônias maciças de Porites apresentaram uma redução de cerca de 21% em duas regiões separadas por 450 km. Houve também uma diminuição de 16% na extensão linear, acompanhada por um declínio menos acentuado na densidade esquelética, contrastando com estudos anteriores sobre os fatores ambientais que influenciam o crescimento de *Porites* maciços na Grande Barreira de Corais.

No estudo de SULLY, Shannon (2020) mostrou que nos parâmetros de regressão ordinal mostrando as relações entre os quatro níveis de severidade do branqueamento em corais, ou seja, nenhum, leve 1% a 10% e moderado de 10% a -50% e severo 50%, as duas variáveis ambientais e sua interação dentro de uma estrutura bayesiana com valores médios e intervalos de credibilidade de 95% sendo linhas horizontais pretas finas, bem como intervalos de cerca de 50%. Esse estudo mostrou que em 3.694 locais usando 8.797 levantamentos dos recifes em 81 países, de 2002 a 2017. SSTS são as temperaturas da superfície do mar em °C, e a turbidez é medida de acordo com os valores de Kd490 durante o período do levantamento de campo. Os pontos vermelhos são a relação positiva com a severidade do branqueamento, já os pontos azuis mostram uma relação negativa com a severidade do branqueamento. O modelo gama que tratou os quatro níveis de branqueamento separadamente ou seja nenhum, leve 1% a -10%, moderado > 10 % a 50% e severo > 50% houve um ajuste significativamente de $p < .0001$ melhor do que o modelo gama nulo que se maximizou sobre todo o espaço de parâmetros. Esses resultados sugeriram que durante o evento de estresse térmico, o branqueamento de coral foi mais provável em recifes de águas claras do que em recifes de água túrbida.

Caroline Costa et al (2023) neste estudo houve uma abordagem diferente foram examinadas cerca de 2880 colônias de *Siderastrea stellata*, de uma das quais 93,42% se enquadram no grupo menor tamanho 2-10 cm, 5,44% no grupo de 11- 20 cm, 0, 77 no grupo de 21-30 cm e consideravelmente 0,37% no grupo de maior tamanho 31-40cm. Este padrão manteve ao longo de 3 anos de estudo com o grupo de menor tamanho permanecendo abundante, havendo estabilidade da população dominada por corais jovens. Logo, foi identificado uma redução de colonias maiores e mais antigas. Os resultados mostraram que a turbidez da água medida pelo vento e precipitação, reduz a probabilidade de branqueamento de corais, e que o estresse luminoso é um fator importante nesse processo, mesmo ausência de estresse térmico. Nos meses mais chuvosos na Costa do Ceará, a turbidez aumenta, protegendo o coral construtor de recifes *Siderastrea stellata* contra o estresse ambiental.

Nesse estudo Ferdinand et al (2024) fez simulações com o modelo bioenergético para indicar como as variações de temperatura afetam a dinâmica da simbiose dos corais. Em condições de temperatura elevada, foi observado a aceleração na taxa metabólica e leve redução na taxa fotossintética máxima dos simbiontes. Resultando em menor compartilhamento de carbono com o hospedeiro, reduzindo seu crescimento e havendo aumento relativo na razão simbionte hospedeiro, comportamento oposto ao branqueamento. Em temperaturas acima do limiar de branqueamento, este modelo previu colapso na simbiose, havendo queda na fotossíntese, aumentando a produção de espécies reativas de oxigênio e expulsão dos simbiontes.

Discussão

A presente revisão abordou cinco artigos distintos, avaliando o impacto das temperaturas nos recifes de corais. Tendo como objetivo avaliar o impacto das temperaturas nos corais e o branqueamento. Essas mudanças na composição genérica dos corais ao longo do tempo corroboraram os achados de McClanahan (2000), que identificou diferenças estatisticamente significativas entre os anos de 1958 e 1999 ($x2 = 16,7$; $p < 0,0008$). Em 1958, os recifes eram dominados por *Acropora*, enquanto em 1999 o gênero predominante passou a ser pouco frequente em 1958, tornou-se um dos mais comuns em 1999, havendo alterações relevantes na estrutura das comunidades coralinas. A análise de agrupamento revelou que os locais de amostragem passaram a desempenhar papel central nas associações de ranking dos corais, substituindo os atóis como referência. Além disso, observou-se maior homogeneidade entre os locais amostrados em 1958, atribuída a forte dominância de Acropora, contrastando com a diversidade de composições genéricas observadas em 1999. Complementarmente, Crabbe (2008) investigou a influência da temperatura do ar sobre o crescimento de colônias de

Porites lutea na Grande Barreira de Corais, com dados coletados entre 1958 e 1990 no distrito de Haapiti, Austrália. A análise de regressão linear revelou correlação moderada entre temperatura do ar e taxa de calcificação anual (r= 0,28), sugerindo que um aumento de 1°C poderia resultar em acréscimos de 10,5% na densidade e 4,5% na taxa de calcificação. As taxas de calcificação e de extensão mostraram-se fortemente associadas à temperatura da superfície do mar e, em menor grau, à radiação solar incidente. Em corais juvenis, observou-se que a temperatura influenciava a transição entre crescimento isométrico e alométrico, variando conforme padrões térmicos anuais. Ainda colônias maciças de *Porites* apresentaram redução de aproximadamente 21% na taxa de calcificação e 16% na extensão linear em duas regiões separadas por 450km, com declínio menos acentuado na densidade esquelética. Esses resultados contrastam com estudos anteriores, indicando que o impacto térmico sobre o crescimento de *Porites* pode ser mais complexo regionalmente variável do que se supunha. Sully (2020) analisou a severidade do branqueamento de corais em escala global, considerando quatro níveis de intensidade (nenhum, leve, moderado e severo) e sua relação com variáveis ambientais como temperatura da superfície do mar (SST) e turbidez (Kd490). Utilizando a abordagem bayesiana com regressão ordinal, o estudo avaliou 8.797 levantamentos em 3.694 locais distribuídos por 81 países entre 2002 e 2017.

Os resultados indicaram que o modelo gama, que tratou separadamente os níveis de branqueamento, apresentou ajuste significativamente superior ($p < 0,0001$) em relação ao modelo nulo. Observou-se que o branqueamento foi mais severo em recifes de águas claras, sugerindo que a turbidez pode atuar como fator atenuante durante eventos de estresse térmico. A temperatura da superfície do mar mostrou correlação positiva com a severidade do branqueamento, enquanto a turbidez apresentou correção negativa, evidenciando interações complexa entre fatores físicos e biológicos na resposta dos corais ao aquecimento global.

Caroline costa et al. (2023) adotou uma abordagem populacional ao analisar 2.880 colônias de *Siderastrea Stellata* ao longo de três anos na costa do Ceará. Os dados revelaram que 93,42% das colônias pertenciam ao grupo de menor tamanho (2-10 cm), indicando uma população dominada por corais jovens e com baixa representatividade de colônias maiores e mais antigas. Este padrão de distribuição permaneceu estável durante o período de estudo, sugerindo baixa longevidade ou crescimento limitado sob as condições ambientais locais. Os autores também demonstraram que a turbidez da água, influenciada por vento e precipitação, atua como fator protetivo contra o branqueamento coralino. Mesmo na ausência de estresse térmico, o estresse luminoso foi identificado como um agente relevante no desencadeamento do branqueamento. Durante os meses mais chuvosos, o aumento da turbidez contribuiu para a mitigação do estresse

ambiental, favorecendo a resiliência de *Siderastrea stellata* frente às variações climáticas. Ferdinand et al. (2024) utilizaram simulações com um modelo bioenergético para investigar os efeitos das variações de temperatura sobre a dinâmica da simbiose coralina. Em condições de temperatura elevada, observou-se aceleração das taxas metabólicas e leve redução na taxa fotossintética máxima dos simbiontes, o que resultou em menor compartilhamento de carbono com o hospedeiro e consequente redução em seu crescimento. Esse desequilíbrio levou ao aumento relativo da razão simbionte/hospedeiro, comportamento oposto ao padrão típico de branqueamento. No entanto, quando as temperaturas ultrapassaram o limiar crítico de branqueamento, o modelo previu o colapso da simbiose, com queda acentuada na fotossíntese, aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e expulsão dos simbiontes. Esses resultados reforçam a importância de limites térmicos na estabilização da relação simbiótica coral-alga, evidenciando que o estresse térmico pode desencadear mecanismos bioquímicos que comprometem sobrevivência dos corais.

Conclusões

A presente revisão sistemática abordou cinco estudos distintos que abordam os impactos das variações térmicas sobre os recifes de corais, com ênfase nos processos de branqueamento, crescimento e alterações na composição das comunidades coralíneas. Os resultados evidenciaram que o aumento da temperatura da superfície do mar, associado a fatores ambientais como turbidez e radiação solar, exerce influência direta e multifacetada sobre a fisiologia, ecologia e estrutura populacional dos corais. As alterações na composição genérica observadas por McClanahan (2000) entre os anos de 1958 e 1999 revelam uma reorganização significativa das comunidades coralinas, com substituição da dominância de *Acropora* por outros gêneros, refletindo a sensibilidade diferencial.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

1. MCCLANAHAN, Tim R. Bleaching damage and recovery potential of Maldivian coral reefs. Marine Pollution Bulletin, v. 40, n. 7, p. 587-597, 2000.
2. CRABBE, M. James C. Climate change, global warming and coral reefs: Modelling the effects of temperature. Computational Biology and Chemistry, v. 32, n. 5, p. 311-314, 2008.
3. SULLY, Shannon; VAN WOESIK, Robert. Turbid reefs moderate coral bleaching under climate-related temperature stress. Global Change Biology, v. 26, n. 3, p. 1367-1373, 2020.
4. LUCAS, Caroline Costa et al. Turbidity buffers coral bleaching under extreme wind and rainfall conditions. Marine Environmental Research, v. 192, p. 106215, 2023.
5. PFAB, Ferdinand et al. Heat stress and bleaching in corals: a bioenergetic model. Coral Reefs, v. 43, n. 6, p. 1627-1645, 2024.