



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA MARINHA, COSTEIRA E SEDIMENTAR

TESE DE DOUTORADO

**PREVISÃO PROBABILÍSTICA DO BRANQUEAMENTO DOS
CORAIS: ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ALERTA
PRECOCE PARA RECIFES DO OCEANO ATLÂNTICO**

DANILO SILVA LISBOA

SALVADOR

2020

**PREVISÃO PROBABILÍSTICA DO BRANQUEAMENTO DOS
CORAIS: ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ALERTA
PRECOCE PARA RECIFES DO OCEANO ATLÂNTICO**

Danilo Silva Lisboa

Orientador: Prof. Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Geologia, Área de Concentração: Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar.

SALVADOR

2020

DANILO SILVA LISBOA

**PREVISÃO PROBABILÍSTICA DO BRANQUEAMENTO DOS
CORAIS: ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS PARA O
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ALERTA
PRECOCE PARA RECIFES DO OCEANO ATLÂNTICO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia na área de concentração em Geologia Marinha Costeira e Sedimentar em 14/09/2020.

TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi
Orientador – PPPGG/UFBA



Dra. Zelinda Margarida de Andrade Nery Leão
Examinador Interno – PPPGG/UFBA



Dra. Dra. Marília de Dirceu Machado de Oliveira
Examinador Externo – PPPGG/UFBA



Dr. Ricardo Rios
Examinador Externo – Departamento de Ciência da
Computação – Instituto de Matemática/UFBA



Dr. Estevam Hruschka
Examinador Externo – Universidade de São Carlos

**SALVADOR
2020**

AGRADECIMENTOS

Gostaria expressar meus sinceros agradecimentos à todos que auxiliaram ao longo da minha trajetória acadêmica, seja direta ou indiretamente, e tornaram possível a realização desse trabalho.

Entre as instituições, agradeço à Universidade Federal da Bahia representada pelo Curso de Pós-Graduação em Geologia por toda a infra-estrutura disponibilizada, e à CAPES pela concessão da bolsa durante grande parte do doutorado.

Ao meu orientador, professor Dr. Ruy Kikuchi por ter me acolhido no grupo de pesquisa em Recifes de Corais e Mudanças Globais (RECOR), e por todas as orientações, ensinamentos e incentivos a mim direcionados ao longo dos últimos anos.

Aos pesquisadores Dra. Zelinda Leão, Dra. Marília Oliveira, Dr. Ricardos Rios, Dr Estevam Hruschka por terem aceitado participar do processo de avaliação deste trabalho e pelas valiosas contribuições.

Ao professor Abílio Bittencourt por todo o incentivo e encorajamento pessoal e profissional.

Aos colegas do grupo RECOR e do instituto de Geociências pelo convívio e amizade.

E especialmente à minha família (irmãs, mãe, esposa e filhos) por todo apoio e confiança incondicionais, sem dúvida imprescindíveis para o meu êxito pessoal e profissional.

Grande parte deste trabalho foi realizado com o apoio da CAPES - Código de financiamento 001.

*Valeu a pena? Tudo vale a
se a alma não é pequena.
Quem quer passar além do Bojador
tem que passar além da dor.
Deus, ao mar o perigo e o abysmo deu
mas nelle é que ele espelhou o céu.*

FERNANDO PESSOA

À minha família.

RESUMO

O branqueamento dos corais representa a resposta negativa mais proeminente dos ecossistemas recifais frente às atuais mudanças climáticas. Capaz de promover mortalidade em massa das colônias e significativas alterações nas estruturas das comunidades recifais, estes fenômenos devem tornar-se cada vez mais frequentes, intensos, duradouros e globalmente generalizados, a ponto de comprometer a viabilidade dos ecossistemas recifais nas próximas décadas. A escolha da rede bayesiana para a modelagem do branqueamento advém de sua inerente aptidão em integrar dados e conhecimentos com diferentes características e lidar com as incertezas e complexidades relacionadas a estes fenômenos graças ao uso de probabilidades. Nesta pesquisa razões pelas quais a abordagem Bayesiana pode ser bastante proficiente para modelagem dos ambientes recifais e particularmente para o caso do branqueamento dos corais são apresentadas, e os aspectos mais relevantes de referências-chave são discutidos com maiores detalhes sob a perspectiva do cientista/modelador recifal. Descrevemos a natureza destes modelos e os procedimentos para sua construção, fornecendo recomendações para uma modelagem apropriada em cada uma das principais etapas, e apresentamos um estudo de caso de formalização do modelo conceitual de previsão sazonal do branqueamento dos corais a partir de um caso controle em uma área de reserva ambiental. Para isso, duas ideias bem fundamentadas cientificamente foram avaliadas e confirmadas em relação à sua contundência nos eventos de branqueamento: 1- existe uma relação entre a intensidade do fenômeno El Niño e anomalias térmicas positivas no oceano Atlântico; e 2- o branqueamento dos corais é principalmente influenciado por anomalias térmicas positivas na água do mar. O modelo conceitual formalizado organizou hierarquicamente os indicadores relativos à estes pressupostos em uma estrutura de rede de acordo com seus níveis de influência sobre o branqueamento e foi utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento de modelos concorrentes aptos a realizar previsões sazonais para as áreas recifais do oceano Atlântico Norte. Procedimentos de mineração de dados, validação, e testes de pontuação foram utilizados como critério de comparação, demonstrando a viabilidade da abordagem Bayesiana para realizar previsões sazonais do estado de branqueamento com níveis de acurácia acima de 80%. Como alternativas para melhorar a precisão foram desenvolvidos modelos personalizados com bases de dados restritas a situações específicas, mas ao custo da perda da capacidade preditiva. Acreditamos que o modelo de rede Bayesiana desenvolvido, testado e avaliado nesta pesquisa representa um recurso útil para auxiliar os cientistas, governos e gestores ambientais através de um sistema de aviso prévio de branqueamento capaz de fornecer tempo suficiente para planejar campanhas de campo e possíveis ações mitigadoras. Finalmente, sob o ponto de vista evidenciado nesta pesquisa, a abordagem Bayesiana representa uma alternativa com expressivo potencial para auxiliar à gestão dos ecossistemas recifais e deve se estabelecer como uma técnica padrão de análise nos próximos anos. Familiarizar-se com características e procedimentos desta abordagem deve ser de grande valia para estudantes/pesquisadores e gestores empenhados em salvaguardar a viabilidade futura destes inestimáveis ecossistemas.

Palavras-chave: Previsão de branqueamento dos corais; Modelo de Rede Bayesiana; Oceano Atlântico; Sistema de alerta precoce.

ABSTRACT

Coral bleaching represents the most prominent negative response of reef ecosystems to current climate change. Capable of promoting mass mortality of colonies and significant changes in reef community structures, these phenomena should become increasingly frequent, intense, long-lasting and globally widespread, to the point of compromising the viability of reef ecosystems in the coming decades. The choice of Bayesian nets for bleaching modelling comes from their inherent ability to integrate data and knowledge with different characteristics and to deal with the uncertainties and complexities related to these phenomena through the use of probabilities. In this research reasons why the Bayesian approach can be quite proficient for modelling reef environments and particularly for the case of coral bleaching are presented, and the most relevant aspects of key references are discussed in more detail from the perspective of the reef scientist/modeler. We describe the nature and procedures for building these models, providing recommendations for appropriate modeling in each of the major steps. We present a case study of formalizing the conceptual model of seasonal coral bleaching prediction from a control case in an environmental reserve area. For this, two well founded scientific ideas have been evaluated and confirmed in relation to their forcefulness in bleaching events: 1- there is a relationship between the intensity of the El Niño phenomenon and positive thermal anomalies in the Atlantic Ocean; and 2- the bleaching of corals is mainly influenced by positive thermal anomalies in seawater. The formalised conceptual model has hierarchically organised the indicators related to these assumptions into a network structure according to their levels of influence on bleaching and has been used as a starting point to develop competing models capable of making seasonal forecasts for the reef areas of the North Atlantic Ocean. Data mining procedures, validation, and scoring tests were used as criteria for comparison, demonstrating the feasibility of the Bayesian approach to make seasonal forecasts of the bleaching state with accuracy levels above 80%. As alternatives to improve accuracy, customized models were developed with databases restricted to specific situations, but at the cost of loss of predictive capacity. We believe that the Bayesian network model developed, tested and evaluated in this research represents a useful resource to assist scientists, governments and environmental managers through a bleaching early warning system capable of providing sufficient time to plan field campaigns and possible mitigation actions. Finally, from the point of view shown in this research, the Bayesian approach represents an alternative with expressive potential to assist the management of reef ecosystems and should be established as a standard technique of analysis in the coming years. Familiarizing oneself with the characteristics and procedures of this approach should be of great value to students/researchers and managers committed to safeguarding the future viability of these priceless ecosystems.

Keywords: Coral bleaching forecast; Bayesian Network Model; Short-term prediction; Atlantic Ocean; Early warning system.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO GERAL.....	09
CAPÍTULO 2- MODELAGEM PROBABILÍSTICA DO BRANQUEAMENTO DE CORAL: UMA REVISÃO METODOLÓGICA INTEGRATIVA NÃO SISTEMÁTICA E UM CASO EXEMPLO DE FORMALIZAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL DE PREVISÃO A CURTO PRAZO NO OCEANO ATLÂNTICO	19
CAPÍTULO 3- WILL CORAL REEFS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN BLEACH DURING THE NEXT SEASON? A PROBABILISTIC ANSWER.....	54
CAPÍTULO 4- CONCLUSÕES.....	85
ANEXO A- REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA – ARTIGO 1.....	88
ANEXO B- REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA – ARTIGO 2.....	107
ANEXO C- COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO 1.....	114
ANEXO D- COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 2.....	115

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

Este documento representa parte de um amplo estudo empenhado em contribuir para o estado atual de conhecimento acerca de aspectos relacionados ao fenômeno do branqueamento dos corais no Oceano Atlântico, sua previsibilidade e como/porquê modelos probabilísticos podem sustentar este complexo e relevante propósito. Concebido originalmente como desdobramento da minha dissertação de mestrado, e apresentado aqui como tese de doutorado do curso de pós-graduação em Geologia Marinha da Universidade Federal da Bahia, este documento foi organizado em quatro partes: capítulo introdutório; artigo de revisão bibliográfica/metodológica integrativa; artigo científico redigido e publicado em formato de *letter*; e o capítulo de considerações finais.

No capítulo introdutório apresentamos a conjuntura de circunstâncias atuais que instigaram as definições fundamentais acerca do objeto de estudo (i.e branqueamento dos corais), do escopo central da pesquisa (i.e suporte à gestão dos ambientes de recifes de corais) e da principal ferramenta adotada para análise (i.e modelos de redes Bayesianas). Ainda no capítulo inicial, pontuamos, de maneira sucinta, à respeito de tópicos considerados relevantes sobre os corais, recifes e o fenômeno de branqueamento, buscando embasar a leitura dos artigos científicos subsequentes.

O segundo capítulo refere-se a um artigo de revisão bibliográfica/metodológica integrativa não-sistemática, cujo objetivo foi descrever os atributos da abordagem Bayesiana, destacando relevantes diretrizes em cada uma das principais etapas da construção destes modelos probabilísticos para promover uma modelagem padrão. Referências-chave são discutidas com maiores detalhes sob o ponto de vista do modelador/pesquisador recifal, e são apresentadas razões pelas quais esta abordagem pode ser bastante proficiente para modelagem dos ambientes recifais e particularmente para o caso do branqueamento dos corais. Ainda neste capítulo apresentamos o estudo de caso cujo objetivo primordial foi a formalização do modelo conceitual apto a ser utilizado para previsão sazonal do branqueamento dos corais nas diversas áreas recifais do oceano Atlântico. Este artigo foi redigido de acordo com as instruções e normas da revista *Ecological Modelling*, revista científica mensal fundada em 1975, e atualmente publicada pela *Elsevier* que cobre o uso de modelos ecossistêmicos em diversas áreas das ciências ambientais. As normas técnicas e especificações requeridas por esta revista foram anexadas ao final do documento (anexo B).

No terceiro capítulo, apresentamos o artigo publicado em Abril de 2020 na revista quinzenal de geociências, da *American Geophysical Union*, chamada *Geophysical Research Letters*, que publica artigos de alto impacto, inovadores e oportunos sobre grandes avanços que abrangem todas as principais disciplinas da geociência. O objetivo primordial deste artigo foi descrever os procedimentos adotados e os resultados alcançados a partir do desenvolvimento de uma ferramenta útil e simples de ser entendida e/ou utilizada por estudantes, cientistas, e gestores para auxiliar o manejo recifal através de um sistema de alerta precoce para o branqueamento de corais. Esta abordagem mostrou-se extremamente eficiente na previsão de branqueamento para o Oceano Atlântico Sul em uma etapa anterior de pesquisa (Lisboa et al., 2018), e nossa intenção aqui também se referiu ao emprego e ampliação das técnicas e diretrizes desta abordagem

(também apresentadas na revisão metodológica apresentada no capítulo 2) para as outras áreas recifais do Oceano Atlântico (i.e recifes situados no Oceano Atlântico Norte).

Por fim, no quarto capítulo, são expostas as considerações finais e os desdobramentos futuros que poderiam contribuir para o progresso de relevantes questões metodológicas da ferramenta apresentada aqui, especialmente, diante dos eventos extremos de branqueamento esperados para as próximas décadas.

Motivação da pesquisa

Considerações sobre a atual conjuntura de circunstâncias alarmantes

O homem mudou o planeta. Nos dias atuais, virtualmente todos os ecossistemas do planeta são impactados direta ou indiretamente pelas ações antrópicas (Solomon et al., 2007; Norris et al., 2013). Há alguns anos a concentração de dióxido de carbono na atmosfera ultrapassou os fatídicos 400 ppm, frente aos 280 ppm da era pré-industrial, sendo atualmente a maior concentração dos últimos 800.000 anos (IPCC, 2018). Desde de que impomos um novo ritmo de emissão de gases estufa, os padrões climáticos enfrentam uma depreciação gradativa, com inúmeros efeitos deléteiros nos sistemas naturais e sucessivos aumentos na frequência e intensidade de fenômenos climáticos extremos (e.g. furacões, inundações, secas; IPCC, 2018). A ciência carrega as respostas de que precisamos para evitarmos ou pelo menos protelarmos os colapsos dos sistemas naturais, enquanto uma solução perdurável que, inevitavelmente, deve levar em conta o comprometimento pessoal de todos, ainda não é factível de ser implementada.

Ao falarmos de mudanças climáticas, é significativo esclarecer que o clima do planeta, desde seu nascimento há mais de 4,5 bilhões de anos, sempre oscilou por razões naturais (Doney e Schimel, 2007). Grande parte da variabilidade climática da história do nosso planeta pode se explicada a partir da combinação dos ciclos de Milankovitch, com períodos de dezenas a centenas de milhares de anos (Luthi et al., 2008), com outros fatores que influenciam na dinâmica do ciclo do carbono (e.g. a tectônica de placas, o intemperismo das rochas, a precipitação química, a circulação oceânica e a ação de organismos) (Doney e Schimel, 2007). Este aspecto inerentemente cíclico das condições climáticas fica evidente ao analisarmos a curva de variação do nível do mar durante o Holoceno (últimos 800 mil anos), onde constata-se a alternância entre estagios isotópicos de mar alto e baixo com variações relacionadas à quantidade de gelo acumulada nos polos, concentrações de gases estufa e temperaturas médias (Luthi et al., 2008). Entretanto, ao mudarmos a escala de análise para dezenas de milhões de anos, podemos pensar que desde o Oligoceno (34 Ma) o planeta sustenta uma aparente estabilidade com clima relativamente frio, com algum gelo acumulado nos polos e relativas baixas concentrações de CO₂ na atmosfera (Liu et al., 2009). Portanto, apesar do clima estar em constante alteração, a análise da sua variabilidade é fortemente dependente da escala de tempo utilizada. Sob este ponto de vista, podemos conceber, de maneira elementar, a ideia do clima como uma manifestação do estado de entropia do planeta, que está sempre procurando se reequilibrar em meio à dinâmicas cíclicas dos seus agentes controladores. Neste contexto, as ações antrópicas, principalmente pós revolução industrial, funcionariam como um aquecedor permanente, acelerando esses ciclos e gerando mecanismos de retroalimentação a ponto de realmente desestabilizar todo o sistema.

À esta altura dois relevantes aspectos merecem destaque: 1 – Apesar de ao longo do tempo geológico o clima da Terra estar em constante oscilação, o perigo vinculado às atuais mudanças climáticas não está relacionado apenas à magnitude, mas também à velocidade que

impomos estas alterações (Bright, 1997). 2 – A história geológica nos mostra que o planeta já experienciou abruptas mudanças climáticas diante de eventos extremos no passado (e.g. fortes atividades vulcânicas, emissões oceânicas de gases estufa, colisão de asteróides), mas à altos preços que se manifestaram sob a forma de consequências catastróficas ao longo de milhares de anos (e.g. hipoxia e acidificação dos oceanos, alterações nas correntes oceânicas e atmosféricas, extinção em massa de espécies) (Jablonski, 2005; Coxall e Pearson, 2007). Um exemplo ocorreu durante o análogo pretérito mais proeminente para o atual aumento do dióxido de carbono atmosférico (55 Ma – máximo termal do Paleoceno-Eoceno) (Zachos et al., 2001; Volkova e Kuz'mina, 2005), quando uma grande quantidade de carbono inorgânico foi emitida para o sistema oceano/atmosfera, desencadeando o aquecimento global médio de pelo menos 5°C em menos de 10.000 anos (Zachos et al., 2005). Apesar deste ritmo de aquecimento ter sido pelo menos uma ordem de grandeza menor do que o atual, foi suficiente para promover diversos efeitos deletérios que perduram por milhares de anos a partir de então (e.g. extinção em massa de espécies da flora e fauna, alterações agressivas nos ecossistemas) (Jablonski, 2005). À esta altura, duas questões fundamentais emergem: nós, humanos, estamos cientes da real magnitude e extensão dos impactos que estamos causando não só para os sistemas naturais, mas também para nós mesmos (especialmente as futuras gerações)? Até que ponto estamos dispostos a sacrificar a estabilidade climática (e tudo que ela tem a oferecer) em nome de um estilo de vida centrado no desperdício, na individualidade e inerentemente insustentável?

De fato, processos como extinção em massa, deteriorização dos ecossistemas, acidificação e hipoxia dos oceanos já estão ocorrendo durante o Antropoceno, não apenas graças ao aumento de gases estufa na atmosfera, mas também pela ação sinérgica dos múltiplos impactos de origem antrópica. Desde a década de 1970, segundo estimativas, as populações de animais selvagens foram reduzidas pela metade ao passo que a população de humanos dobrou. Espécies são extintas em taxas 100 vezes mais rápidas do que seriam sem a interferência humana (Pereira et al., 2010). Nos ambientes marinhos, estimativas mostram que atividades antrópicas já promoveram impactos graves em mais de 40% dos ecossistemas costeiros (Halpern *et al.*, 2008). Um fato realmente preocupante é que estamos apenas começando a compreender a real extensão dos impactos relacionados às nossas ações. Exemplos marinhos significativos disso, referem-se aos processos de acidificação e plastificação dos oceanos, cujas consequências podem ser desastrosas para a assembléia biológica, mas ainda permecem amplamente desconhecidas (Doney et al., 2009; Eriksen et al., 2014).

A situação parece ainda mais grave em um dos ecossistemas mais vulneráveis as mudanças climáticas: os recifes de corais. Estes ecossistemas são particularmente susceptíveis aos dois principais processos marinhos vinculados às atuais mudanças climáticas: o aquecimento da água e a acidificação dos oceanos, ambos causados pelo aumento na concentração de CO₂. Isto é evidente, pois os corais além de viverem em ambientes próximos a seu limite superior de tolerância térmica, indicado pela sua intrínscica sensibilidade a pequenas variações na TSM (Marshall e Schuttenberg, 2006), também são organismos cujo sucesso evolutivo está intimamente relacionado a habilidade de produzir grandes quantidades de carbonato de cálcio (Wood, 2001). Pesquisas recentes apontam para a possibilidade de que uma parcela inaceitavelmente alta dos recifes de corais do mundo (i.e. 30 – 50%) já terem sido destruídos de maneira irreparável (Hughes et al., 2018). Para as próximas décadas, modelos numéricos e probabilísticos que levam em conta diferentes cenários de emissão de gases estufa indicam que a viabilidade a longo prazo dos ecossistemas recifais como sistemas eficazes será seriamente ameaçada (Donner et al., 2005; Wooldridge et al., 2005). Em outras palavras, os atuais índices de

deterioração, se continuarem, significam que os recifes, como os conhecemos hoje, desaparecerão, sendo, provavelmente substituídos por ecossistemas muito menos biodiversos e produtivos, e com a capacidade de apoiar as comunidades humanas muito mais restrita (Donner et al., 2005). Estratégias de gestão centradas em ações mitigadoras possíveis de serem implementadas local/regionalmente, principalmente relacionadas à descargas de nutrientes, sedimentação e sobrepesca representam importantes alternativas para aliviar os recifes, entretanto, a perspectiva comum entre os cientistas especialistas é que estes tipos de ação provavelmente serão ofuscadas pelos impactos mais significativos de escala global relacionados às mudanças climáticas (Ban et al., 2014).

Em meio a este cenário devastador, e extremamente desencorajador sob o ponto de vista dos recifes de corais, pesquisadores enfrentam o desafio de sintetizar informações e métodos científicos, não apenas para observar e medir, mas também para auxiliar na gestão dos sistemas recifais. Este movimento da comunidade científica em expandir o escopo das pesquisas para além do campo teórico e afirmar-se como uma ferramenta fundamental para a gestão ambiental vem ganhando força ao longo dos últimos anos diante da imperativa necessidade de sustentar decisões baseadas em métodos científicos (Nyberg et al., 2006). A presente pesquisa representa mais um exemplo que insere-se neste vigente movimento científico ao propor o desenvolvimento de uma ferramenta apta a realizar prognósticos com certo grau de antecedência acerca da resposta negativa mais proeminente dos corais frente as mudanças climáticas: o branqueamento dos corais. Muita atenção tem sido dedicada à este fenômeno diante dos intensos e frequentes episódios ocorridos nas últimas décadas que desencadearam em mortalidade em massa de corais (e outros invertebrados) ao longo de centenas de quilômetros, conduzindo a significativas alterações nas estruturas das comunidades, ou mesmo assolando recifes inteiros (Hughes et al., 2018). Além disso o branqueamento pode impor uma vulnerabilidade temporária a outros agentes impactantes (e.g. diminuição da capacidade de autolimpeza e resistência à competição e/ou predação), ou agir sinergeticamente com outros fatores (e.g. acidificação, assoreamento e descarga de nutrientes) para impactar negativamente processos elementares dos corais (e.g. taxas de reprodução, calcificação, assentamento larval) (Brown, 1997).

Na presente pesquisa pretendeu-se contribuir para o estado atual de conhecimento acerca das possíveis circunstâncias desencadeadoras do branqueamento dos corais através da caracterização das relações existentes entre variáveis ambientais nas principais áreas recifais do oceano Atlântico (i.e. o complexo recifal dos Abrolhos no oceano Atlântico sul, e áreas recifais na porção oeste do oceano Atlântico Norte). A considerável quantidade de observações de campo realizadas nestes recifes durante as últimas décadas, além da grande disponibilidade de dados marinhos remotos (e.g. dados de satélite, de reanálise e de modelagem) fornecem uma proveitosa oportunidade para o desenvolvimento de ferramentas de apoio à gestão segundo os procedimentos de aprendizagem de máquinas (exemplos em Wooldridge et al., 2004; Ban et al., 2014; Lisboa et al., 2018). Diante disso, e da inadiável necessidade de recursos científicos de carácter mais prático, que extrapolem o campo teórico e sejam aptos a dar suporte à gestão ambiental, a abordagem escolhida nesta pesquisa para modelagem do branqueamento de coral foi a abordagem probabilística, ou como comumente referenciada, abordagem Bayesiana. Esta escolha também decorreu diante de algumas peculiaridades (a serem discutidas em detalhes no artigo de revisão teórica apresentado no capítulo 2) que tornam o emprego de redes Bayesianas minuciosamente compatível com a intrincada tarefa de modelar a complexidade associada aos eventos de branqueamento (fenômeno altamente variável em escalas temporais e espaciais).

Portanto, ressalta-se que o objetivo primordial desta pesquisa configurou-se como o desenvolvimento de uma ferramenta alternativa empenhada em assistir à gestão dos ambientes recifais através de avisos prévios do branqueamento dos corais. A construção de um modelo capaz de fornecer prognósticos com meses de antecedência advém da necessidade em auxiliar os cientistas e gestores ambientais através de um sistema de alerta precoce capaz de proporcionar tempo hábil para planejar campanhas de campo e implementar possíveis ações mitigadoras.

A seguir expomos alguns aspectos teóricos e conceitos relacionados aos corais, os recifes e ao processo de branqueamento que apesar de serem considerados essenciais para fundamentar uma compreensão mais embasada dos artigos apresentados nos capítulos 2 e 3, não puderam ser devidamente abordados e, desta forma, optamos por debatê-los, pelo menos brevemente, neste capítulo introdutório.

Recifes, corais e o processo de branqueamento

Um recife de coral é definido, geomorfologicamente, como uma estrutura rígida e resistente à ação das ondas e marés que foi construída biologicamente através da precipitação do carbonato de cálcio presente na água do mar. Os principais edificadores do recife são os corais pétreos, animais invertebrados exclusivamente marinhos agrupados taxonomicamente no filo *Cnidária*, na classe *Anthozoa* e na sub-classe *Hexacorallia*. Estes pequenos animais (geralmente com dimensões de 1 a 3 mm de diâmetro), denominados pólipos, secretam um esqueleto calcário maciço em suas bases à medida que a colônia cresce (Glynn, 1996). Dessa forma, os pólipos encontram-se acima do esqueleto calcário, conectados lateralmente e crescem em direção à superfície do mar construindo uma estrutura rochosa. O acúmulo sucessivo de esqueletos calcários, inicialmente em colônias, e depois em uma forma complexa e tridimensional dos recifes, cria reentrâncias, frestas e orifícios de variados tamanhos. Graças a isso, surge uma infinidade de nichos ecológicos para a fauna e a flora, que usufruem desta estrutura como local de refúgio, alimentação, reprodução e moradia (Glynn, 1996). A alta biodiversidade encontrada nos recifes de corais representa cerca de 25% dos organismos marinhos, caracterizando estes importantes ecossistemas costeiros como os mais ricos dos oceanos tropicais (Burke et al, 2001). No mar aberto que circunda os recifes, a produtividade pode cair a $0.01\text{gC}/\text{m}^2\text{dia}$, enquanto as águas associadas aos recifes podem atingir valores acima de $40\text{gC}/\text{m}^2\text{dia}$ (Marshall e Schuttenberg, 2006), impulsionando uma complexa teia alimentar nessas regiões. Dessa forma, os recifes representam uma fonte fundamental de biodiversidade e biomassa para os oceanos tropicais (Pennings, 1997).

Portanto, os recifes de corais constituem-se como ecossistemas extremamente valiosos em termos ecológicos, mas também tem uma clara relevância em termos sócio-econômicos ao proverem bilhões de dólares anuais em valor estimado pelos serviços prestados à grande parte da população humana que vive na zona costeira (Constanza et al., 1997). Podemos citar os recifes como fontes de recursos pesqueiros (McClanahan, 1995) e serem importantes para o turismo e para a indústria farmacológica como fonte de substâncias químicas (Souter e Lindén, 2000; Pennings, 1997). Além disso, sob o ponto de vista da Geologia costeira, os recifes podem ser entendidos como agentes morfológicos essenciais para a proteção da linha de costa contra a erosão, ação de correntes, ondas e tempestades (Pearson et al., 2017). O efeito dos recifes na geodinâmica costeira ainda possibilita a formação de ecossistemas associados (e.g. estuários, manguezais, ilhas), que são também importantíssimos habitats tanto para assembléia biológica como para os humanos. Somado a isso, o acúmulo biogênico de carbonato de cálcio nos recifes

de corais desempenha um papel crucial no balanço biogeoquímico dos oceanos e no controle do clima do planeta ao servir como sumidouro de parte dos gases estufa atmosféricos (Sabine e Feely, 2007). A milhares de anos, os corais, ao segregar carbonato de cálcio em seu esqueleto calcário, “forçam” a água do mar a retirar mais dióxido de carbono da atmosfera, contribuindo para abaixar suas concentrações atmosféricas (Sabine e Feely, 2004).

Antes de discutirmos particularidades relacionadas ao fenômeno de branqueamento, é pertinente considerar que os corais pétreos são animais carnívoros que capturam o plâncton ativamente pela ação de seus tentáculos periféricos. Contudo, boa parte da demanda energética destes animais é suprida através de uma relação de endossimbiose com microalgas dinoflageladas unicelulares, chamadas zooxantelas (zôo-animal, e xanth-dourado) (Muller-Parker e D’elia, 1996). Esta relação simbiótica, responsável por beneficiar a ambos os organismos, provavelmente surgiu a 230 milhões de anos por conta da diminuição da concentração de dióxido de carbono na atmosfera (Hallock, 1996). Os corais excretam nutrientes inorgânicos (i.e. amônia, dióxido de carbono) como subprodutos do seu metabolismo, que são essenciais para a fotossíntese das microalgas. Além disso, os corais agem como hospedeiros, fornecendo abrigo e proteção para as zooxantelas simbiotes nos vacúolos perialgais das células gastrodémicas (Muller-Parker e D’elia, 1996). Por outro lado, as microalgas translocam ao seu hospedeiro a grande maioria do carbono fixado pela fotossíntese (i.e. 60 a 98%) que supre grande parte da demanda de carbono orgânico, constituindo a principal fonte energética dos corais (Jones et al., 1995; Muller-Parker e D’elia, 1996). Outros serviços prestados aos seus hospedeiros pelas microalgas endossimbiontes são a proteção contra os efeitos dos raios ultravioletas, através de pigmentos especiais, e a deposição mais eficiente do carbonato de cálcio no processo de fotossíntese (Muller-Parker e D’elia, 1996).

Pelo fato da maioria dos corais hermatípicos ser zooxantelada, torna-se evidente o papel crucial desta estreita relação simbiótica em proporcionar edificar os recifes. Graças ao mutualismo entre um consumidor (coral) e um produtor primário (zooxantela), ocorrem transformações mais dinâmicas dos constituintes químicos entre as frações orgânica e inorgânica. Relações que promovem a ciclagem de nutrientes de maneira mais eficiente representam forças-motriz que impulsionam a vida não apenas nos oceanos tropicais, mas também em diversos outros importantes sistemas naturais (Burke et al., 2001). Em condições normais, os corais apresentam baixas taxas de perdas de zooxantelas para o ambiente, com variações sazonais em função das mudanças nas condições físicas ambientais (Jones, 1995). Essas variações na densidade são resultado de um ajuste gradual da simbiose, buscando otimizar as taxas de fotossíntese (Muller-Parker e D’elia, 1996), entretanto, sabemos que o término desta relação de simbiose pode acontecer de maneira generalizada se ocorrerem mudanças físicas na água do mar (Glynn e D’croz, 1990).

Diversos fatores podem desencadear ou agir de maneira combinada para intensificar o branqueamento (e.g. fraca circulação de água, a diminuição de salinidade, o aumento de sedimentos em suspensão, a insuficiência de luz solar, exposição aérea durante a baixa-mar, presença de doenças, depreciação da qualidade da água) (Marshall e Schuttenberg, 2006). Na presente pesquisa, entretanto, voltamos nossa atenção para o fator mais preponderante para a determinação da ocorrência e severidade destes fenômenos, a temperatura da água. Um aumento na temperatura da água do mar pode levar a inibição do fluxo de energia para a fase escura da fotossíntese, comprometendo a eficiência do processo fotossintético, ou até mesmo estimulando a produção de compostos químicos tóxicos (e.g. radicais de oxigênio) (Marshall e Schuttenberg, 2006). Isto força os corais a expulsar suas microalgas endossimbiontes, expondo o esqueleto

branco de carbonato cálcio através dos seus tecidos transparentes. De maneira bem categórica, podemos afirmar, baseado em diversas pesquisas de campo e laboratoriais, que o branqueamento representa a resposta imediata dos corais aos aumentos de temperatura da água (ou, sob uma perspectiva mais generalista, ao aquecimento global) (Hughes et al., 2018). Indiscutivelmente, esta relação tem sido a causa primordial dos eventos em massa, que desde a década de 1980 acontecem em escala regional (>1000 km), com a maioria dos eventos extremos coincidindo com anos de El Niño (Hughes et al., 2018). Exemplos destes eventos severos referem-se aos ocorridos nos anos de 1997/1998, 2009/2010 e 2015-2017, caracterizados como eventos globais que levaram recifes inteiros à morte (Donner et al., 2017; Hughes et al., 2018).

Em relação ao El-Niño, é significativo considerar que este fenômeno é caracterizado como a fase quente do modo de variabilidade climática interanual de larga escala conhecido como ENOS (El – Niño Oscilação Sul) que acontece na região do Oceano Pacífico equatorial com o surgimento de padrões anômalos no campo de ventos e na TSM. Este fenômeno pode ser descrito como um modo oscilatório do sistema acoplado oceano-atmosfera que por meio de teleconexões atmosféricas é responsável por parte da variabilidade interanual em diversas partes do mundo, observadas muitas vezes sobre a forma de anomalias climáticas (Klein et al., 1999).

No oceano Atlântico, área de estudo da presente pesquisa, esta relação entre o El Niño e anomalias de temperatura da água acontece de maneira mais pronunciada com uma defasagem temporal de 6 a 9 meses (Klein et al., 1999). Para a modelagem sazonal do branqueamento proposta aqui, isso é particularmente importante pois confere uma circunstância singular para treinar um modelo capaz de realizar previsões com a antecedência oportunizada por esta relação temporalmente defasada. Para isso, estas relações entre o fenômeno El Niño, anomalias de temperatura da água do mar e branqueamento dos corais foram avaliadas, inicialmente, em termos de contundência em relação à diversos outros parâmetros (detalhes expostos no estudo de caso da subseção 5 - capítulo 2), e, após confirmadas, foram empregadas como pressupostos teóricos que fundamentaram o desenvolvimento dos modelos de previsão a curto prazo do branqueamento para as áreas recifais de Abrolhos (Lisboa et al., 2018 – pesquisa não apresentada aqui) e do oceano Atlântico norte (Lisboa e Kikuchi, 2020 – artigo exposto no capítulo 3).

1.1. Referências bibliográficas

Ban S. S., Pressey R.L., Graham N.A.J. 2014. Assessing interactions of multiple stressors when data are limited: A Bayesian belief network applied to coral reefs. *Global Environmental Change*.27:64–72.

Brown B.E., 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs*, v. 16, p. 129-138.

Burke, L., Kura, Y., Kassem, K., Revenga, C., Spalding, M., McAllister, D., 2001. *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Coastal Ecosystems*. 1ª edn. World Resources Institute, Washington D.C.

Constanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M., 1997. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature* 387, 253-260.

Coxall H. K., Pearson P. N. 2007. Deep-Time Perspectives on Climate Change: Marrying the Signal from Computer Models and Biological Proxies. The Geological Society (eds Williams M., Haywood A. M., Gregory F. J. & Schmidt D. N.) Ch. 16, 351–387.

Doney, S., Schimel, D., 2007. Carbon and Climate System Coupling on Timescales from the Precambrian to the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*. 32. 10.1146/annurev.energy.32.041706.124700.

Doney, S. C.; Fabry, V. J.; Feely, R. A.; Kleypas J. A., 2009. Ocean Acidification: The Other Problem. *Annu. Rev. Marine. Sci.* 1:169-192.

Donner, S. D., W. J. Skirving, C. M. Little, M. Oppenheimer, O. Hoegh-Guldberg., 2005. Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Global Change Biology* 11:2251–2265.

Eriksen M, Lebreton LCM, Carson HS, Thiel M, Moore CJ, et al., 2014. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLOS ONE* 9(12): e111913.

Glynn P. W.; D’Croze L. 1990. Experimental evidence for high temperature stress as the cause of El Niño coincident coral mortality. *Coral Reefs*, v.8, p. 181-191.

Glynn P. W. 1996. Bioerosion and Coral-Reef Growth: A Dynamic Balance. Chapter 4 *In Life and death of coral reefs*. Birkeland, C. (ed.) Chapman & Hall, New York, p.535.

Hallock P. 1996. Reefs and Reef limestone in Earth History. Chapter 2 *In Life and death of coral reefs*. Birkeland, C. (ed.) Chapman & Hall, New York, p.535.

Halpern, B.S., et al., 2008. A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems. *Science* 319, 948-952.

Hughes, T. P. et al., 2018. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359, 80–83.

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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Jones R. J. 1995. Sublethal stress assessment in scleractinia and the regulatory biology of the coral-algal symbiosis. PhD Thesis, James Cook University, Australia.

- Klein S. A., Soden B. J., Lau N., 1999. Remote Sea Surface Temperature Variations during ENSO: Evidence for a Tropical Atmospheric Bridge. *Journal of Climate*, v. 12, p. 917-932.
- Lisboa, D. S., Kikuchi, R. K. P., & Leão, Z. M. A. N. 2018. El Niño, sea surface temperature anomaly and coral bleaching in the South Atlantic: a chain of events modeled with a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123.
- Lisboa, D. S., Kikuchi, R. K. P., 2020. Will coral reefs in the North Atlantic Ocean bleach during the next season? A probabilistic answer. *Geophysical Research Letters*.
- Liu Z. et al., 2009. Global Cooling During the Eocene-Oligocene Climate Transition. *Science* 323, 1187–1190.
- Luthi, D., M. Le Floch, B. Bereiter, et al., 2008: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000- 800,000 years before present, *Nature*, 453, 379-382.
- Marshall P.; Schuttenberg H., 2006. *A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching*. Published by: Great Barrier Reef Marine Park Authority, p. 178.
- McClanahan T.R., 1995. A Coral Reef Ecosystem-Fisheries Model: Impacts of Fishing Intensity and Catch Selection on Reef Structure and Processes. *Ecological Modelling* 80, 1-19.
- Muller-Parker G.; D'elia F. C. 1996. Interactions Between Corals and Their Symbiotic Algae. Chapter 5 *In Life and death of coral reefs*. Birkeland, C. (ed.) Chapman & Hall, New York, p.535.
- Norris R. D., Kirtland S. T., Hull, P. M. e Ridgwell A., 2013 Marine ecosystem responses to cenozoic global change, *Science*, 492.
- Nyberg, J.B., Marcot, B.G., Sulyma, R. 2006. Using Bayesianbelief networks in adaptive management. *Canadian Journal of Forest Research* 36:3104-3116.
- Pennings, S.C., 1997. Indirect Interaction on Coral Reefs. in: Birkeland, C. (Eds.), and *Death of Coral Reefs*. Chapman & Hall, New York, pp. 249-272.
- Pearson, S.G., Storlazzi, C., van Dongeren, A.R., Tissier, M.F.S., Reniers, A.J.H.M., 2017. A Bayesian-based system to assess wave-driven flooding hazards on coral reef lined coasts, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 10,099-10,117.
- Pereira, H. M. et al. 2010. Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science* 330, 1496–1501.
- Sabine, C. e Feely, R. A., 2007. *The oceanic sink for carbon dioxide*, Oxfordshire: CABI Publishing, 1.

Sabine, C. L.; Feely, R.; Gruber, N.; Key, R. e Lee, K., 2004. The oceanic sink for anthropogenic co₂, *Science*, 71.

Solomon S., Qin, D., Manning, M. Chen, Z. e Marquis, M. 2007. *Climate change*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1.

Souter, D.W., Lindén, O., 2000. The Health and Future of Coral Reef Systems. *Ocean & Coastal Management* 43, 657-688.

Volkova V. S., Kuz'mina O. B. 2005. Flora, vegetation, and climate of the Middle Cenophytic (Paleocene—Eocene) of Siberia: Palynological data. *Russian Geology and Geophysics* 46, 844–855.

Wood R., 2001. *Reef evolution*, Oxford Univ. Press., 1.

Wooldridge, S., Done, T., 2004. Learning to predict large-scale coral bleaching from past events: a Bayesian approach using remotely sensed data, in-situ data, and environmental proxies. *Coral Reefs* 23, 96-108.

Wooldridge, S., Done, t., Berkelmans, R., Jones, R. Marshall, P. 2005. Precursors for resilience in coral communities in a warming climate: a belief network approach. *Mar Ecol Prog Ser* 295: 157-169.

Zachos J., Pagani M., Sloan L., Thomas E., Billups K. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate65 Ma to present.*Science*292:686–93

Zachos J.C., Rohl U., Schellenberg S.A., Sluijs A., Hodell D.A., et al. 2005. Rapid acidification of the ocean duringthe Paleocene-Eocene Thermal Maximum.*Science*308:1611–15.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM PROBABILÍSTICA DO BRANQUEAMENTO DE CORAL: UMA REVISÃO METODOLÓGICA INTEGRATIVA NÃO SISTEMÁTICA E UM CASO EXEMPLO DE FORMALIZAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL DE PREVISÃO A CURTO PRAZO NO OCEANO ATLÂNTICO

D. S. Lisboa^{1,2*}, R. K. P. Kikuchi¹

¹Coral Reef and Global Climate Change Research Group, Federal University of Bahia (UFBA), Rua Barão de Jeremoabo, Ondina, Salvador, 40170-115, Bahia, Brazil

²Post-graduate Program in Geology, Federal University of Bahia (UFBA), Rua Barão de Jeremoabo s/n, Ondina, Salvador, 40170-115, Bahia, Brazil

* Danilo S. Lisboa (lisboa.ds@gmail.com) - Corresponding author

Ruy K. P. Kikuchi (kikuchi@ufba.br)

ABSTRACT

O emprego de redes Bayesianas está progredindo rapidamente no campo das ciências ambientais graças à peculiaridades que tornam esta abordagem particularmente adequada para modelagem de problemas complexos e dominados pela incerteza. Para o caso específico dos recifes de corais, redes probabilísticas estão sendo utilizadas para integrar questões, conhecimento e componentes com variadas fontes e características, para gerar resultados passíveis de serem aproveitados na gestão ambiental. Diante da intrínseca vulnerabilidade destes ecossistemas aos impactos multifatoriais de origem antrópica, a definição de técnicas e metodologias alternativas torna-se imperativa, configurando-se como um dos grandes desafios da comunidade científica. Nesta revisão bibliográfica não sistemática descrevemos relevantes propriedades destes modelos probabilísticos, apresentando orientações essenciais para sua implementação segundo práticas aconselhadas para uma modelagem mais robusta e credível possível. Razões pelas quais a abordagem Bayesiana pode ser bastante conveniente para modelagem dos ambientes recifais e particularmente para o caso do branqueamento dos corais são apresentadas, e os aspectos mais relevantes de referências-chave são discutidos com maiores detalhes sob a perspectiva do cientista/modelador recifal. Por fim apresentamos um caso exemplo de formalização do modelo conceitual para previsão sazonal do branqueamento dos corais no oceano Atlântico, cujo objetivo primordial foi a elaboração de diretrizes para a construção uma ferramenta capaz de gerar avisos prévios sobre o estado do branqueamento dos corais com meses de antecedência. Sob o ponto de

vista evidenciado nesta pesquisa, a abordagem Bayesiana representa uma alternativa fundamental para auxiliar à gestão dos ecossistemas recifais e deve se estabelecer como uma técnica padrão de análise nos próximos anos. Familiarizar-se com características e procedimentos desta abordagem deve ser de grande valia para estudantes/pesquisadores e gestores empenhados em salvaguardar a viabilidade futura destes inestimáveis ecossistemas.

2.1 Introdução

Ao longo das últimas décadas um considerável esforço de pesquisa tem sido dedicado ao desenvolvimento de modelos sintéticos para auxiliar o processo de avaliação de incertezas inerentes aos sistemas naturais (Uusitalo, 2015). Em teoria, nas ciências ambientais os problemas típicos são complexos e multidisciplinares, cabendo a estes modelos artificiais a intrincada função de elaborar uma visão holística e concebível do sistema em foco e, desta maneira, ajudar a decifrar a dinâmica envolvida e possíveis respostas das variáveis analisadas (Neapolitan, 2004). Neste sentido, o desenvolvimento de modelos de Redes Bayesianas (RBs) vem sendo considerado como um dos campos mais promissores dentro da área da Inteligência Artificial aplicada, transcendendo suas aplicações nos campos ciências da computação e matemática para alcançar, gradativamente, mais oportunidades de aplicações em diversos segmentos das ciências ambientais (Uusitalo, 2007; Aguilera et al., 2011).

De maneira elementar, o objetivo primordial das RBs é produzir um agente capaz de realizar tarefas em um nível de performance maior do que a dos humanos, integrar diversas questões e investigar os resultados, além de reconhecer suas próprias limitações em termos de incertezas associadas (Charniak, 1991). Para as Ciências Ambientais isto alcança uma importância significativa, pois as habilidades de resolver e expressar as incertezas relacionadas aos sistemas naturais podem auxiliar especialistas e gestores a desenvolver um entendimento compartilhado do sistema, a partir de uma estrutura explícita de relações de causa e efeito combinado ao uso de probabilidades (Uusitalo et al., 2015). Portanto, modeladores ambientais enfrentam o desafio de sintetizar a melhor informação científica disponível, não apenas para observar e medir, mas também para auxiliar no processo de tomada de decisões. Isto significa que os modelos desenvolvidos para os sistemas reais devem, teoricamente, promover o aprendizado social para que os gestores possam sustentar uma decisão baseada em métodos científicos (Nyberg et al., 2006).

Nos ecossistemas de recifes de corais as inúmeras ameaças sem precedentes relacionadas às ações antrópicas exigem a definição de uma metodologia adequada para lidar com problemas multifatoriais (Ban et al., 2014). Nestes ecossistemas muitas relações entre estressores e impactos ainda são pobremente caracterizadas, especialmente quando considerada a interação dos seus efeitos combinados. Além disso, a disponibilidade de dados é bastante variável, sendo, frequentemente resultado da composição de situações de alta (i.e dados obtidos remotamente e/ou de modelagem numérica) e baixa disponibilidade de dados (i.e. dados ambientais obtidos *in situ*), caracterizando um cenário repleto de incertezas associadas não apenas acerca dos métodos e dados, mas também na própria conceituação do sistema (Uusitalo, 2007). Em meio a este cenário de desafios metodológicos, muitas vezes gestores dos ambientes recifais são convocados a agir prontamente mesmo na ausência de informação, o que ressalta a relevância do processo de modelagem como ferramenta de apoio à gestão ambiental. Neste sentido, os modelos probabilísticos mostram-se particularmente adequados tanto para avaliação de riscos com notável aptidão para desenvolvimento de sistemas de aviso prévio (e.g. Pearson et al., 2017; Lisboa et al., 2018), como para investigar a efetividade de alternativas de gestão através de sistemas de suporte a decisão (e.g. Nyberg et al., 2006; Uusitalo et al., 2015).

Em linhas gerais, a presente pesquisa se propôs a discorrer a respeito dos aspectos relacionados ao emprego de RBs para a modelagem dos ambientes recifais. Mais especificamente, voltamos nossa atenção para os detalhes envolvidos no uso desta ferramenta para a elucidação das causas e possíveis consequências do fenômeno de branqueamento dos corais. Para isso, foram selecionadas artigos científicos considerados como referências-chave ao empregarem de maneira inédita modelos de RBs como ferramenta para modelagem dos recifes de corais (i.e. Wooldridge and Done, 2004; Wooldridge et al., 2005). É significativo considerar que desde que inicialmente propostas estas ferramentas probabilísticas vem sendo progressivamente mais utilizadas até serem consideradas atualmente como um instrumento essencial na caixa de ferramentas dos modeladores ambientais (Uusitalo, 2007).

Antes de iniciarmos a discussão de como/porque o emprego de RBs pode ser proveitoso no auxílio à modelagem e gestão dos recifes de corais, vamos discorrer a respeito de temas que buscam responder as seguintes questões sobre estas redes probabilísticas:

- a. Como foram inicialmente concebidas; como são definidas; e em quais teorias elas se fundamentam?
- b. Quais os procedimentos envolvidos em sua construção e como estão sendo atualmente empregadas?
- c. Como as RBs podem viabilizar a gestão ambiental diante cenários complexos e incertos, como o caso dos recifes de corais?

Por fim apresentamos o estudo de caso de previsão de curto prazo do branqueamento dos corais, cujo objetivo elementar foi descrever os procedimentos e dados envolvidos para a formalização do modelo conceitual de rede bayesiana apto a ser adaptado para as diversas áreas recifais do oceano Atlântico

2.2 Sobre as Rbs

2.2.1 Origem das RBs

O termo “Redes bayesianas” foi concebido por Pearl (1986) que desenvolveu o algoritmo para calcular as probabilidades de alguns tipos particulares de redes probabilísticas. A história do seu desenvolvimento, entretanto, começa bem antes disso, com estudos relacionados ao intelecto, que tem sido assunto de pesquisa por mais de 2000 anos (Charniak, 1991). O formalismo básico para o cálculo das probabilidades foi desenvolvido por Bayes no século 17 (Bayes e Price, 1736). Desde então as ideias elementares da teoria de probabilidade têm sido utilizadas para uma grande variedade de problemas, apesar de apenas a partir da década de 1960 serem desenvolvidos os primeiros sistemas computacionais que tratavam a incerteza através da aplicação de uma forma viável em computador da teoria da probabilidade (Korb e Nicholson, 2003).

Durante a década de 1990, a elaboração de eficientes algoritmos para o cálculo de probabilidades de uma RB sem restrições estruturais, concomitante ao avanço gradativo do poder computacional dos sistemas artificiais, proporcionou uma considerável disseminação dessa abordagem, especialmente para áreas das ciências ambientais (Korb e Nicholson, 2003). Além disso, o desenvolvimento do primeiro software para modelagem usando RBs (Andersen et al., 1990), e a otimização de técnicas de aprendizado para induzir a estruturação dos modelos a partir de conjunto de dados também representaram fatores significativos para a difusão do emprego de RBs, ainda durante os anos 90 (Korb e Nicholson, 2003). Quase três décadas depois, o número de artigos científicos e aplicações propostas para as RBs cresceu exponencialmente. Portanto, apesar da teoria probabilística de Bayes ter sido desenvolvida a mais de dois séculos e os primeiros sistemas computacionais probabilísticos na década de 1960, apenas nas últimas décadas estas

áreas de pesquisa convergiram para desenvolver as RBs, que desde então estão sendo utilizadas para as mais diversas aplicações em várias áreas de interesse (ver subseção 2.3).

2.2.2 Definição das RBs

De maneira elementar, as RBs podem ser entendidas como diagramas de influência que organizam determinados fatores ou variáveis em uma estrutura direcionada, que, dadas as evidências disponíveis, calcula a probabilidade condicional de um evento segundo o teorema de Bayes (Pearl, 1988; Korb e Nicholson, 2003). Uma RB configura-se como um modelo estatístico multivariado fundamentado na causalidade e definido em termos de componentes qualitativo e quantitativo (Jensen e Nielsen, 2007). O componente qualitativo refere-se ao diagrama de influência orientado, onde cada vértice (ou nó) representa uma das variáveis do modelo. A presença de uma ligação entre duas variáveis (arco) indica a existência de dependência causal, ou o efeito agregado de associações mais complexas entre elas (Cheng, et al., 2002). O componente quantitativo, por outro lado, refere-se à distribuição de probabilidades condicionais que avalia o grau de dependência entre as variáveis (Korb e Nicholson, 2003). A propensão de uma variável assumir um valor particular é determinada pela força da dependência de ligação entre as variáveis conectadas pela estrutura do modelo. Esta estrutura, por sua vez, explora o fato de que a distribuição conjunta de probabilidades de uma coleção de variáveis pode ser decomposta em uma série de modelos condicionais (Neapolitan, 2004; Jensen e Nielsen, 2007). Ou seja, as RBs são capazes de se beneficiar da estrutura do grafo para reduzir o cálculo da probabilidade a uma série de cálculos locais, evitando, desta forma, calcular a função de distribuição conjunta global do modelo.

Portanto, as RBs oferecem uma alternativa probabilística para tratar de incertezas através de uma abordagem que envolve a teoria dos grafos, para o estabelecimento da estrutura do modelo pelas relações de causalidade, e a teoria de probabilidades para atribuição do níveis de confiabilidade (Cheng et al., 2002). Atualmente, estas teorias estão unidas por um robusto conjunto de regras, definições e teoremas (Pearl, 1986; Neapolitan, 2004).

A descrição dos processos analíticos envolvidos para se realizar o cálculo dos níveis de confiabilidade ou as inferências probabilísticas em modelos multivariados está além do escopo desta revisão. Entretanto, sabemos que estes cálculos são baseados na aplicação da teoria probabilística de Bayes dentro da estrutura de dependências (ou independências para efeito de cálculo) do domínio do modelo (Pearl, 1988).

A seguir mostraremos de maneira sucinta como o teorema de Bayes pode ser facilmente derivado dos axiomas da teoria da probabilidade.

A probabilidade condicional do evento “a” acontecer dado o evento “b” é igual a “x”, ou seja, $P(a|b) = x$. Por outro lado, a probabilidade do evento conjunto $a \wedge b$ é igual a “x” pode ser escrita por $P(a,b) = x$. Desta forma, a regra fundamental da probabilidade nos diz:

i. Regra fundamental: $P(a|b) = P(a,b)/P(b)$, ou $P(a|b)P(b) = P(a,b)$.

Ou seja, a probabilidade de “a” acontecer, dado “b”, é igual à probabilidade conjunta de “a \wedge b” dividido pela probabilidade de “b”.

ii. $P(a,b)=P(b,a)$, então de (i), chegamos em $P(a|b)P(b) = P(b|a)P(a)$, que resulta em:

$$P(a|b) = P(a,b)P(b)/P(a) \quad \text{- REGRA DE BAYES}$$

Ou seja, a probabilidade de “a” dado “b” é igual probabilidade de “a \wedge b” vezes a probabilidade de “b”, divida pela probabilidade de “a”.

Esta é a chamada “Regra de Bayes” que nas RBs explora propriedades das estruturas para reduzir o cálculo de probabilidades de sistemas multivariados causais para um volume concebível e tratável em ambiente de computador (Pearl, 1988; Korb e Nicholson, 2003).

De maneira elementar podemos dizer que utilizamos as propensões dos sistemas físicos em conjunto com métodos de inferência para calcular as probabilidades condicionais de um conjunto de entidades, dadas as evidências disponíveis. Em geral, tais evidências estão ausentes ou são incompletas e por isso utilizamos métodos de inferências para calcular as probabilidades em questão (Pearl, 1986). Assim como apresentado anteriormente, nas RBs a inferência ocorre pelo cálculo posterior da probabilidade a partir da propagação da evidência através da estrutura da rede segundo o teorema de Bayes (Cheng et al, 2002).

2.2.3 Esferas de ação beneficiadas pelo emprego das RBs

Características inerentes à teoria bayesiana, na qual as RB estão sustentadas, tornam o emprego destas redes bem adequado para modelagem de vários tipos de problemas nas mais diversas áreas de interesse. Grande parte das publicações científicas relacionadas ao emprego de RBs são oriundas dos campos da Matemática e da Ciência da Computação (Aguilera et al., 2011). Entretanto, durante as últimas décadas o número de publicações aumentou exponencialmente de poucas publicações por ano para mais de 200 periódicos em 2010, alcançando um notável número de aplicações em variados segmentos (Uusitalo, 2007; Aguilera et al., 2011). Entre as aplicações mais difundidas destacam-se as da área ciências da Saúde, geralmente relacionadas a pesquisas médicas (e.g. diagnósticos de doenças, epidemiologia - Maskery et al., 2008; Kahn et al., 1997), Engenharia, Sociologia e Educação, Robótica, pesquisa heurística, entre outras (Aguilera et al., 2011). No campo empresarial, a tecnologia de raciocínio probabilístico oferecida pelas RBs também é utilizada para aperfeiçoar os produtos já desenvolvidos segundo técnicas de sistemas baseados em conhecimento (Charniak, 1991).

No contexto das ciências ambientais, as RBs são atualmente consideradas como um recurso extremamente proveitoso não apenas graças a habilidade em lidar com incertezas inerentes aos sistemas naturais, mas também pela representação explícita de sistemas como uma rede causal de interações entre variáveis com atributos diversificados da causa primária ao resultado final. Estas características abrangem a utilização das RBs para inúmeras questões de interesse dos cientistas ambientais, assim como evidenciado pelo aumento exponencial ao longo das últimas décadas do número de publicações nas áreas de Ciência Ambiental e Ecologia (29% dos artigos), Recursos Hídricos (23% dos artigos), Agricultura (7% dos artigos) e Biologia Marinha e de água doce (7% dos artigos) (números relativos à revisão desenvolvida por Aguilera et al., 2011 para o período de 1990 a 2010). É significativo considerar que em diversos destes segmentos as RBs tem sido cada vez mais utilizadas como ferramenta de auxílio à gestão ambiental, em geral relacionada a sistemas de aviso prévio, de suporte a decisão, ou para testar a probabilidade de desfechos específicos (Nyberg et al., 2006).

2.3 Implementação dos modelos de RBs

Apesar da metodologia para o desenvolvimento de RBs ser relativamente flexível, nesta revisão daremos ênfase aos métodos entendidos como mais usuais em pesquisas dedicadas à modelagem ambiental, especialmente aos casos relacionados aos ecossistemas de recifes de corais. O processo de construção de RBs envolve diferentes etapas sequenciais que podem ser realizadas seguindo métodos distintos, mas que, teoricamente, devem seguir algumas orientações bem estabelecidas buscando fornecer um processo de modelagem mais transparente, robusto e

crédível possível (Chen and Pollino, 2012). Recomenda-se que as suposições, incertezas, descrições e raciocínios dos componentes e de suas ligações, fontes de dados e resultados da avaliação sejam minuciosamente documentados. Além disso, é interessante que o modelo seja mantido o mais simples possível, pois o aumento da complexidade pode reduzir a sensibilidade das respostas do modelo às variáveis mais significativas, assim como aumentar a incerteza, o erro e a variabilidade (Korb and Nicholson, 2003). Portanto, a parcimônia do modelo deve ser assumida como primordial e, em geral, pode ser obtida através da conservação do número de variáveis, assim como seus estados, camadas e ligações como o mínimo possível (Chen and Pollino, 2012). Exceções podem ocorrer para casos de avaliação de riscos, gestão de desastres ou a modelagem de processos ecológicos complexos onde a representação desta complexidade ou de estados menos prováveis seja mais importante que a acurácia e precisão do modelo (Marcot et al., 2006). Estas práticas devem ajudar a estabelecer um modelo honesto, bem sustentado e passível de ser facilmente alterado, reproduzido ou mesmo reconstruído (Refsgaard and Henriksen, 2004).

Assim como em qualquer exercício de modelagem, o ponto de partida deve ser a articulação precisa do escopo da aplicação do modelo em termos de definições: área geográfica; conjuntura de circunstâncias a serem contempladas (i.e dados de entrada do modelo); níveis de erros aceitáveis; e principalmente como os resultados do modelo podem ser interpretados cientificamente (Neapolitan, 2004). A definição das variáveis relevantes representa uma etapa crucial e, idealmente, deve considerar uma compilação do estado atual de conhecimento acerca das teorias, hipóteses, recursos e limitações sobre o sistema em questão. Isto pode ser facilmente viabilizado pela definição prévia de um modelo conceitual do sistema que, de maneira elementar, pode ser entendido como um protótipo simples e parcimonioso, mas mesmo assim, capaz de capturar os componentes relevantes e processos-chave para fornecer uma compreensão completa da base e das suposições do modelo (Aguilera, 2011; Chen and Pollino, 2012).

Após definidos estes precursores fundamentais, o desenvolvimento de RBs é desempenhado segundo alguns procedimentos-padrão que podem ser repetidos diversas vezes antes de assegurar confiabilidade e acurácia ao modelo (Bennett et al., 2013). De maneira sucinta, estes procedimentos podem ser sumarizados em quatro passos principais (para uma delineação mais detalhada ver Jakeman et al., 2006) a serem descritos a seguir.

2.3.1 Composição do banco de dados de entrada

No campo das ciências ambientais, geralmente a construção do banco de dados de entrada é realizada a partir do emprego variáveis referentes às datas e locais das observações sob a forma de instâncias. Depois de selecionadas e calculadas as variáveis ditas significativas, é preciso habilitar o conjunto de dados de entrada do modelo para que os algoritmos de aprendizado possam lidar com eles de maneira adequada. Apesar da habilidade de alguns modelos atuais em lidar com dados contínuos, na grande maioria dos casos o conjunto de dados deve ser submetido a um processo de discretização (Aguilera et al., 2011). Este processo consiste na transformação de valores contínuos em valores discretos (ou discretizados) a partir da aplicação de algoritmos específicos (e.g. equações determinísticas, minimização da entropia, discretização dinâmica [Dougherty et al., 1995; Kozlov and Koller, 1997; Christofides et al., 1999]). O resultado da discretização é obtido por uma aproximação do dado real em intervalos mutuamente exclusivos e exaustivos, o que implica, necessariamente, em perda de informação (Korb and Nicholson, 2003). Quanto maior a largura do intervalo de discretização, maior é o erro adicionado ao modelo (Pearl, 1986; Neapolitan, 2004). Além disso, intervalos muito grandes podem não ser capazes de capturar oscilações sutis, ao passo que intervalos muito pequenos são muitas vezes inviáveis

devido a falta de dados para estabelecer propriamente a distribuição de probabilidades para cada combinação (Renken and Mumby, 2009).

Apesar do processo de discretização ser considerado por muitos pesquisadores como uma relevante deficiência da modelagem bayesiana, existem atualmente uma série de alternativas para minimizar o erro associado (Uusitalo, 2007). O número de intervalos deve ser estabelecido como o mínimo necessário para descrever o estado atual de cada componente do modelo, o estado possível de acordo com mudanças no sistema, e, se necessário, estados intermediários (Cain, 2001). Entretanto, intervalos suficientes devem ser usados para assegurar precisão desejada das estimativas. É importante esclarecer que um aumento da precisão não é expresso necessariamente como um aumento na acurácia, visto que geralmente menos intervalos de discretização fornecem estimativas mais acuradas, enquanto mais intervalos podem fornecer maiores precisões (Charniak, 1991). Além disso, é possível auxiliar no processo de discretização a partir de inclusão de informações de outras pesquisas ou de especialistas para avaliar falhas e reduzir o erro associado ao processo automático de discretização, ou para incluir uma maior variedade de condições. Neste último caso, a inclusão de condições de rara ocorrência e/ou menos caracterizadas pode ser imprescindível para aumentar a aplicabilidade do modelo através da generalização para situações ou regiões não usuais (Marcot et al., 2006), o que pode ser bastante proficiente nas ciências ambientais, especialmente para os casos dos recifes de corais.

2.3.2 Estruturação da arquitetura do modelo

O balanço entre parcimônia e precisão deve ser levado em consideração desde as etapas iniciais e, principalmente, durante a definição da estrutura do modelo (Chen and Pollino, 2012). De maneira elementar o objetivo principal da estruturação é criar uma representação mais acurada e parcimoniosa possível que melhor simbolize o sistema real de interesse (Cheng et al., 2002). O processo de arquitetar o modelo a partir das relações existentes na base de dados de entrada (*data learning*) pode ser realizado pelo emprego de dois tipos principais de algoritmos. Os algoritmos baseados em restrições analisam as dependências condicionais encontradas entre cada par de variáveis, a partir do fluxo de informação dentro do conjunto de variáveis do modelo (Chen and Pollino, 2012). Um segundo tipo de algoritmo, denominado algoritmo de busca e pontuação, procura heurísticamente dentro do conjunto de dados de entrada uma estrutura do modelo que maximize a função de entropia escolhida (Charniak, 1991; Heckerman et al., 1995).

Outro procedimento padrão refere-se a utilização de conhecimento de domínio do especialista, seja através da edição direta da estrutura de rede (remoção ou inclusão de nós e/ou arcos), ou da incorporação de hipóteses e teorias através de condicionantes (Korb and Nicholon, 2003). Apesar de ser possível construir toda a estrutura das RBs tanto a partir do *data learning* como a partir apenas do conhecimento de domínio do usuário especialista, é pertinente ponderar que para a maioria dos casos das ciências ambientais as aplicações são mais significativas ao se beneficiarem de uma combinação destes dois procedimentos, sem que haja necessariamente uma ordem pré-definida (Marcot et al., 2006). Ou seja, para a estruturação da RB pode-se partir de um modelo inicial teórico, com posterior combinação com os dados para encontrar a estrutura mais provável para o modelo, ou pode-se adotar um procedimento inicial de *data learning* com subsequente incorporação do conhecimento do especialista para refinar a estrutura do modelo e aprimorar o domínio de aplicação.

À este ponto é pertinente ponderar que a variabilidade e o excesso de incertezas inerentes à modelagem ambiental muitas vezes inviabilizam a construção de RBs baseando-se apenas nos bancos de dados disponíveis (Sperotto et al., 2017). Geralmente existe uma quantidade

considerável de conhecimento, teorias e hipóteses acerca do sistema a ser modelado, que ao serem agregados aos procedimentos de *data learning* geralmente resultam em modelos mais significativos e acurados (Bennet et al., 2013). Qualquer um destes métodos de estruturação do modelo é considerado apropriado, desde que a incerteza associada seja quantificada na distribuição de probabilidades condicionais (Korb e Nicholson, 2003). A inclusão de informações de domínio do especialista pode aprimorar os resultados do modelo, entretanto, uma ordenação incorreta pode acrescentar incoerências durante o processo de aprendizagem da estrutura, comprometendo, desta forma, todas as etapas subsequentes (Cheng et al., 2002).

Para as ciências ambientais o emprego de opiniões de gestores e especialistas durante o processo de modelagem de sistemas naturais pode ser de crucial relevância não apenas para avaliar a consistência da arquitetura do modelo diante das hipóteses e teorias estabelecidas, como também para direcionar o modelo para os objetos de maior interesse (Cain, 2001). A representação gráfica oferecida pelas RBs além de facilitar a concepção do sistema através da visualização explícita das variáveis e de suas relações, também permite que os gestores ambientais e especialistas, via procedimento de modelagem participatória, possam facilmente modificar o modelo ao adicionar ou remover variáveis e ligações diretamente no gráfico, ou através da inserção de condicionantes (Uusitalo et al., 2015). Além disso, o envolvimento ativo em diferentes procedimentos durante a modelagem via processos participatórios auxilia as autoridades, gestores e as partes interessadas a entender com maior propriedade os possíveis desfechos das alternativas de gestão analisadas.

2.3.3 Cálculo das probabilidades condicionais

O próximo passo para o desenvolvimento das RBs refere-se à determinação da distribuição de probabilidades que, de maneira elementar, simbolizam a propensão de uma variável assumir um estado particular, dados os estados das outras variáveis (Charniak, 1991). Estas probabilidades podem ser ditas marginais, para variáveis que não tem nós pais (variáveis raiz), ou condicionais, para os outros componentes (variáveis folha que não possuem nós filhos, ou intermediárias), e são calculadas para cada combinação de estados de todos os componentes do modelo (Chen and Pollino, 2012). As probabilidades podem ser determinadas de acordo com as frequências conhecidas dos vários estados, baseando-se em uma distribuição estatística, ou para o caso de completa incerteza como uma distribuição uniforme (Korb and Nicholson, 2003). Existem diferentes algoritmos utilizados para calcular a distribuição de probabilidades (e.g. algoritmo da árvore de junção [Lauritzen e Spiegelhalter, 1988]; algoritmo de fusão [Pearl, 1988]; algoritmo de maximização de expectativa [Lauritzen, 1995]), entretanto, a ideia central comum entre eles é explorar a estrutura da rede para reduzir os cálculos de probabilidades a uma série de cálculos locais (Lauritzen e Spiegelhalter, 1988). Para a maioria dos casos nas ciências ambientais a escolha do algoritmo de Lauritzen (1995) ocorre diante da sua inerente habilidade de se beneficiar da informação parcial contida em banco de dados com valores ausentes.

2.3.4 Análise de sensibilidade e validação do modelo

Os últimos passos para construção de modelos de RBs consistem em procedimentos de testes, validação do modelo e análises de sensibilidade das variáveis. Apesar da significativa importância para verificar a presença de inconsistências e reduzir o viés, estes procedimentos ainda não são propriamente desempenhados em uma considerável parcela de pesquisas que utilizam modelos de RBs (Aguilera et al., 2011). Recomenda-se, especialmente no âmbito das ciências ambientais, que os modeladores escolham, entre os diversos disponíveis, o método mais

adequado aos seus objetivos a fim de conferir credibilidade e transparência ao processo de modelagem (Marcot et al., 2006). Modelos construídos a partir do conhecimento de especialistas com fins de inferência que não são testados e validados oferecem pouca garantia de confiabilidade e acurácia (Bennet et al., 2013). Para os modelos construídos diretamente a partir dos dados, procedimentos de validação também podem ser empregados como critério de seleção entre modelos concorrentes (Neapolitan, 2004). Portanto, testar, avaliar e validar os modelos representam passos essenciais para endossar a correta concepção dos componentes quantitativos e qualitativos evitando de maneira criteriosa modelos potencialmente espúrios ou não confiáveis.

Em geral os procedimentos de validação podem ser classificados em dois tipos principais: validação baseada em dados e avaliação qualitativa (Pollino and Henderson, 2010). Para validação baseada em dados, deve-se isolar a base de dados usada para ensinar o modelo da base de dados utilizada para a validação. Na validação cruzada uma pequena e aleatória parte das amostras é selecionada para validação (cerca de 20%), enquanto o restante é utilizado no aprendizado do modelo. O procedimento é repetido para amostras diferentes, com o erro final resultando de uma média das taxas de erro encontradas. Para bases de dados mais restritas, é comum a validação “*Leave One Out*”, onde é necessário excluir, sistematicamente, cada uma das observações (um por vez, de maneira independente) antes do aprendizado das probabilidades. A RB ensinada a partir de cada novo conjunto de dados é então utilizada para inferir sobre a observação excluída. As taxas de erro são computadas em termos de inferências incorretas, considerando o estado mais provável como uma previsão. Nos dois casos pretende-se isolar os dados usados para o aprendizado dos usados na validação, evitando, portanto, o chamado “*overfitting*”, que reconhecidamente introduz uma tendência de superestimar o poder de inferência avaliado (Bennet et al., 2013). Nesta altura é pertinente ponderar que a separação dos dados deve ocorrer apenas para efeito de validação, sendo o modelo final o mais acurado possível, resultando idealmente da incorporação do máximo de informação disponível (Aguilera et al., 2011).

Um outro relevante recurso tipicamente empregado para avaliar o nível de performance ou visualizar o comportamento de indicadores de erros é a matriz de confusão. Esta matriz quadrada, onde as linhas representam a classe real das instâncias e as colunas suas classes previstas, sumariza toda a informação bruta sobre as previsões realizadas em termos de falsos e verdadeiros positivos e negativos (Chen and Pollino, 2012). Este artifício pode ser bastante proficiente para demonstrar não apenas os onde o modelo está acertando ou errando em suas previsões, mas também os tipos de erros cometidos. Outros indicadores de performance também podem ser facilmente obtidos a partir dessa matriz, e.g. precisão (taxa de verdadeiro positivo dividido pelo número de previsões positivas), *F-score* (média ponderada entre a taxa de verdadeiro positivo e precisão), prevalência (número de instâncias verdadeiras em relação ao total de instâncias) entre outras (Pearl, 1988). Além disso, é significativo ponderar acerca do emprego da curva ROC (do inglês *Receiver Operating Characteristic*) como uma eficiente ferramenta para descartar modelos abaixo de um limiar de performance e para selecionar de maneira apropriada um modelo ótimo (Jiménez-Valverde, 2012). De maneira sucinta, este gráfico pode ser gerado a partir do plote das funções de distribuição cumulativa das taxas de verdadeiro positivo contra a de falso positivo, cuja a área sob a curva oferece uma medida de nível de performance do modelo.

Para os casos onde a validação baseada em dados não é viável, recomenda-se uma avaliação qualitativa do modelo segundo apreciação do especialista e/ou comparações com resultados de outros modelos ou com dados da literatura (Chen and Pollino, 2012). Além disso, é

frequente o emprego de funções de pontuação para avaliação do nível de acurácia das RBs e como medidas de calibração de um conjunto de previsões, tais como: perda logarítmica, retorno esférico e pontuação de Brier (para detalhes ver Bickel, 2007). Essas funções consideram os níveis reais de crença (i.e. quanto maior a probabilidade indicada, mais forte é a crença naquele prognóstico) para determinar o quão bem as previsões correspondem aos casos reais.

Em relação à análise de sensibilidade, é relevante considerar que este processo pode ser realizado de diferentes maneiras, mas basicamente, consiste na avaliação de como o objeto de consulta da rede pode ser influenciado por observações de cada uma das variáveis que compõe o modelo (Norton, 2015). Diferentes tipos de medida podem ser utilizadas de acordo com o objetivo da avaliação (e.g. entropia, redução da variância, medidas de informação mútua) (Pearl, 1988). Estas informações podem ser muito significativas tanto para definir com maior precisão quais aspectos possuem maior relevância sobre as entidades de consulta, como também para verificar e corrigir a estrutura e a parametrização do modelo (Norton, 2015).

2.3.5 Softwares utilizados nas ciências ambientais

Atualmente existem diversos programas computacionais dedicados ao desenvolvimento de RBs com nível relativamente avançado e com interface gráfica de simples utilização. Isto também representa uma característica vantajosa das RBs quando comparadas com os modelos numéricos, pois não é preciso ser um programador avançado, nem contar com supercomputadores para ser capaz de desenvolver modelos probabilísticos significativos e úteis. Atualmente os diversos pacotes de softwares disponíveis contam com atributos distintos, de maneira que a seleção do mais adequado deve levar em consideração suas características sob o ponto de vista do propósito do modelo (Norton, 2015). Além disso, a metodologia de elaboração das RBs ainda está em processo de evolução e nem todos os algoritmos até o momento desenvolvidos são disponibilizados por todos os softwares (Uusitalo, 2007). No contexto das ciências ambientais dois softwares merecem destaque pelo seu alto grau de aplicabilidade: Hugin (disponível em <http://www.hugin.com/>) e Netica (disponível em <http://www.norsys.com/>); softwares de licença comercial, mas que também disponibilizam uma versão gratuita com alguns atributos limitados (e.g. número de variáveis e de casos no banco de entrada). Para ambos os softwares é possível o desenvolvimento de diagramas de influência (uso de variáveis de decisão e utilidade), com os dados de entrada obrigatoriamente discretizados, e com a possibilidade do emprego de algoritmos iterativos (e.g. maximização da expectativa (Laurizen (1995), ou gradiente descendente (Korb e Nicholson, 2003)) como alternativas ao algoritmo mais simples denominado *counting-learning* (Russell e Norvig, 1995). Uma diferença crucial entre eles refere-se a inabilidade do *Netica* em arquitetar a estrutura do modelo segundo a aprendizagem a partir dos dados, ao passo que no *Hugin* esta estruturação pode ser realizada no próprio ambiente do software, a partir de algoritmos baseados em condicionantes, ou aprendizado supervisionado (Uusitalo, 2007). Outras alternativas de *softwares* concebidas em institutos de pesquisa com propósito sinalizado para o âmbito científico referem-se ao SamIam (disponível em <http://reasoning.cs.ucla.edu/samiam/>), B-Course (<http://b-course.hiit.fi/>), GeNIe (<http://genie.sis.pitt.edu/>), e Bayesware Discoverer (<http://www.bayesware.com/>).

2.4 Porque as Rbs representam uma alternativa viável para a modelagem recifal e particularmente adequada para o caso do branqueamento dos corais

Os corais estabelecem-se em ambientes onde as oscilações diurnas, sazonais, ou ao longo do tempo geológico são relativamente pequenas, caracterizando um cenário de grande estabilidade climática como berço para as maiores e mais importantes construções biológicas do planeta, os recifes de corais (Muscantine, 1990). Muita atenção tem sido dedicada à estes ecossistemas não apenas por eles proverem bilhões de dólares em valor econômico através de serviços para milhões de pessoas que dependem desses ecossistemas como fonte de renda, alimentação e proteção da linha de costa, mas principalmente diante da sua intrínseca vulnerabilidade aos processos marinhos vinculados ao aumento na concentração de CO₂ antropogênico na atmosfera: elevação do nível e da temperatura do mar, acidificação, estratificação e hipóxia (Marshall e Schuttenberg, 2006; Norris et. al, 2013). Superimpostos a estes, os fatores locais como pesca destrutiva, poluição, escoamento terrestre, todos associados diretamente com a proximidade de atividades humanas (Ban et al., 2014), intensificam os impactos e, sob o ponto de vista dos pesquisadores, aumentam a complexidade e amplitude das circunstâncias estressoras. De fato, não existe uma conjuntura de circunstâncias desfavoráveis que possa ser generalizada para todos os recifes de corais, mas sim uma combinação de diferentes fatores atuando em escalas variadas que assumem graus de dominância em áreas e períodos distintos.

Muitos efeitos deletérios são atualmente observados frente aos impactos multifatoriais de origem antrópica, entretanto, a resposta negativa mais proeminente dos corais, atualmente definida como a principal causa de mortalidade em massa, refere-se ao branqueamento dos corais (Hughes et al., 2018). Este processo, definido como o término da relação de simbiose entre o coral e os dinoflagelados endossimbiontes, é primordialmente causado por anomalias térmicas da água do mar acima do limiar dos corais (i.e. temperatura de fronteira) (Hoegh-Guldberg, 1999). Entretanto, diversos outros fatores físico-químicos que influenciam na vulnerabilidade ao branqueamento, (e.g. radiação, salinidade, correntes, turbidez, batimetria, exposição aérea, qualidade da água e doenças) adicionam níveis de complexidade acerca das reais circunstâncias desencadeadoras em cada caso específico (Brown, 1997; Marshall e Schuttenberg, 2006; Vega Thurber et al., 2014). Além disso, processos ecológicos como aclimatação, adaptação, diferentes níveis de densidade e susceptibilidade das espécies de corais e simbiontes podem interagir com os fatores ambientais para mediar padrões de branqueamento altamente complexos e variados (Hughes et al., 2018). Por exemplo, em uma única observação recifal a severidade de branqueamento pode variar entre os pólipos de uma mesma colônia (e.g. exposição à luz diferenciada ([Brown et al., 1994; Hoegh-Guldberg, 1999]; distintas susceptibilidades das espécies de zooxantelas [Baker, 1994]), entre colônias de uma mesma bioregião (e.g. corais ramificados são mais susceptíveis ao branqueamento [Wooldridge et al., 2005]; diferentes índices de aclimatação entre as colônias [Brown, 1997]) ou entre áreas do mesmo recife (e.g. assembléia de espécies distintas; setores com seções recifais mais profundas ou sob influência de padrões de fluxo de pequena escala de resfriamento são geralmente caracterizados como refúgios locais [Marshall e Schuttenberg, 2006; Feary et al., 2012]).

Além disso, a compreensão atual indica que o branqueamento é um processo diacrônico, apresentando uma alta variabilidade não apenas nas diferentes escalas espaciais, mas também ao longo do tempo, mesmo entre recifes próximos (Hughes et al., 2018). Outro fator agravante ao analisarmos toda a complexidade envolvida nestes fenômenos refere-se aos efeitos do branqueamento agirem sinergicamente com outros fatores deletérios como a acidificação ou doenças para afetar negativamente processos fisiológicos dos corais (e.g. reprodução, crescimento, assentamento e desenvolvimento larval, etc).

Sob o ponto de vista do modelador ambiental, toda essa complexidade vinculada ao processo de branqueamento se manifesta sob a forma de incertezas, tornando sua modelagem uma tarefa extremamente desafiante sob o ponto de vista metodológico. A incerteza do modelo representa essencialmente a ausência de conhecimento por dois motivos principais: por ignorância teórica, quando não se possui o conhecimento de todo o domínio do problema; ou por inviabilidade de formulação de uma base de entendimento onde possam ser realizadas inferências acerca do sistema em foco. Estas duas fontes de incertezas decorrem de um conhecimento imperfeito. Fontes significativas de incertezas para ciências ambientais também estão associadas à aleatoriedade e variabilidade dos sistemas naturais, o que pode ser quantificado e contornado pelo emprego de modelos probabilísticos (Uusitalo et al., 2015). Além disso, os erros de medição e sistemáticos conduzem à incertezas em relação aos valores medidos e ao processo de amostragem, e podem ser estimados por métodos estatísticos, evitando causar efeitos acumulativos (Uusitalo et al., 2015). Para o caso específico do branqueamento dos corais as incertezas decorrem da combinação destes motivos, pois além de ser um fenômeno extremamente variável, e do estado atual de conhecimento ainda estar longe de ser capaz de explicar a variação encontrada em campo, o processo de coleta de dados submarinos é, em geral, muito oneroso, com baixa representatividade ao longo do tempo/espaço.

Portanto, diante das inúmeras fontes de complexidades (ou incertezas), vinculadas à suas causas e efeitos, o branqueamento pode ser definido como um processo intrinsecamente repleto de incertezas. Somado a isso, para cada observação de branqueamento realizada, os diversos fatores envolvidos podem assumir diferentes níveis de importância, o que reforça o emprego de modelos multivariados baseados no histórico do fenômeno em detrimento dos modelos determinísticos convencionais. Nesse sentido a abordagem Bayesiana mostra-se particularmente apropriada para modelagem do branqueamento ao oferecer uma alternativa capaz de organizar hierarquicamente variadas entidades baseando-se nas relações históricas para definir os níveis de influência sobre o objeto de consulta. Essa representação probabilística baseia-se nas relações existentes entre os componentes do modelo para expressar incertezas sob a forma de distribuição de probabilidades que, quando comparadas aos modelos que levam em consideração apenas valores médios, podem ser estimadas de maneira consideravelmente mais acurada (Uusitalo, 2007).

Dessa forma, no âmbito das ciências ambientais, as RBs podem ser utilizadas como ferramentas para suporte de decisão que além de proporcionar uma concepção acessível do problema em questão, permitem também uma combinação das observações disponíveis com os níveis de incerteza, para gerar uma avaliação formal dos possíveis resultados diante de alternativas de gestão específicas (Wooldridge et al. 2005). Cada alternativa de gestão tem ganhos e perdas associados que devem ser avaliados durante a tomada de decisão levando em consideração, idealmente, as incertezas presentes em cada etapa da análise da gestão ambiental, desde a aleatoriedade na resposta ambiental até a definição de risco (Uusitalo, 2007). Para o caso dos recifes de corais, a análise de riscos proporcionada por modelos probabilísticos representa uma oportunidade de avaliar como hipóteses específicas podem controlar a probabilidade de condições ou eventos adversos. Pode-se investigar, por exemplo, como estratégias específicas de gestão (seja em escala global ou regional/local), ou taxas de adaptação/aclimação modulam as respostas dos corais, levando em conta uma relevante parcela da complexidade e incertezas vinculados a estes processos.

Outra interessante característica das RBs refere-se a habilidade destes modelos em lidar com dados com variados atributos e origens, sendo possível integrar múltiplas questões e

componentes do sistema, utilizar variados tipos de conhecimento e lidar com incerteza e a falta de dados. Além disso, as RBs oferecem uma conceitualização do sistema através de uma representação gráfica relativamente simples, o que as torna uma ferramenta extremamente fácil de entender e utilizar (Charniak, 1991). Isto também possibilita que esta abordagem se beneficie pelo emprego de componentes interdisciplinares e de processos participatórios durante a construção do modelo. Em ecossistemas altamente peculiares, como no caso dos recifes de corais, o conhecimento de domínio do especialista e dos gestores ambientais pode ser extremamente proficiente para direcionar a aplicação do modelo, para refinar sua estrutura ou suas probabilidades condicionais (e.g. supervised learning [Uusitalo et al., 2015]).

Sendo assim, não é preciso ser um modelador avançado para entender e utilizar as relações expressadas graficamente na estrutura da rede de variadas maneiras. Estes modelos também contam com a possibilidade de serem continuamente refinados ao longo do tempo. Isto significa que os modelos podem ser desenvolvidos como hipóteses passíveis de serem testadas avaliadas e aprimoradas a medida que novas informações se disponibilizam. Modelos atualizados podem ser empregados para avaliar novas opções de gestão ambiental, melhorar estimativas de incertezas-chave e/ou reorientar projetos de monitoramento (Nyberg et al., 2006).

2.5 Referências-chave para modelagem do branqueamento dos corais

Esta seção é dedicada à apresentação das pesquisas consideradas referências-chave por terem proposto de maneira inédita o emprego de RBs como ferramenta para a modelagem do fenômeno de branqueamento dos corais (i.e. Wooldridge e Done, 2004; Wooldridge et al., 2005). Os aspectos relevantes relacionados aos procedimentos e resultados alcançados nestas pesquisas são destacados aqui sob o ponto de vista do pesquisador/modelador dedicado aos recifes de corais. Um fato que todo modelador deve conhecer bem é que pequenas mudanças nas condições iniciais podem levar a resultados completamente distintos. Neste sentido, os procedimentos e aspectos relacionados à estas pesquisas, por não apresentarem precedentes em termos metodológicos, podem ser entendidos como paradigmas inaugurais que serviram (e ainda servem) como diretrizes para o emprego e êxito das RBs para a modelagem de diversos processos do ambiente recifal.

Em Wooldridge et al. (2004), o emprego de RB teve como objetivo elementar o desenvolvimento de uma ferramenta para auxiliar no processo de identificação de recifes na Grande Barreira de Recifes corais da Austrália (GBR), cuja inclusão em áreas de reservas ambientais ajudaria a diminuir os impactos do branqueamento. Esta pesquisa surgiu diante dos expressivos episódios deste fenômeno ocorridos nos anos de 1998 e 2002, com um valoroso desafio metodológico/científico de responder as seguintes perguntas: o que pôde ser aprendido com os dois eventos mais severos até então reportados para esta icônica área recifal? E como o processo de aprendizado pode ser usado para minimizar impactos futuros?

Os autores utilizaram a estrutura de RB (Figura 1a) para aprimorar o conhecimento atual e investigar relações de causa e efeito entre uma série de proxies ambientais relacionados à atributos ecológicos, geográficos e físicos de sítios recifais para os quais dados de campo de branqueamento e tipo de comunidade haviam sido coletados no verão austral de 2002 (150 sites distribuídos ao longo de 32 recifes). Para a caracterização do ambiente termal, dois indicadores foram propostos: “cost100” e o “max3day”. A distância da isóbata de 100 metros (“cost100”) foi utilizada como proxy indicador de facilidade de resfriamento do recife a partir do transporte de águas oceânicas mais frias, enquanto o indicador termal (max3day) representa a soma máxima em um período de três dias consecutivos da temperatura da superfície do mar (detalhes em

Belkermans et al., 2004). Além disso, dados de formato dos recifes, orientação e batimetria organizados dentro de um sistema de informações geográficas (Lewis, 2001; Kininmonth et al. 2003) foram utilizados para classificar a área de estudo em tipos de habitats.

Para a determinação da estrutura da rede foram utilizados o algoritmo de análise de dependência de Cheng et al. (2002) em conjunto com a inclusão de conhecimento de domínio do especialista sob a forma de condicionantes. A análise da estrutura da rede (Figura 1a) deixa claro que o branqueamento (bleach node) é condicionalmente dependente apenas da variável termal (max3day node), enquanto a mortalidade (dead node) tem conexões diretas de dependência condicional com as variáveis relativas ao branqueamento, ao ambiente termal e ao tipo de comunidade (community node). Isto sugere que o conhecimento sobre o tipo de comunidade e gravidade do estresse térmico são necessários para quantificar a progressão do branqueamento para a mortalidade. Os indicadores relativos ao tipo de habitat (habitat node) e distância da isóbata de 100 metros (cost100 node) influenciam apenas indiretamente nas respostas dos corais através da propagação de suas evidências pela estrutura da rede.

A capacidade preditiva da RB foi avaliada a partir de taxas de acertos em relação dados da variável “mortality” (se alto, médio ou baixo), que alcançou uma porcentagem de 71% dos casos (106 dos 150 sites investigados). As análises desenvolvidas evidenciaram que a capacidade de previsão da mortalidade foi acrescida a partir da informação combinada quando em comparação com a informação térmica apenas. Isto ficou ainda mais evidente no teste realizado a partir da ausência de informação do tipo de comunidade (i.e. perda adicional de 10% de capacidade preditiva). Testes de aplicabilidade também foram propostos, como por exemplo, o emprego de Rbs alternativas para aprender a relação empírica do indicador térmico em diferentes escalas (1 e 50 km), buscando uma extrapolação da previsão para áreas com carência de dados de escala mais refinada. Os resultados mostraram esta abordagem pode ser útil (perda de apenas 12 % no nível de acurácia), especialmente para identificar os sítios com média e alta mortalidade.

Portanto, diante de um conjunto eclético de variáveis e de relações entre elas ainda não muito bem determinadas, a abordagem Bayesiana mostrou-se bem adequada para avaliar como a informação combinada destes proxies pode ser útil para previsão de vulnerabilidade ao branqueamento e mortalidade dos corais. Desta maneira, o processo de estabelecimento de áreas prioritárias para conservação ambiental pode ser beneficiado pelos resultados obtidos, ao basear-se na informação de onde os corais teriam mais chance de sobreviver através de possíveis ações aliviadoras e mitigadoras.

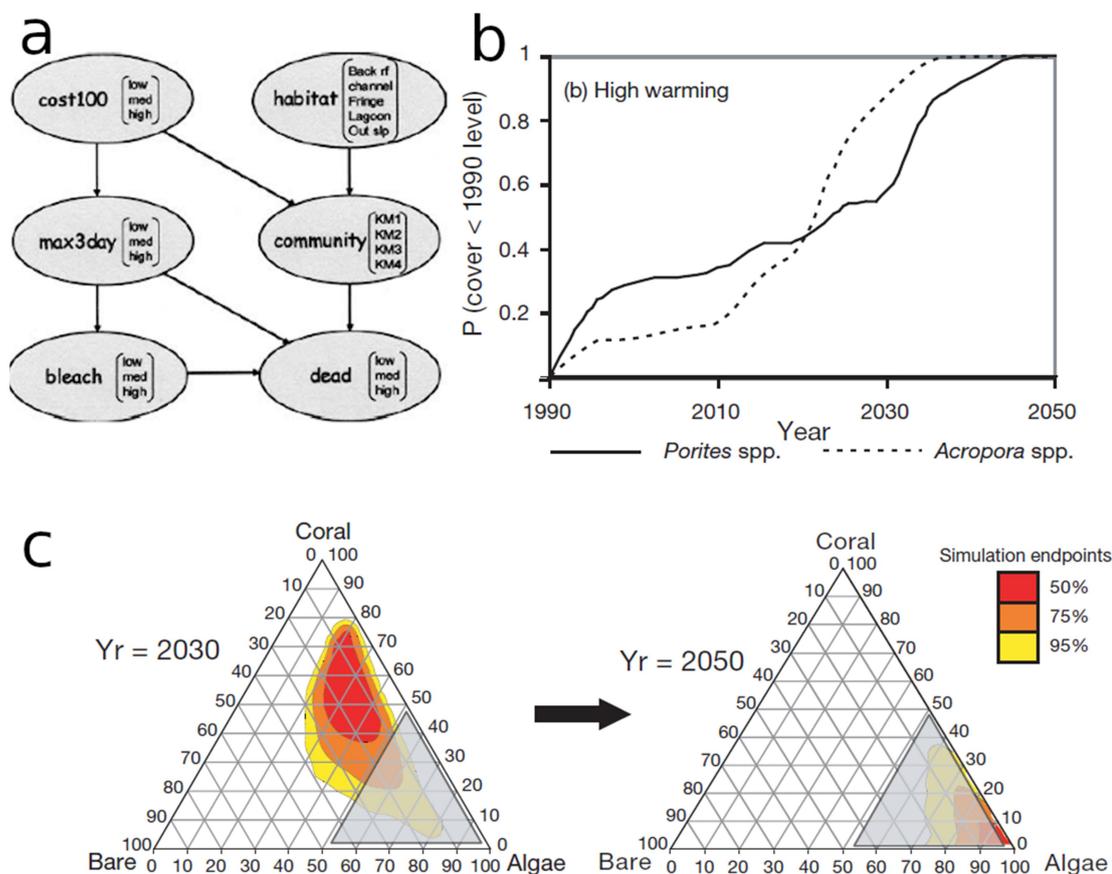


Figura 1 - (a) RB formada por variáveis que descrevem o ambiente termal e características ecológicas e físicas dos recifes. Os resultados são fornecidos em termos de probabilidades das respostas dos corais (variáveis branqueamento e mortalidade) estarem em um estado em particular (i.e low, med or high). Fonte Wooldridge e Done, 2004. (b) Evolução da probabilidade da cobertura de *Acropora ssp.* e *Porites sp.* serem menores do que os níveis de 1990 segundo o cenário de high warm (2 to 2.5°C até 2050). Fonte: modificado de Wooldridge et al. (2005). (c) Exemplo de simulação da ferramenta “Reef state”, mostrando a progressão temporal em relação à cobertura recifal (eixo ternário coral-alga-substrato livre) para o período entre 2030 e 2050. Fonte: modificado de Wooldridge et al. (2005)

Esta hipótese de que as alternativas de gestão podem amenizar os efeitos deletérios nos recifes de corais, ou pelo menos atrasá-los, foi investigada mais a fundo em um estudo de caso realizado em uma área antropizada na porção central da GBR (Wooldridge et al., 2005), através da ferramenta de suporte à gestão denominada de “ReefState”. Nesta pesquisa, também considerada uma referência-chave, RBs relacionadas as taxas de mortalidade e recuperação dos corais são utilizadas para calcular a propensão de alterações na abundância relativa entre corais e macroalgas até 2050 (Figura 1c). Diversas simulações foram realizadas a partir da combinação de dois cenários de aquecimento global divulgados pelo IPCC (2001; “low warming” - 1 to 1.5°C by 2050 - e “high warming” - 2 to 2.5°C by 2050), com três contextos de restrição das algas; e considerando, além do limiar térmico atual, um aumento de 0.1°C/década na tolerância termal

dos corais (exmplo na Figura 1b). Para isso, alguns pressupostos plausíveis e bem fundamentados na literatura foram adotados (e.g. composição simplificada de estrutura da comunidade; corais ramificados são mais susceptíveis ao aquecimento; os corais são competidores superiores às macroalgas na disputa pelo substrato disponível). Além disso, convencionou-se que a intensidade dos eventos de branqueamento e mortalidade associada são funções do número de dias em que a TSM ultrapassou a fronteira estabelecida por Berkelmans et al. (2002) para esta região.

Através deste sistema de apoio à gestão composto por RBs, os autores foram capazes de incorporar variados pressupostos e ideias para testar a probabilidade de ocorrência de possíveis desfechos específicos (i.e. zonas de interesse no espaço ternário de coral-alga-substrato nu, relativos à dominância dos corais, dominância das algas, e recife desprovido de cobertura; Figura 1c). Neste sistema o branqueamento não é componente final do modelo, e sim um componente intermediário, que influencia a cobertura de corais por ser o fator causador da morte de acordo com ondas de calor no verão, que, por sua vez, são função dos cenários de aquecimento testados. Dessa maneira, o objetivo principal da modelagem foi investigar precursores para a manutenção a longo prazo da dominância dos corais nos recifes, buscando identificar como os esforços de gestão dos recifes podem ser proficientes em auxiliar a resiliência da cobertura de corais.

Em geral, concluiu-se que existe uma tendência de aumento na probabilidade dos recifes perderem grande parte da cobertura de corais nas próximas décadas (i.e. apesar do decréscimo da certeza com o tempo, estas probabilidades inevitavelmente alcançam 100% em quase todas as simulações realizadas). Estes resultados, assim como apontado em pesquisas anteriores (e.g. Hoegh-Guldberg, 1999; Sheppard, 2003), indicam que mesmo nos cenários mais otimistas de aquecimento global (low warning) os recifes de corais devem sofrer um declínio sem precedentes diante de episódios de branqueamento cada vez mais intensos e frequentes, relacionados ao aquecimento global.

Um achado interessante refere-se a uma provável mudança no gênero de coral dominante na área de estudo como resposta às respectivas diferenças de susceptibilidade térmica e trajetórias de recuperação pós-branqueamento (Figure 1b). Durante a primeira metade do período simulado (1990-2020), fase caracterizada por eventos de branqueamento de baixa intensidade e intervalos de recorrência mais longos, as estratégias de sobrevivência de *Acropora* spp. (sensível ao calor) são mais eficientes graças as rápidas taxas de recuperação após eventos com baixos níveis de mortalidade. À medida que a probabilidade de eventos de branqueamento mais severos e duradouros aumenta, e o intervalo de recorrência entre eles diminui (i.e. a média reduzida para 2 – 3 anos), a estratégia de sobrevivência da *Porites* spp. (tolerante ao calor e lenta recuperação) mostra-se superior. É significativo considerar que o ponto de transição entre estes dois cenários, segundo análise das simulações, deveria estar acontecendo nos dias atuais (i.e. por volta do ano de 2020), sendo, portanto, passível de ser verificado através de observações de campo. Entretanto, um aspecto significativo que não foi contemplado pela modelagem e provavelmente deve estar interferindo nesta transição refere-se ao evento global de branqueamento multianual ocorrido entre os anos de 2014 e 2017.

A análise das trajetórias dos outros cenários simulados sugere que o processo de perda de cobertura de corais, apesar de mostrar-se inevitável a longo prazo, pode ser protelado por pelos menos duas décadas, mas depende fortemente da capacidade de aclimação dos corais e dos níveis de restrição das macroalgas (e.g controle da qualidade da água e aumento dos níveis de herbivoria). Desta forma, os autores concluem que um alto nível de restrição das macroalgas constitui a meta de gestão capaz de maximizar as taxas de sobrevivência e as oportunidades de

recrutamento dos corais, representando, um potencial fator de importância crítica em conferir o tempo hábil de que recifes precisam.

Quase uma década depois, essa conclusão de que é possível amenizar localmente os impactos associados às mudanças climáticas não representa o senso comum entre os especialistas dedicados aos recifes de corais (Ban et al., 2014). Nesta pesquisa, um processo formal de elicitación por especialistas foi utilizado para avaliar a eficácia das alternativas de gestão. Para isso, diversas variáveis ambientais (e.g. indicadores térmicos, nível de radiação, indicadores do El Niño, salinidade, qualidade da água) foram utilizados como possíveis fatores de influência sobre a cobertura de corais e indicadores da saúde dos recifes (e.g. surtos da estrela do mar conhecida como “Coroa de espinhos”, nível de branqueamento, presença de doenças). As atividades passíveis de serem alteradas pela gestão ambiental em escala local foram contemplados por variáveis relativas à pressão de pesca, sedimentação, poluição e entrada de nutrientes. Em resumo, os resultados encontrados revelam que para a área investigada os fatores impactantes amenizáveis pela gestão ambiental teriam pouca influência na persistência da cobertura de corais frente aos impactos relacionados às mudanças climáticas. Em outras palavras, a perspectiva comum entre os cientistas especialistas em recifes de corais é que as ações aliviadoras possíveis de serem implementadas local/regionalmente provavelmente serão ofuscadas pelos impactos mais significativos de escala global.

Portanto, sob o ponto de vista empenhado na presente revisão integrativa, é notável que as referências-chave discutidas nos últimos parágrafos alcançaram êxito ao propor o emprego de RBs como alternativa viável para modelagem dos recifes de corais. Através dos métodos e técnicas apresentados, os autores comprovaram a significativa aptidão destas ferramentas em auxiliar a gestão dos ambientes recifais, principalmente, através da avaliação de possíveis resultados. Apesar destas pesquisas compartilharem um denominador comum (modelagem bayesiana de processos atuantes nos ambientes recifais), assim como diversos outros aspectos (área de estudo, variáveis componentes dos modelos), ressalta-se que modelos de redes específicos para cada caso, com objetivos e aplicações distintas foram propostos. Isto, além de apontar para a possibilidade de empregar estes modelos de variadas maneiras em pesquisas futuras, também evidencia a ajustabilidade desta abordagem no contexto dos recifes de corais.

De fato, desde que inicialmente proposta a abordagem Bayesiana vem ganhando popularidade em pesquisas ambientais, sendo empregada em diversas outras aplicações no contexto dos recifes de corais. Exemplos referem-se à modelagem da população de espécies de corais e outros organismos (Verbruggen et al., 2009; Magris and Destro, 2010; Bucas et al., 2013), desenvolvimento de modelos de nichos ecológicos para previsão de potenciais distribuições de espécies invasoras (Jimenez-Valverde et al., 2011; Carlos-Júnior et al., 2015), ou mesmo para análise de riscos de inundação costeira em áreas protegidas por estes ecossistemas (Gutierrez et al., 2011; Plant and Holland, 2011; Poelhekke et al., 2016; Pearson et al., 2017). Esta diversidade de aplicações demonstra que, apesar de ainda não representar um método de análise padrão, se familiarizar com a abordagem Bayesiana pode ser de grande valia para pesquisadores dedicados ao recifes de corais.

2.6 Estudo de caso: formalização do modelo conceitual de previsão de curto prazo do branqueamento dos corais no oceano Atlântico

Neste estudo de caso apresentaremos os indicadores ambientais e os métodos empregados para a formalização do modelo conceitual em uma estrutura de RB apta a realizar previsões sazonais do branqueamento dos corais. A construção de um modelo capaz de realizar previsões

com meses de antecedência advem da necessidade de prover tempo suficiente para planejar campanhas de campo para caracterização do padrão de branqueamento e/ou possíveis ações mitigadoras. Além disso, nossa intenção aqui também remete ao desenvolvimento de uma arquitetura de modelo passível de ser adaptada para as distintas áreas recifais do oceano Atlântico. Isto significa que deve-se selecionar uma área de estudo como caso controle, que de maneira ideal, deve conter algumas características peculiares que viabilizam o desenvolvimento de uma arquitetura passível de ser empregada em outros locais. Primeiro: dados de observações recifais mais padronizadas possível obtidos a partir da aplicação de protocolos científicos (e.g. *Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment* – AGRRA; detalhes em Ginsburg et al. 1998). Existe um significativo grau de subjetividade vinculado às observações de branqueamento que são realizadas por mergulhadores com diferentes níveis de experiência e que realizam uma estimativa visual de extensão e severidade do fenômeno. Segundo: consistência dos dados ao longo do tempo e espaço. Para realizar uma estruturação coerente do modelo segundo os procedimentos de *data learning* é necessário a presença de casos consistentes na base de dados para que os algoritmos de análise estimem de maneira precisa as relações de (in)dependência entre as variáveis. Para o caso do branqueamento, isto significa empregar dados com distintos níveis de severidade do fenômeno, que, idealmente, devem ser contemplados pela variabilidade dos outros componentes do modelo. No nosso caso estamos preocupados com circunstâncias mais perigosas capazes de promover o branqueamento em massa em escalas temporal e espacial relativamente amplas (i.e. o dados mensais com resolução espacial de ~5 km foram utilizados).

Estes requisitos foram levados em consideração para a seleção do complexo recifal dos Abrolhos (Figura 2) como caso controle para a apuração do modelo conceitual de previsão de curto prazo do branqueamento. Esta área recifal, considerada a mais proeminente do Atlântico Sul em termos de extensão e diversidade (Leão et al., 2000), está situada sobre o alargamento da plataforma continental entre as latitudes 17°S e 19°S a distâncias de dezenas de quilômetros da costa, sendo que grande parte dos seus recifes compõe reservas ou áreas de proteção ambiental. Acreditamos que nesta região os recifes estão menos expostos à influências deletérias relacionadas às diversas atividades antrópicas caracterizando um cenário onde as forças oceanográficas puderam ser melhor analisadas segundo o grau de influência sobre o branqueamento. Além disso, nas estações de pesquisa (círculos pretos na figura 1) foram realizados mergulhos observacionais (mergulhadores submetidos a treinamentos específicos para a região investigada) do fenômeno de branqueamento nos meses de verão austral ao longo de 15 anos (2000 à 2014), seguindo-se o mesmo protocolo de aquisição de dados (i.e. AGRRA). Isto confere consistência ao longo do tempo/espaço requerida para a construção de uma base de dados consistente, capaz de promover uma arquitetura de modelo confiável.

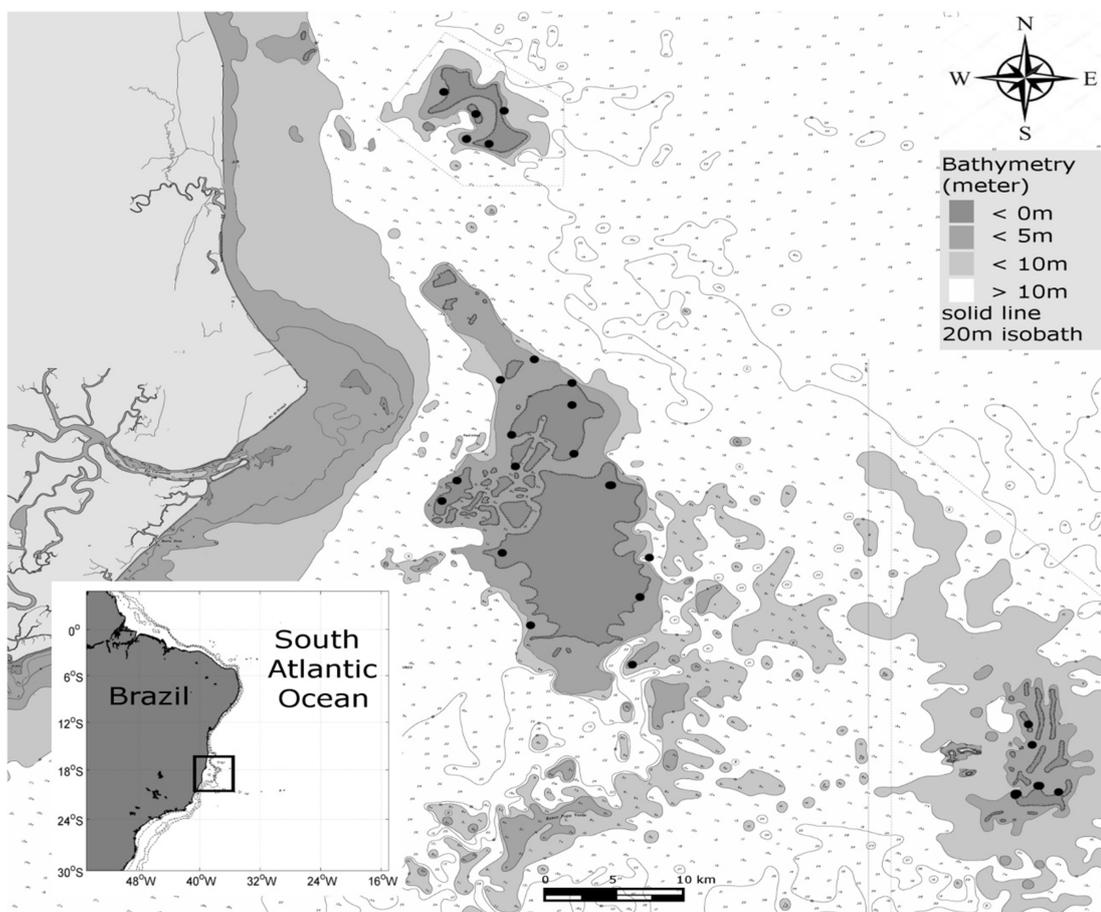


Figura 2 – Complexo recifal dos Abrolhos. Círculos pretos marcam as posições das estações de levantamento de dados. Tons de cinza indicam a batimetria da área.

2.6.1 Dados ambientais

Antes de construirmos uma estrutura de modelo passível de ser utilizada para prever sazonalmente o branqueamento nas distintas áreas recifais que compõe a região de estudo, o estado atual do conhecimento relacionado ao objetivo do modelo foi compilado e sintetizado em um diagrama de influência (Figura 3a). Para isso, partimos do pressuposto que as respostas dos corais em termos de branqueamento nas áreas recifais do Oceano Atlântico são o resultado final de uma cadeia de eventos subsequentes passíveis de serem modeladas segundo duas teorias bem fundamentadas:

- a. Existe um efeito remoto do fenômeno El Niño sobre o Oceano Atlântico que acontece na forma de anomalias térmicas positivas da água do mar com uma defasagem temporal de alguns meses; e
- b. Em grande parte dos recifes das áreas de interesse o branqueamento dos corais é principalmente influenciado por anomalias térmicas positivas na água do mar;

Entretanto, observações de diversas pesquisas de campo e laboratoriais dedicadas à investigar as circunstâncias desencadeadoras do branqueamento evidenciam a relevância de

outros fatores, além da temperatura da água, na severidade do fenômeno, tais como: as características do vento, correntes, turbidez, salinidade, cobertura de nuvens e da radiação solar (Brown et al., 1997; Marshall e Schutenberg, 2006; Vega Thurber et al., 2014). Estes fatores, ditos secundários, podem desencadear o branqueamento ou atuar de maneira combinada para influenciar (positiva ou negativamente) em sua severidade.

Este conjunto de ideias e pressupostos, amplamente discutido em periódicos relacionados ao tema, foi explorado nesta pesquisa para derivar diversos índices representativos das condições ambientais atuantes nos recifes de corais. Para assinalar a conjuntura de circunstâncias favoráveis ao desencadeamento do branqueamento e investigar o grau de influência que cada variável pode exercer sobre o padrão destes fenômenos, indicadores ambientais foram desenvolvidos a partir de dados relacionados aos seguintes parâmetros físicos:

- Temperatura da superfície do mar;
- Fenômeno El Niño;
- Radiação fotossinteticamente ativa (PAR);
- Salinidade superficial;
- Turbidez superficial (coeficiente de atenuação Kd-490);
- Velocidade do vento na superfície do mar;
- Velocidade da corrente superficial;

Os dados numéricos que derivaram os indicadores ambientais possuem origens distintas, com atributos de resoluções espacial, temporal e disponibilidade de dados consideravelmente diferentes. Para facilitar sua descrição, suas características foram sumarizadas na tabela 1.

Tabela 1 – Origens e características dos dados ambientais que originaram os índices testados durante a etapa de estruturação do modelo.

Environmental variable	Origin	Indicators	Spatial resolution	Temporal resolution/interval
SST*	OSTIA*	DHT*/SST5days/TS STA/	~4km	Daily / 2000-2015
El Niño*	CPC*/ESRL* - NOAA*	ONI*/MEI*/NINO4 */SOI*	-	Monthly / 2000-2015
PAR*	SEAWIFS*/ MODIS*	Trimestral anomalies/ Seasonal mean and maximums values	~4km	Weekly / 2000-2010/ 2002-2014
Kd490*	SEAWIFS/ MODIS	Trimestral anomalies/ Seasonal mean and maximums values	~4km	Weekly / 2000-2010/ 2002-2014
Salinity*	ARMOR*	Trimestral anomalies/ Seasonal mean and maximums values	~25km	Monthly / 2000-2012
Currents*	ARMOR	Trimestral	~25km	Monthly / 2000-2012

		anomalies/ Seasonal mean and maximums values		
Wind *	CCMP*	Trimestral anomalies/ Seasonal mean and maximums values	~25km	Monthly/ 2000-2011
Community structure	AGRRA*	CBI*/BSI*/BSI2	30 meters transects	Once a year/ 2000- 2014

*AGRRA (Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment – Gisnburg et al., 1998)

*ARMOR (Global L4 reprocessed dataset – Guinehut et al. 2012)

*BSI (Interspecific susceptibility indicator – details at: REPOSITORY)

*BSI2 (Interspecific susceptibility indicator – details at: REPOSITORY)*Community structure

*CBI (Coral Bleaching Index – Lisboa et a., 2018)

*CCMP (Cross Calibrated Multi Plataform – Wentz et al., 2015)

*Currents (sea water surface velocity) data available at: <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to>

[products/?option=com_csw&view=details&product_id=MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002)

*CPC (Climate Prediction Center - <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>);

*DHT (Degree Heating Trimestrer – Lisboa et al., 2018)

*El Niño – data available at: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>

*ESRL (Earth System Research Laboratory - <https://www.esrl.noaa.gov/>);

*Kd490 (Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance) – data available at:

https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODIS-Aqua/Mapped/8-Day/4km/Kd_490/

*MEI (Multivariate El Niño Index – Wolter & Timlin, 1993);

*MODIS (Moderate Imaging Spectroradiometer – NASA et al. 2014);

*NINO4 (SST anomalies averaged over the NINO4 region – Ashok et al., 2007)

*NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration);

*ONI (Oceanic Niño Index - Hoerling & Kumar, 2000);

*OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis – Dolon et al., 2011)

*PAR (Photosynthetically active radiation) – data available at:

<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODIS-Aqua/Mapped/8-Day/4km/par/>

*Salinity data available at: [http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002)

[products/?option=com_csw&view=details&product_id=MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002](http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=MULTIOBS_GLO_PHY_REP_015_002)

*SEAWIFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor – NASA et al. 2014);

*SOI (Southern Oscillation index - Difference between standardized Darwin and Tahiti surface pressure values.)

*SST (Sea Surface Temperature) – data available at: <https://accession.nodc.noaa.gov/GHRSST-OSTIA-UKMO-L4-GLOB>

*SSTA (Sea Surface Temperature anomaly based monthly climatology – para maiores detalhes ver materiais suplementares)

*SST5days (Sea Surface Temperature accumulated during 5 days - Lisboa et al., 2018)

*Wind data available at: <http://data.remss.com/ccmp/v02.0/>

Para desempenhar testes de dependência causal dentro de um conjunto de treinamento estrutural mais apropriado possível, os indicadores ambientais relativos a estes parâmetros

(Tabela 1) foram desenvolvidos para contemplar as condições atuantes em três períodos distintos: durante as observações do branqueamento (dia, semana, ou mês, de acordo com a disponibilidade do dado); os três meses imediatamente anteriores à observação; e, buscando investigar a influência das condições da estação passada e dos índices relativos ao El Niño, também foram calculados indicadores para períodos de seis a nove meses antes da observação recifal. Para tanto, foram utilizados valores climatológicos, médios, anomalias positivas/negativas, anomalias médias e máximas de verão/inverno, anomalias trimestrais positivas/negativas, assim como suas médias e máximas de verão/inverno para todos os parâmetros analisados (equações 1 a 3).

Dois índices térmicos amplamente utilizados pela comunidade científica para prever o branqueamento em diversas regiões também foram calculados e adicionados ao conjunto de dados de entrada do modelo. Em teoria esses índices são responsáveis por monitorar as condições térmicas capazes de disparar o branqueamento, através de curtas e intensas anomalias de TSM (i.e SST5days – equação 5) do início do verão, e intensificá-lo pelo acúmulo de calor ao longo de uma janela temporal de três meses (i.e. DHT – equação 4). O outro indicador térmico local refere-se à Anomalia Trimestral de SST com defasagem temporal de seis meses (TSSTA - Equação 6). Este índice foi calculado de forma a contemplar as condições térmicas operando na última estação oposta, partindo da hipótese de que a realidade observada em campo pode ter estado sob influência de condições anômalas desde então.

$$\mu_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{j=1}^n S_{i,j} \quad \text{Equação 1}$$

$$A_{i,j} = S_{i,j} - \mu_i \quad \text{Equação 2}$$

$$AT = \sum_n^{n-2} A_{i,j} \quad \text{Equação 3}$$

- μ corresponde ao mês (ou semana) climatológico;
- i é o índice que aponta o mês (ou semana) do ano, varia, portanto, entre 1 e 12 (ou entre 1 e 46);
- n é o número total de anos utilizados no cálculo, de acordo com a disponibilidade do dado de cada variável ambiental analisada (ver tabela 1);
- $S(i,j)$ corresponde ao mês (ou semana) a ser somado para o cálculo da climatologia, e de onde calcula-se as anomalias;

$$DHT = \sum_n^{n-89} SST_n - TT \quad \text{Equação 4}$$

$$SST5\ days = Max \sum_n^{n-4} SST_n \quad \text{Equação 5}$$

$$TSSTA = \sum_n^{n-89} SST_n - Clim_{month}(SST) \quad \text{Equação 6}$$

- TT corresponde a temperatura de fronteira calculada à partir das médias mensais climatológicas entre 1985 e 1994;
- n corresponde aos dias do ano utilizados para os cálculos dos índices térmicos.

Como indicadores da intensidade e do tipo do El Niño, foram utilizados os seguintes índices: ONI (Oceanic Niño Index); MEI (Multivariate ENSO index); NINO4 (índice térmico na região 4 do oceano Pacífico); SOI (Southern oscillation index). Estes índices foram testados com defasagem temporal de 6 a 9 meses de acordo com resultados de correlção cruzada de Klein et al. (1999).

Baseado na informação de que existe uma diferença de susceptibilidade interespecífica (e.g. espécies ramificadas são em geral mais sujeitas ao branqueamento), foram desenvolvidos indicadores de susceptibilidade que levam em consideração a composição da comunidade corais (BS1 e BS2 na tabela 1). Estes indicadores são calculados a partir das informações da distribuição de abundância de espécies para gerar um valor numérico (a ser discretizado) relativo ao grau de vulnerabilidade ao longo de cada observação recifal.

Por fim, os dados de branqueamento, calculados a partir do número de colônias e suas respectivas áreas branqueadas, foram empregados para o cálculo do coral bleaching index (CBI equação 9). Buscando minimizar os erros subjetivos associados ao processo de coleta de dados, apenas dados de transectos com valores de branqueamento dentro do intervalo de confiança de 95% foram considerados.

$$CBI = Col_{pale} * Area_{pale} + Col_{bleached} * Area_{bleached} \quad \text{Equação 9}$$

Onde,

Col_{pale} corresponde à % de colônias pálidas [tecido descolorido] ;

$Area_{pale}$ corresponde à % média de colônias pálidas;

$Col_{bleached}$ corresponde à % de colônias completamente branqueadas;

$Area_{bleached}$ corresponde à % média de colônias completamente branqueadas;

2.6.2 Procedimentos adotados

Após construído uma base de dados formada por um conjunto de eclético de variáveis que, de alguma maneira poderiam estar relacionados ao padrão do branqueamento, foi preciso habilitar os dados de entrada para que os algoritmos de aprendizagem possam lidar com eles de maneira apropriada. O processo de discretização consiste em transformar valores numéricos em intervalos mutuamente exclusivos correspondentes à classes das variáveis (e.g. Low/Moderate/High na rede da Figura 3d). A largura e número de intervalos foram determinados baseando-se na frequência de ocorrência dos valores numéricos através da ferramenta *Pre-Processor* do software *Belief Network Power Constructor* (BNPC - Cheng et al., 2002).

Para construir a arquitetura do modelo foi utilizado o algoritmo de análise de dependência em relação ao fluxo de informação entre os indicadores ambientais (Cheng et al., 2002). Este algoritmo estabelece um arco e mede a força desta conexão entre cada par de variáveis se existe uma relação direta de causa e efeito entre elas, dadas as observações disponíveis (Charniak, 1991). O aprendizado da estrutura foi realizado baseando-se, inicialmente, nas relações existentes nas observações disponíveis, sem o emprego de conhecimento de domínio do especialista. As estruturas de causalidade iniciais (exemplo na Figura 3b) foram utilizadas para análise do grau de influência de cada variável sobre o resultado do modelo e, a partir de então, para a seleção das mais significativas. Todas as variáveis ambientais e ecológicas incluídas foram analisadas simultaneamente a partir de sua ligação, direta ou indireta, com o branqueamento. Algumas das variáveis podem conter as mesmas informações, ou informações irrelevantes para o branqueamento, dessa forma nem todas as variáveis analisadas devem fazer parte da estrutura do modelo. À medida que os testes condicionais eram realizados, as variáveis que apresentavam o menor grau de influência sobre o branqueamento do coral (maiores distâncias na estrutura da rede

na Figura 3b) foram sendo gradualmente excluídas, resultando em um grupo de componentes do modelo cada vez mais restrito.

À este ponto, ressalta-se que, durante todos os procedimentos metodológicos realizados a parcimônia do modelo foi considerada primordial para o desenvolvimento de uma arquitetura de rede o mais simples possível. Esta recomendação baseia-se na observação de que os modelos preditivos de apoio à gestão ambiental mais úteis e significativos são em geral extremamente simples (Charniak, 1991). Um acréscimo no número de camadas do modelo, de variáveis, ou do número de seus intervalos, acarreta em um aumento exponencial da complexidade do modelo, sendo necessários mais dados no banco de entrada para estimar de maneira apropriada a distribuição de probabilidades. Além disso, neste cenário mais complexo, a sensibilidade do objeto de consulta da rede aos componentes mais significativos pode ser diluída pela presença de variáveis desnecessárias, aumento, dessa forma, a incerteza e o erro propagados até a saída do modelo (Korb and Nicholson, 2003). Para evitar isso, recomenda-se que, na medida do possível, o número de camadas seja mantido em quatro, ou menos; o número de nós pais de cada componente seja três ou menos, e o número de seus intervalos quatro ou menos (Chen and Pollino, 2012). Isto ajuda a manter a estrutura do modelo simples o suficiente para ser compreendida e a tabela de probabilidades condicionais associada passível de ser manejável.

Por fim, buscando direcionar a aplicação do modelo e refinar a sua estrutura, condicionantes baseadas no conhecimento de domínio do especialista foram inseridas. Assim como apontado anteriormente (subseção 2.4.2), este procedimento pode ser muito proficiente durante a modelagem de sistemas naturais, como o caso do branqueamento dos corais, visto que sua natureza complexa e estocástica pode impossibilitar que os algoritmos detectem uma estrutura acurada (Sperotto et al., 2017). Portanto, os resultados do aprendizado estrutural, facilmente visualizados através da representação gráfica da rede, foram otimizados quando combinados com a contribuição dos especialistas. Apesar disto poder ser realizado ao adicionar e/ou remover variáveis e arcos diretamente na estrutura gráfica, nesta pesquisa optamos pelo uso dos seguintes condicionantes: 1 - A estrutura da rede deve respeitar a ordem temporal dos eventos. Ou seja, variáveis passadas não podem ser influenciadas por ocorrências posteriores. 2 - Por se tratar de um fenômeno remoto na área de estudo, os indicadores El Niño não podem influenciar diretamente o branqueamento. 3 - O nó branqueamento não pode influenciar os outros nós da rede, portanto, é um nó de folha.

2.6.3 Resultados

A arquitetura do modelo conceitual resultante (Figura 3c) conta com a informação combinada de sete indicadores ambientais relativos aos parâmetros SST, El Niño e turbidez, selecionados como componentes do modelo graças as suas influências no branqueamento, seja direta ou indiretamente. Os dois indicadores térmicos desenvolvidos especificamente para prever o branqueamento a partir de técnicas da literatura (i.e. DHT and SST5days) mostraram estar diretamente ligados ao branqueamento exercendo os maiores níveis de influência (nós pais), e confirmaram o primeiro pressuposto teórico sobre o qual o modelo conceitual inicial foi sustentado: o branqueamento de corais em massa é primordialmente causado por anomalias positivas na SST. Somado a isso, três indicadores do El Niño com defasagem temporal (ONI, NINO4 e MEI) contemplam o segundo pressuposto adotado: existe uma teleconexão entre o fenômeno El Niño e anomalias na SST no oceano Atlântico que acontece de maneira mais pronunciada com a defasagem temporal de alguns meses.

Em relação ao indicador de turbidez (nós no canto direito da Figura 3c, e no canto esquerdo da Figura 3d), é pertinente esclarecer que variações deste parâmetro podem influenciar o branqueamento de maneiras distintas. Um acréscimo do material particulado na água aumenta a turbidez e diminui a penetração da luz, resultando em uma atenuação da quantidade de luz que atinge os corais, e por conseguinte, amenizando o efeito da temperatura (Suggett et al. 2012). Por outro lado, o aumento de turbidez acarreta em inibição do recrutamento, obliteração dos pólipos, danos no tecido do coral devido a abrasão, asxia devido a inibição das trocas gasosas, aumentos na energia e na perda de carbono utilizados para auto limpeza e produção de muco, além de elevar taxas de ocorrência de doenças e necrose dos tecidos (Bruno et al. 2003, Weber et al. 2012; Browne et al. 2012). Estes efeitos combinados à ação do aumento de temperatura podem desencadear em padrões altamente severos de branqueamento.

O papel desempenhado pelo aumento da turbidez durante os episódios de branqueamento na região de Abrolhos foi investigada com maiores detalhes em Lisboa et al. (2018), através de análises de sensibilidade que expõe o grau de interferência de cada variável dentro da base de dados do modelo. Apesar de demonstrar um nível de influência bem inferior quando comparado aos outros componentes do modelo (índices térmicos e indicadores do El Niño), os episódios de alta turbidez mostraram-se condicionalmente associados aos eventos de branqueamento mais severos, indicando que os corais passam por períodos de maior vulnerabilidade quando quando o aumento da turbidez acontece concomitante ao aumento da temperatura.

Os diversos outros indicadores ambientais relacionados aos parâmetros físicos e ecológicos testados (Figura 3b) não demonstraram influência sobre o branqueamento dentro do nosso conjunto de dados de entrada, não sendo, portanto, aproveitados na estrutura do modelo conceitual resultante (Figura 3c). Isto não significa que estes parâmetros são irrelevantes para o branqueamento dos corais, mas sim que neste conjunto específico de instâncias não existe uma relação de causa e efeito significativa com o branqueamento que possa ser utilizada para prever este fenômeno.

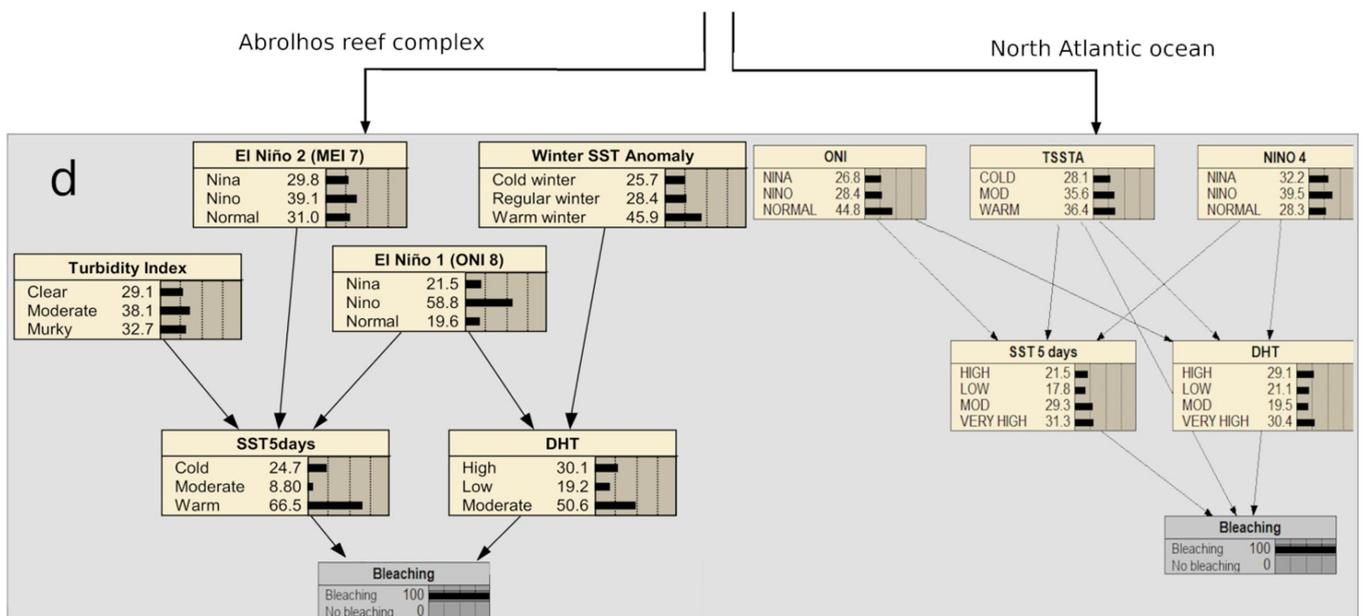
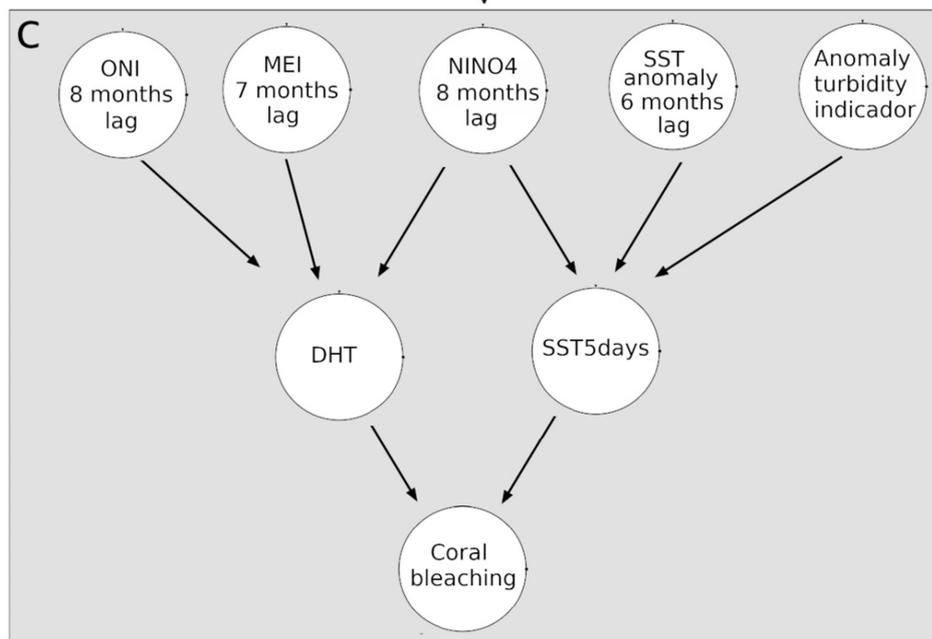
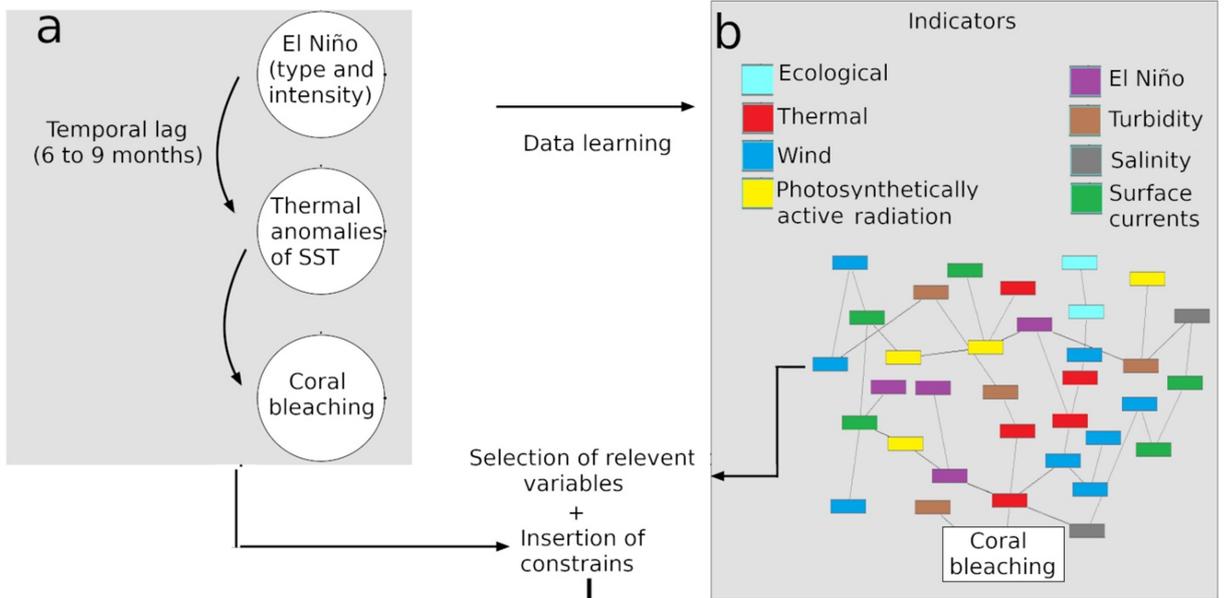


Figura 3 – Resumo gráfico dos procedimentos envolvidos na construção do modelo de RB para previsão sazonal do branqueamento dos corais. (a) Diagrama de influência expondo os dois pressupostos teóricos sobre os quais o modelagem se sustenta. (b) Exemplo de teia de relações de causalidade entre variáveis ambientais avaliadas a partir do grau de influência sobre o branqueamento dos corais. (c) Arquitetura básica do modelo conceitual construído a partir da combinação do data learning, com a inserção de conhecimento do especialista. (d) Redes Bayesianas beneficiadas a partir do modelo conceitual, e empregadas para prever o branqueamento no complexo recifal dos Abrolhos (à esquerda – detalhes em Lisboa et al., 2018) e no oceano Atlântico norte (à direita – detalhes em Lisboa e Kikuchi, 2020)

A viabilidade do modelo conceitual formalizado na presente pesquisa foi avaliada com para região do Abrolhos (i.e. utilizando a mesma base de dados da presente pesquisa) em Lisboa et al. (2018), e posteriormente extrapolada para o oceano Atlântico Norte em Lisboa e Kikuchi (2020). Esta extrapolação para uma região afetada por severos eventos recorrentes e com um número bem maior de observações realizadas nas últimas décadas (Donner et al., 2017) comprovou a aplicabilidade do emprego da arquitetura do modelo desenvolvida aqui para a previsão do branqueamento nas principais áreas recifais do oceano Atlântico. É significativo considerar que ambas pesquisas se beneficiaram da estrutura previamente desenvolvida aqui, para restringir o grupo de variáveis analisadas e para calcular as probabilidades condicionais do modelo sem a utilização de um processo elicitatório dos especialistas. Em ambos os casos os autores também tiveram que desenvolver suas respectivas estruturas a partir do aprendizado estrutural baseado em dados, apesar disso, -se que estas pesquisas se beneficiaram do modelo conceitual desenvolvido aqui como ponto de partida de uma base de dados em um grupo restrito/específico de variáveis.

Além disso, a sobrevivência dos recifes depende de uma compreensão adequada de todos os processos envolvidos na manutenção e funcionamento destes ecossistemas (Leão et al., 2003). Neste sentido, a arquitetura do modelo proposto demonstra um valoroso esforço científico, tanto para criar diretrizes teóricas acerca de como os dados de branqueamento de uma região mais controlada respondem aos diversos parâmetros analisados, quanto para o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de auxiliar na caracterização destes eventos, desde as primeiras colônias a perderem suas zooxanthellae até que o processo atinja sua fase mais severa. Além disso, a representação gráfica oferecida pelo modelo de rede pode ser bastante proficiente em compartilhar teorias e conhecimentos entre especialistas, modeladores e gestores ambientais acerca do principal agente responsável pelo branqueamento nas áreas recifais do oceano Atlântico.

2.7 Considerações finais

Este texto buscou tratar dos diversos aspectos relacionados ao emprego de RBs para representação de problemas nas ciências ambientais, em particular para o caso dos recifes de corais. A partir da perspectiva do cientista/modelador ambiental foram destacados relevantes tópicos e peculiaridades de ambos: dos ambientes recifais e das RBs, que juntas, conferem um alto grau de aplicabilidade desta abordagem, particularmente para o caso do branqueamento dos corais. Neste sentido, entre as principais características das RBs, destacam-se:

- Capacidade em lidar e empregar teorias, conhecimento e dados com variados atributos (e.g. resolução espacial/temporal, disponibilidade [incluindo dados omissos], grau de

influência sobre o objeto de modelagem), sem necessariamente ter de dar conta de todos os detalhes mecanicistas entre eles;

- Lidar com as incertezas e complexidades inerentes aos ambientes recifais, e reconhecer as próprias limitações mediante o uso de probabilidades condicionais, através da propagação da evidência pela estrutura da rede segundo teorias fundamentadas;
- Auxiliar na concepção do sistema e no desenvolvimento de uma compreensão compartilhada entre especialistas, estudantes e gestores ambientais através de uma representação gráfica (e distribuição de probabilidades) de simples assimilação e aproveitamento;
- Aptidão para testar a viabilidade de alternativas de gestão e cenários específicos, não apenas em relação aos desfechos esperados, mas também no que diz respeito à resultados altamente indesejados, a fim de auxiliar o processo de tomada de decisão baseada em numa avaliação formal dos possíveis resultados.

Estas peculiaridades vem sendo empregadas nas últimas décadas em variados contextos nos recifes de corais, em geral, relacionadas à duas importantes questões a serem respondidas através do emprego de RBs: 1 – como as variáveis ditas significativas devem se comportar diante dos distúrbios ambientais atuais e futuros, e quais impactos relacionados a elas para o ambiente recifal; e 2 – de que maneira as alternativas de intervenções podem auxiliar os gestores ambientais na prevenção da saúde e na dinâmica destes ambientes.

A revisão integrativa da literatura destacou as referências-chave que alcançaram êxito ao propor de maneira inédita o emprego de RBs como alternativa viável para modelagem do branqueamento dos corais (i.e. Wooldridge e Done, 2004; Wooldridge et al., 2005). A significativa aptidão destas ferramentas em auxiliar a gestão dos ambientes recifais foi demonstrada através dos métodos e técnicas apresentados, e comprovada, posteriormente, pela crescente aceitação e aproveitamento destes modelos probabilísticos em diversos outros contextos dos ambientes recifais (e.g. Gutierrez et al., 2011; Krug et al., 2013; Ban et al., 2014; Pearson et al., 2017).

Em relação às perspectivas dos recifes de corais diante das projeções climáticas, destaca-se que importantes respostas ecológicas ainda não são suficientemente compreendidas. Isto introduz incertezas sobre os processos de alteração e/ou recuperação de recifes operando sob diferentes níveis de degradação (Ban et al., 2014). Sabe-se, entretanto, que a incerteza relacionada ao branqueamento aumenta à medida que a escala analisada diminui, e que grande parte dessa complexidade provavelmente nunca será completamente elucidada. Evidentemente, os modelos de simulação para processos atuantes nestes ambientes nunca serão capazes de replicar a complexidade inerente na natureza (Wooldridge et al., 2005). A recomendação de diversos pesquisadores envolvidos na área de modelagem ambiental é baseada na observação de que os modelos de previsão mais úteis são, em sua maioria, extremamente simples, ou pelo menos conceitualmente simples (Charniak, 1991). Esta característica parcimoniosa como uma orientação para uma modelagem com uma utilidade clara e bem definida foi a diretriz central adotada no estudo de caso apresentado aqui. Para formalizar o modelo de previsão de curto prazo do branqueamento dos corais, pressupostos teóricos bem estabelecidos sobre este fenômeno foram avaliados em relação à sua contundência em uma base de dados a partir de técnicas de machine learning. Os pressupostos foram confirmados, e uma estrutura de modelo conceitual apta a ser adaptada nas diversas regiões recifais do Oceano Atlântico foi desenvolvida e posteriormente confirmada como uma ferramenta útil em Lisboa et al. (2018) e Lisboa e Kikuchi (2020). Sendo assim, para modelagem de ambientes complexos como os recifes de corais,

devemos focar na previsão de propriedades estatísticas agregadas sobre escalas temporais e espaciais compatíveis com medidas realistas de incertezas (Wooldridge et al., 2005).

Outro importante aspecto, refere-se à interdisciplinaridade inerente a maioria dos casos de pesquisas sobre RBs, o que destaca a importância da afiliação de autores oriundos de variadas áreas de interesse. A utilização das RBs para diversos fins, entretanto, deve ocorrer de maneira cautelosa, visto algumas condicionantes que estes modelos devem respeitar (para detalhes ver Pearl, 1986), e, principalmente, a existência de ferramentas alternativas de previsão e modelagem que mostram-se minuciosamente adequadas à problemas específicos. Dessa forma, fica evidente a relevância de um conhecimento metodológico aprofundado para fundamentar a escolha consciente acerca da técnica a ser utilizada.

Em relação ao desenvolvimento futuro da abordagem Bayesiana, é evidente que grande parte dos esforços de pesquisas ainda tem sido dedicada ao seu desenvolvimento teórico e metodológico (Aguilera et al, 2011). Entretanto, à medida que dados e métodos se aperfeiçoam e bases de dados espaciais consistentes ao longo do tempo se tornam disponíveis, a capacidade de representação dos sistemas naturais, inevitavelmente, progride em realismo e complexidade. Concomitante a isso, as RBs vem gradualmente ganhando popularidade por representar uma das ferramentas capaz de ampliar os objetivos das pesquisas de apenas analisar para auxiliar no processo de tomada de decisões. Desta maneira, as RBs configuram-se como um proveitoso complemento na caixa de ferramenta dos cientistas/modeladores, e em um futuro próximo, devem estabelecer-se como um dos métodos padrão de análises no campo das ciências ambientais, principalmente nos contextos dominados pela complexidade e incerteza como os recifes de corais. Por fim, diante dos argumentos e das análises apresentadas na presente pesquisa, gostaríamos de expressar que compartilhamos com o ponto de vista exposto há três décadas por Charniak (1991) quando escreveu: *“It is my belief that Bayesian networks or their descendants are the wave of the future”*.

2.8 Agradecimentos, Amostras, e Dados

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001, e pelo National Institute of Science and Technology for the Tropical Atlantic Environments (inctAmbTropic) under grant no. CNPq 465634/2014-1. RPKPK benefits from a CNPq fellowship (PQ-1C). No repositório on-line (<https://doi.org/10.5281/zenodo.835780>), os leitores podem encontrar todos os dados e índices utilizados no estudo de caso exposto na presente pesquisa.

2.9 Referencias bibliográficas

Aguilera, P.A., Fernández, A., Fernández, R., Rumí, R., Salmerón, A., 2011. Bayesian networks in environmental modelling. *Environ. Modell. Softw.* 26, 1376-1388.

Andersen, S.K., Olesen, K.G., Jensen, F.V., Jensen, F., 1990. HUGIN: a shell for building Bayesian belief universes for expert systems. In: Shafer, G., Pearl, J. (Eds.), *Readings in Uncertain Reasoning*. Kaufmann, San Mateo, pp. 332-337.

- Baker N.R., Bowyer J.R., 1994. *Photoinhibition of photosynthesis*. Bios Scientific Publishers, Oxford, UK, 471.
- Ban S. S., Pressey R.L., Graham N.A.J. 2014. Assessing interactions of multiple stressors when data are limited: A Bayesian belief network applied to coral reefs. *Global Environmental Change*.27:64–72.
- Bayes, T., Price, R., 1736. An essay towards solving a problem in the doctrine of changes. *Philosophical transactions (1683-1775)* (53): 370-418.
- Bennett, N., Croke, B., Guariso G., Guillaume, J., Hamilton, S., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L., Norton, J., Perrin, C., Pierce, S., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A., Fath, B., Andreassian, V., 2013. Characterising Performance of Environmental Models. *Environmental Modelling & Software*. 40. 1–20. 10.1016.
- Berkelmans R., De'ath G., Kininmonth S., Skirving W.J., 2004. A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: spatial correlation, patterns, and predictions. *Coral Reefs* 23, 74-83.
- Bickel, J.E., 2007. Some comparisons among quadratic, spherical, and logarithmic scoring rules. *Decis. Anal.* 2, 49-65.
- Brown B.E., Dunne R.P., Scoffin T.P., Le Tissier M.D.A., 1994. Solar damage in intertidal corals. *Mar Ecol Prog Ser*105 : 219-230.
- Brown B.E., 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs*, v. 16, p. 129-138.
- Browne N.K., Smithers S.G., Perry C.T., 2012. Coral reefs of the turbid inner-shelf of the Great Barrier Reef, Australia: An environmental and geomorphic perspective on their occurrence, composition and growth. *Earth-Sci Rev* 115: 1-20
- Bucas, M., Bergström, U., Downie, A., Sundblad, G., Gullström, M., von Numers, M., Šiaulys, A., Lindegarth, M., 2013. Empirical modelling of benthic species distribution, abundance, and diversity in the Baltic Sea: Evaluating the scope for predictive mapping using different modelling approaches. *ICES Journal of Marine Science*. 70. 10.1093/icesjms/fst036.
- Bruno J.F., Petes L.E., Harvell C.D., Hettinger A. 2003. Nutrient enrichment can increase the severity of coral diseases. *Ecol Lett* 6: 1056–1061
- Cain, J. 2001. Planning improvements in natural resources management: guidelines for using Bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond. Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Oxon., UK.
- Carlos-Júnior L.A., Barbosa N.P.U., Moulton T.P., Creed J.C., 2015. Ecological niche model used to examine the distribution of an invasive, non-indigenous coral. *Mar Environ Res* 103:115–124.

- Charniak, E., 1991. Bayesian networks without tears. *Artif. Intell. Mag.* 12, 50-63.
- Chen, S.H., Pollino, C.A. 2012. Good practice in Bayesian network modelling *Environ. Model. Softw.*, 37, pp. 134-145
- Cheng, J., Griener, R., Kelly, J., Bell, D., Liu, W., 2002. Learning Bayesian networks from data: an information-theory based approach. *Artif. Intell.* 137, 43-90.
- Christofides, A., Tanyi, B., Whobrey, D., Christofides, N., 1999. The optimal discretization of probability density functions. *Computational Statistics and Data Analysis* 31, 475-486.
- Cooley S., Mathis J., Yates K. Turley C. 2012. Frequently Asked Questions about Ocean Acidification. U.S. Ocean Carbon and Biogeochemistry Program and the UK Ocean Acidification Research Programme. Version 2.
- Donner, S. D., W. J. Skirving, C. M. Little, M. Oppenheimer, O. Hoegh-Guldberg., 2005. Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Global Change Biology* 11:2251–2265.
- Donner, S.D., Rickbeil, G.J.M., Heron, S.F., 2017. A new, high-resolution global mass coral bleaching database. *PLoS ONE* 12(4): e0175490.
- Dougherty, J., Kohavi, R., Sahami, M., 1995. Supervised and unsupervised discretization of continuous features. In: Russell, S., Prieditis, A. (Eds.), *Machine Learning: Proceedings of the Twelfth International Conference*. Morgan Kaufmann, San Francisco, pp. 194-202.
- Feary, D.A., Burt J.A., Cavalcante G.H., Bauman, A.G., 2012. Extreme Physical Factors and the Structure of Gulf Fish and Reef Communities. In *Coral Reefs of the Gulf*, B.M. Riegl and S.J. Purkis (eds.). Springer Netherlands, 163–170.
- Friedman, N., Geiger, D., Goldszmidt, M., 1997. Bayesian network classifiers. *Machine Learning* 29, 131-163.
- Ginsburg R.N., Kramer P.A., Lang J.C., Sale P., 1998. AGRRA, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment. Disponível *online* em: <http://agrra.org> (accessed at 08/2017).
- Glynn P. W., 1993. Coral reef bleaching ecological perspectives. *Coral Reefs* 12, p. 1-17.
- Gutierrez, B. T., Plant, N. G., Thieler, E. R., 2011. A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise. *Journal of Geophysical Research*, 116, F02009.
- Heckerman, D., Geiger, D., Chickering, D.M., 1995. Learning Bayesian networks: the combination of knowledge and statistical data. *Machine Learning* 20, 197-243.

- Henderson C., 2006. Ocean acidification: the other problem, *New Scientist*, 8.
- Hoegh-Guldberg, O., 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar. Freshw. Res.* 50, 839.
- Hruschka J.R., E.R.; Hruschka, E.R.; Ebecken, N.F.F., 2003. A Feature Selection Bayesian Approach for Extracting Classification Rules with a Clustering Genetic Algorithm. *Applied Artificial Intelligence*, Taylor & Francis, London, v. 17, n. 5-6, 489-506.
- Hughes, T. P. et al., 2018. Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359, 80–83.
- Jakeman, A.J., Letcher, R.A., 2003. Integrated Assessment and Modelling: Features, Principles and Examples for Catchment Management. *Environmental Modelling and Software* 18, 491-501.
- Jensen, F.V., Nielsen, T.D., 2007. *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer.
- Jimenez-Valverde A., Peterson A.T., Soberon J., Overton J.M., Aragon P. et al. 2011. Use of niche models in invasive species risk assessments. *Biol Invasions* 13: 2785-2797.
- Jiménez-Valverde, A., 2012 Insights into the area under the receiver operating characteristic curve (AUC) as a discrimination measure in species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 498–507.
- Johnson, S., Mengersen, K., 2012. Integrated Bayesian Network Framework For Modelling Complex Ecological Issues. *Integrated Environmental Assessment and Management* 8(3): 480–490.
- Kahn, C.E., Roberts, L.M., Shaffer, K.A., Haddawy, P., 1997. Construction of a Bayesian network for mammographic diagnosis of breast cancer. *Comput. Biol. Med.* 27, 19-29.
- Klein S. A., Soden B. J., Lau N., 1999. Remote Sea Surface Temperature Variations during ENSO: Evidence for a Tropical Atmospheric Bridge. *Journal of Climate*, v. 12, p. 917-932.
- Korb, K.B., Nicholson, A.E., 2003. *Bayesian Artificial Intelligence*. Chapman & Hall.
- Kozlov, D., Koller, D., 1997. Nonuniform dynamic discretization in hybrid networks. In: Geiger, D., Shenoy, P. (Eds.), *Proceedings of the 13th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. Morgan & Kaufmann, pp. 302-313.
- Krug L. A., Gherardi D. F. M., Stech J. L., Leão Z. M. A. N., Kikuchi R. K. P., Junior E. R. H., Suggett D. J. 2013. The construction of causal network to estimate coral bleaching intensity. *Environmental Modelling & Software*: 42, 157-167.
- Ladeira, Marcelo; Viccari, Rosa M. 1999. Algoritmos de Inferência em Redes Probabilísticas Baseadas em Árvore de Junção. Porto Alegre: II/UFRGS, agosto de 1999. 73p. (Relatório de

- Pesquisa RP 300). (Relatório Técnico RT 99/01-SEAMED. Processo 03-AMPE-01/98- 01/01-22. Edital PADCT/CDT 01/98 Rodada 1).
- Lauritzen, S.L., Spiegelhalter, D.J., 1988. Local computations with probabilities on graphical structures and their applications to expert systems. *Journal of the Royal Statistics Society, Series B* 50, 157-224.
- Lauritzen, S.L., 1995. The EM algorithm for graphical association models with missing data. *Computational statistics and Data analysis*. 19: 191-201.
- Leão Z. M. A. N., Kikuchi R. K. P., 2000. The Abrolhos reefs of Brazil. In: U. Seeliger; B. Kjerfve. (eds.) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Berlin Heidelberg New York, Springer- Verlag*. p. 83-96.
- Leão Z.M.A.N., Kikuchi R.K.P., Testa V., 2003. Corals and coral reefs of Brazil. In: Cortés J (ed) *Latin America Coral Reefs*, Elsevier Publisher, Amsterdam, pp 9–52.
- Lisboa, D. S., Kikuchi, R. K. P., & Leão, Z. M. A. N. 2018. El Niño, sea surface temperature anomaly and coral bleaching in the South Atlantic: a chain of events modeled with a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123.
- Lisboa, D. S., Kikuchi, R. K. P., 2020. Will coral reefs in the North Atlantic Ocean bleach during the next season? A probabilistic answer. *Geophysical Research Letters*.
- Magris R.A., Déstro, G.F.G., 2010. Predictive modeling of suitable habitats for threatened marine invertebrates and implications for conservation assessment in Brazil. *Braz. j. oceanogr.* Vol.58.
- Marcot, B.G., Steventon, J.D., Sutherland, G.D., and McCann. R.K. 2006. Guidelines for developing and updating Bayesian belief networks for ecological modeling. *Can. J. For. Res.* 36., 3063-3074.
- Marshall P., Schuttenberg H., 2006. *A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching*. Published by: Great Barrier Reef Marine Park Authority, 178.
- McClanahan, T. R., Maina, J., Atewebehan, M. 2015. Regional coral responses to climate disturbances and warming is predicted by multivariate stress model and not temperature threshold metrics. *Climatic Change*, 1-14..
- Maskery, S.M., Hu, H., Hooke, J., Shriver, C.D., Liebman, M.N., 2008. A Bayesian derived network of breast pathology co-occurrence. *J. Biomed. Inform.* 41, 242-250.
- Muscatine, L., 1990. The role of symbiotic algae in carbon and energy flux in reef corals. In: Dubinsky, Z. (ed.) *Ecosystems of the world, Vol. 25, Coral reefs*. Elsevier, Amsterdam. p. 75-87
- Neapolitan, R.E., 2004. *Learning Bayesian Networks*. Prentice Hall, Upper Saddle River.

- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2012. NOAA's Integrated Assessment Program Washington, DC.
- Norris R. D., Kirtland S. T., Hull P. M. e Ridgwell A., 2013. Marine ecosystem responses to cenozoic global change, *Science*, 492.
- Norton, J.P., 2015. An introduction to sensitivity assessment of simulation models. *Environ. Model. Softw.*, 69, 166-174.
- Nyberg, J.B., Marcot, B.G., Sulyma, R. 2006. Using Bayesianbelief networks in adaptive management. *Canadian Journal of Forest Research* 36:3104-3116.
- Pearl, J., 1986b. Fusion, propagation and structuring in belief networks. *Artificial Intelligence* 29, 241-288.
- Pearl, J., 1988. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems*. Morgan-Kaufmann, San Mateo.
- Pearson, S.G., Storlazzi, C., van Dongeren, A.R., Tissier, M.F.S., Reniers, A.J.H.M., 2017. A Bayesian-based system to assess wave-driven flooding hazards on coral reef lined coasts, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 10,099-10,117.
- Plant, N. G., Holland, K. T., 2011. Prediction and assimilation of surf-zone processes using a Bayesian network. Part I: Forward models. *Coastal Engineering*, 58(1), 119–130.
- Poelhekke, L., Jager, W. S., van Dongeren, A. R., Plomaritis, T. A., McCall, R. T., Ferreira, O., 2016. Predicting coastal hazards for sandy coasts with a Bayesian network. *Coastal Engineering*, 118, 21–34.
- Pollino, C. A., Henderson C. 2010. *Bayesian networks: A guide for their application in natural resource management and policy*, Integrated Catchment Assessment and Management Centre, Fenner School of Environment and Society. Australian National University, Canberra.
- Refsgaard, J.C., Henriksen, H.J. 2004. Modelling guidelines – terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, 27, 71-82.
- Renken, H., Mumby, P.J., 2009. Modelling the dynamics of coral reef macroalgae using a Bayesian belief network approach. *Ecological Modelling* 220, 1305-1314.
- Russell, S., Norvig, P. 1995. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall Series in Artificial Intelligence.
- Sheppard C.R.C., 2003. Predicted recurrences of mass coral mortality in the Indian Ocean. *Nature* 425:294–297

- Sperotto, A., Molina, J.-L., Torresan, S., Critto, A., Marcomini, A., 2017. Reviewing Bayesian Networks potentials for climate change impacts assessment and management: a multi-risk perspective. *J. Environ. Manag.* 202, 320–331
- Strong, A. E., Arzayus, F., Skirving W., Heron S. F., 2006. Identifying coral bleaching remotely via Coral Reef Watch – improved integration and implications for climate change. Chapter 9 in *Coral Reefs and Climate Change: Science and Management*, American Geophysical Union.
- Suggett, D.J., et al. 2012. ‘Sea anemones may thrive in a high CO₂ world’, *Global Change Biology*, 18, 3015-3025.
- Uusitalo, L., 2007. Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecol. Model.* 203, 312–318.
- Uusitalo et al., 2015 L. Uusitalo, A. Lehtikoinen, I. Helle, K. Myrberg An overview of methods to evaluate uncertainty of deterministic models in decision support *Environ. Model. Softw.* 63, 24-31.
- Vega Thurber, R. L., Burkepile, D. E., Fuchs, C., Shantz, A. A., McMinds, R., Zaneveld, J. R., 2014. Chronic nutrient enrichment increases prevalence and severity of coral disease and bleaching. *Glob. Chang. Biol.* 20, 544–554.
- Verbruggen, H., Tyberghein, L., Pauly, K., Vlaeminck, C., Van Nieuwenhuyze, K., Kooistra, W.H.C.F., Leliaert, F., De Clerck, O. 2009. Macroecology meets macroevolution: evolutionary niche dynamics in the seaweed *Halimeda*. *Global Ecol. Biogeog.*, v. 18 (3), p.392-404.
- Weber M., de Beer D., Lotta C., Polerecky L., Kohls K., Abed R.M.M., Ferdelman T.G., Fabricius K.E., 2012. Mechanisms of damage to corals exposed to sedimentation. *Proc Natl Acad Sci USA* 109: 1558-1567
- Wooldridge, S., Done, T., 2004. Learning to predict large-scale coral bleaching from past events: a Bayesian approach using remotely sensed data, in-situ data, and environmental proxies. *Coral Reefs* 23, 96-108.
- Wooldridge, S., Done, t., Berkelmans, R., Jones, R. Marshall, P. 2005. Precursors for resilience in coral communities in a warming climate: a belief network approach. *Mar Ecol Prog Ser* 295: 157-169.
- Zhang, N.L., Poole, D., 1996. Exploiting causal independence in Bayesian network inference. *Journal of Artificial Intelligence Research* 5, 301-328.

CAPÍTULO 3

**WILL CORAL REEFS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN
BLEACH DURING THE NEXT SEASON? A PROBABILISTIC
ANSWER**

D. S. Lisboa^{1,2*}, R. K. P. Kikuchi¹

¹Coral Reef and Global Climate Change Research Group, Federal University of Bahia (UFBA), Rua Barão de Jeremoabo, Ondina, Salvador, 40170-115, Bahia, Brazil

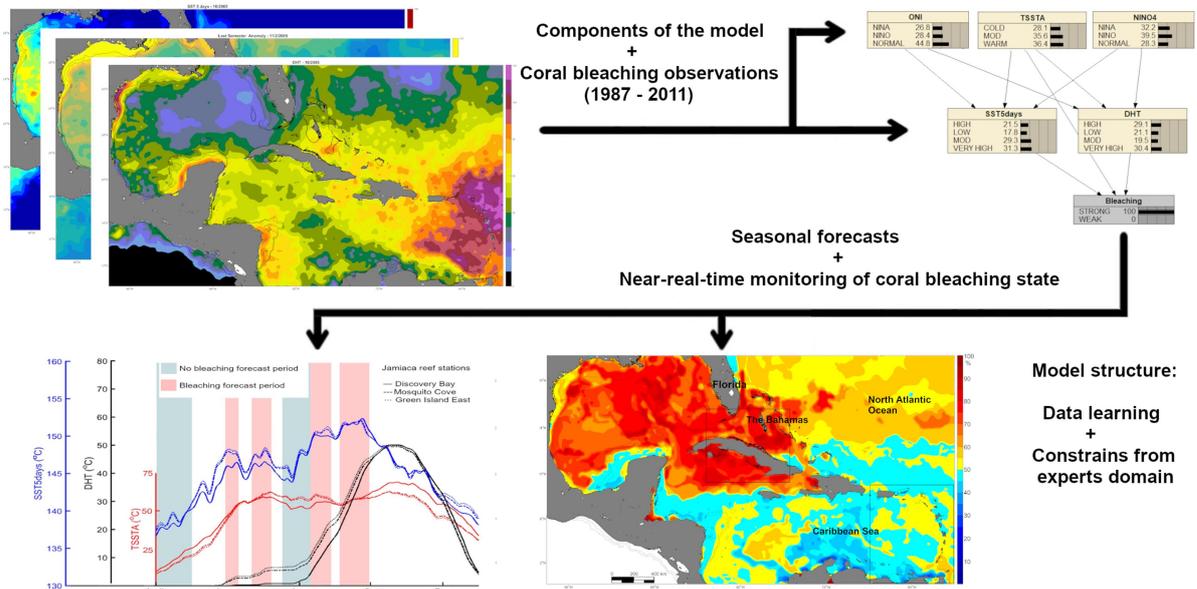
²Post-graduate Program in Geology, Federal University of Bahia (UFBA), Rua Barão de Jeremoabo s/n, Ondina, Salvador, 40170-115, Bahia, Brazil

* Danilo S. Lisboa (lisboa.ds@gmail.com) - Corresponding author

Ruy K. P. Kikuchi (kikuchi@ufba.br)

Key Points:

1. The relationships between El Niño, thermal anomalies and reef observations were used to construct coral bleaching seasonal forecast models.
2. A Bayesian machine learning approach was suitable for organizing five environmental variables based on historical bleaching occurrences.
3. Data mining and performance measures were undertaken to evaluate the feasibility of the model to perform short-term coral bleaching forecast.



Graphical abstract of the main steps undertaken to construct the seasonal coral bleaching forecast model for the North Atlantic Ocean reef areas. El Niño indicators and thermal indices related to reef bleaching observations (1987-2011) compose the database used both to establish the structure of the model (combined with the insertion of constraints) and to train it to provide forecasts of the occurrence of the phenomenon months in advance. After drawing attention to a potentially dangerous period for the corals, the model works by combining information from thermal indices in near-real-time to confirm (or not) the occurrence of bleaching in terms of probability conditioned by the historical occurrence.

Abstract

Coral bleaching in the North Atlantic Ocean was modeled based on the historical relationship between reef observations (1987 – 2011), El Niño indicators and thermal seawater anomalies. The model components were hierarchically organized into a Bayesian network structure according to their level of influence on coral bleaching to generate seasonal predictions to be confirmed (or not) by the near-real-time forecast at ~5 km scale. Validations and score steps, used as a criterion for comparison between competing models, proved the viability of the Bayesian approach to perform seasonal forecasts of the bleaching occurrence, achieving an overall hit rate of 84%. Custom models with databases restricted to specific situations are presented as an alternative to improve the accuracy levels but at the cost of the loss of predictive ability. The models were developed to be conceptually simple and useful tools to assist environmental management through an early warning system for coral bleaching.

Plain Language Summary

We developed a model capable of carrying out seasonal forecasts based on the assumption that coral bleaching in the North Atlantic Ocean is caused by a series of concatenated phenomena that begin with the El Niño phenomenon and manifest in the study area as sea surface temperature anomalies. Thus, we built a Bayesian network from the cause-effect relationships between a set of relevant environmental variables and coral bleaching observations collected over 24 years. The model presented a coherent ordering of variables that allowed over 80% accurate predictions of the coral bleaching occurrence. In addition, models constructed for specific situations were even more accurate, suggesting the applicability of the model as a potentially useful tool for performing reliable short-term coral bleaching predictions.

3.1 Introduction

Coral bleaching, defined as the breakdown of the symbiosis between corals and their endosymbiont dinoflagellates (Brown, 1997), is seen as the most prominent negative response of corals to climate change (Hughes et al., 2018). When this phenomenon affects corals on a large scale, it can cause morbidity and mortality over hundreds of kilometers (Hoegh-Guldberg, 1999), leading to significant alterations in reef community compositions (Loya et al., 2001) and, ultimately, threatening the future viability of reef ecosystems (Wooldridge et al., 2005). These deleterious effects have been widely observed in reefs worldwide, and their main cause, although other factors also trigger coral bleaching (e.g. coral diseases and nutrient stress; Vega Thurber et al., (2014)), is closely related to the relationship between El Niño and sea surface temperature (SST) anomalies (Hughes et al., 2018). For the North Atlantic Ocean (NAO) this relationships are most pronounced with a time delay of a few months (Klein et al., 1999), and has triggered recurrent severe bleaching events in recent decades (Hughes et al., 2018), so the appropriate methodology to address multifactorial problems is of crucial relevance to achieve effective management alternatives.

The considerable amount of coral bleaching observations undertaken in recent decades, in addition to the large availability of remote marine data, provide a valuable opportunity for the development of management support tools based on historical occurrence, using, for example, machine learning techniques (e.g., Wooldridge et al., 2004). The choice of the Bayesian approach for coral bleaching modeling, a highly variable phenomenon on temporal and spatial scales, stems from the ability to use a probabilistic approach to describe a process with functions that are not yet fully understood by assigning reliability levels to a set of relevant variables. Thus, Bayesian networks (BNs) can be considered appropriate decision support tools that, in addition to facilitating the conceptualization of the system from the available information, allow the incorporation of the effects of the uncertainties in a formal evaluation of the possible outcomes (Korb and Nicholson, 2003).

The construction of a model able to carry out forecasts months in advance comes from the need to assist environmental managers through an early warning system able to provide sufficient time to plan field campaigns and possible mitigation actions (a formal evaluation of management outcomes can be found at Ban et al., 2014). The present research, therefore, aims to employ a large dataset of coral bleaching observations in the NAO collected over 24 years to construct and train a BN model capable of performing seasonal coral bleaching forecasts. In addition, this research intends to describe how subsampling reef observations from particular regions and periods could be used to train alternative BNs to generate more reliable predictions to be used in specific situations.

3.2 Data and methods

3.2.1 Components of the model and data availability

The specific clustering of variables used in the present research was selected for its ability to represent the theoretical assumption under which the model is sustained: coral mass bleaching is the final result of a chain of subsequent events that begins with the El Niño phenomenon and manifests in the study area a few months later in the form of positive SST anomalies. This logic

proved to be extremely efficient in predicting bleaching for a control case (Abrolhos reef in the South Atlantic Ocean; Lisboa et al., 2018), and our intention here also refers to the formalization of directives for all reef areas in the Atlantic Ocean.

The bleaching data concerning our study area (equatorial portion of the North Atlantic Ocean: 10°N - 30°N, 60°W - 98°W) were obtained from the global-scale coral bleaching database developed by Donner et al., (2017) (<http://www.simondonner.com/bleachingdatabase>). Before being used, quality control procedures were performed, and data with insufficient information were discarded (at least geographical coordinates, month of occurrence, and percent bleaching must be present). Field observations on the same date and located in the same cell of the SST data matrix were classified as replicates, and only their modal values were considered. This methodological choice is based on the assumption that rather than trying to predict reef-to-reef variability or variability between areas of the same reef, the model aims to predict bleaching at relatively large temporal and spatial scales (i.e., the model was trained from monthly data with a spatial resolution of ~5 km to generate monthly bleaching probability outputs). We considered that the model's parsimony was paramount by keeping the model as simple as possible while keeping the number of variables, as well as their states, layers and links, as minimal as possible.

In addition to the bleaching information, five environmental variables related to El Niño and thermal anomalies composed the model input dataset. The Oceanic Niño Index (ONI; Hoerling & Kumar, 2000) and NINO4 index (Ashok et al., 2007) are SST indices based on observations from adjacent regions in the tropical Pacific Ocean (available at <https://www.esrl.noaa.gov/psd>) that were chosen as model components to monitor the occurrence, intensity and type of El Niño events (i.e., Canonical or Modoki). These indices were used with a time lag determined by conditional dependency analysis and comparison between validation results (similar metrics in Lisboa et al., 2018; cross-correlation analysis in Klein et al., 1999).

Daily SST data (~5 km) from the Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (Donlon et al., 2012; available at <https://accession.nodc.noaa.gov/GHRSST-OSTIA-UKMO-L4-GLOB>) were used to calculate the thermal indices according to the following equations:

$$DHT = \sum_n^{n-89} SST_n - TT \quad \text{Equation 1}$$

$$SST5 \text{ days} = \text{Max} \sum_n^{n-4} SST_n \quad \text{Equation 2}$$

$$TSSTA = \sum_n^{n-89} SST_n - \text{Clim}_{mont} (SST) \quad \text{Equation 3}$$

The degree heating trimester (DHT; Equation 1) was developed based on the standard global predictor of bleaching: degree heating weeks (Strong et al., 1997). These indices, which are responsible for tracking the accumulation of thermal stress over time, are based on the bleaching threshold temperature (TT; Equation 1 and Figure S1 in the Supporting Information (SI)), which represents the thermal limit above which corals suffer the effects of thermal stress (further details about the DHT metric are provided in Lisboa et al., 2018).

The other local thermal indicator, chosen by its recognized association with bleaching events (e.g., Berkelmans et al., 2004; Wooldridge et al., 2004), refers to the SST accumulated

over consecutive days. The SST5days index represents the short and strong positive anomalies necessary to trigger bleaching and was calculated from the maximum values across five consecutive days in the three months immediately preceding the bleaching observation (Equation 2).

The last thermal indicator refers to the trimester SST anomaly based on monthly climatology with a temporal lag of six months (TSSTA – Equation 3). This index was calculated in such a way as to consider the thermal conditions operating during the last opposing season, starting from the assumption that the reality observed in the field might have been influenced by previous anomalous conditions.

3.2.2 Development of the BN model

The following standard procedures were adopted for the construction of the models: 1- Discretization of input data; 2- Definition of the model structure; 3- Calculation of conditional probabilities; and 4- Sensitivity analysis and validation. Similar metrics with further details about each of the steps can be found in the paper by Lisboa et al. (2018).

Before they can be used, the numerical values of the input dataset must be converted into mutually exclusive intervals corresponding to the classes of the variables (e.g., cold/mod/warm classes of the TSSTA index in Figure 1b). This procedure was developed based on the frequency of occurrence of the measurements in Belief Network Power Constructor software (BNPC; available at <http://www.cs.ualberta.ca/~jcheng/bnpc.htm>; Cheng, 1998). The number of classes of each variable was determined empirically by comparing the hit rates of each possible combination.

The model architecture was developed based on the dependency analysis algorithm (BNPC; Cheng et al., 2002) that measures the information flow among variables to establish connecting arcs between them and the intensity of these connections. In addition, the following constraints were inserted to refine the model architecture: 1 – The structure of the network must respect the temporal order of events. That is, past variables cannot be influenced by future occurrences. 2 – Because the study area is in a remote location, El Niño indicators cannot directly influence bleaching. 3 – The Bleaching node cannot influence the other nodes of the network; thus, it is a leaf node.

The next step refers to the determination of the conditional probability tables, which represent the propensity of a variable to assume a specific state, given the states of the other variables. We calculated the conditional probabilities by applying the expectation and maximization algorithm within the model input dataset (Gupta & Chen, 2010) in Netica 5.18 (available at www.norsys.com).

The last stage refers to the validation procedures that seek to assign the reliability and accuracy of the models. The following procedures of machine learning were used as performance measurements, which were employed to compare the test results and competing models and will be only briefly described here. 1- Leave-one-out cross-validation exposes the accuracy of the models regarding the prediction correctness by taking the most likely state as the prediction and excludes each case (one at a time, independently) before performing the forecast for the excluded observations. 2- Scoring functions that are defined as measures of calibration of a probabilistic forecast set that considers the actual belief levels when determining how well they match the actual cases (Bickel, 2007). 3- The area under the receiver operating characteristics curve

(AUROC) is a measure that considers information such as specificity and sensitivity to generate visualizations of the level of accuracy of forecasts (Dorfman, et al., 1996). 4- Sensitivity analyses and tests are analyses under the query node (bleaching) that investigate the degree of influence of each variable on the bleaching probability and changes in the strength of believing in the correct forecasts for competing models.

3.3 Results and Discussions

3.3.1 Features and components

The architecture common to all models (Figure 1b) presented an intricate configuration formed by the maximum of possible arcs, suggesting the following: 1- these variables exhibit complex relationships during bleaching events; and 2- the direct link for all three local thermal indicators indicates that bleaching can be modeled by monitoring the thermal condition of seawater in previous months with complementary indicators (examples of the three thermal indicators in temporal series for reef stations are shown in Figure 3; maps for October 2005 are presented in SI Figures S2, S3 and S4; and daily maps for 1998 and 2005 are presented in Animated Maps S1 – S6). The SST5days variable tracks the short and intense positive anomalies, usually occurring early in the summer, which can trigger a highly predictable bleaching pattern (Berkelmans et al., 2004). The DHT represents the amount of active heat over the last 90 days capable of intensifying the extent and severity of coral bleaching (Lisboa et al., 2018). These two indices have the highest levels of influence on the bleaching state (sensitivity analysis in Figure 1d). The influence of the ONI and NINO4 index occurs only indirectly and with a temporal lag of eight months, and when combined with the TSSTA, which has a temporal lag of six months, these variables give the model the ability to make seasonal forecasts.

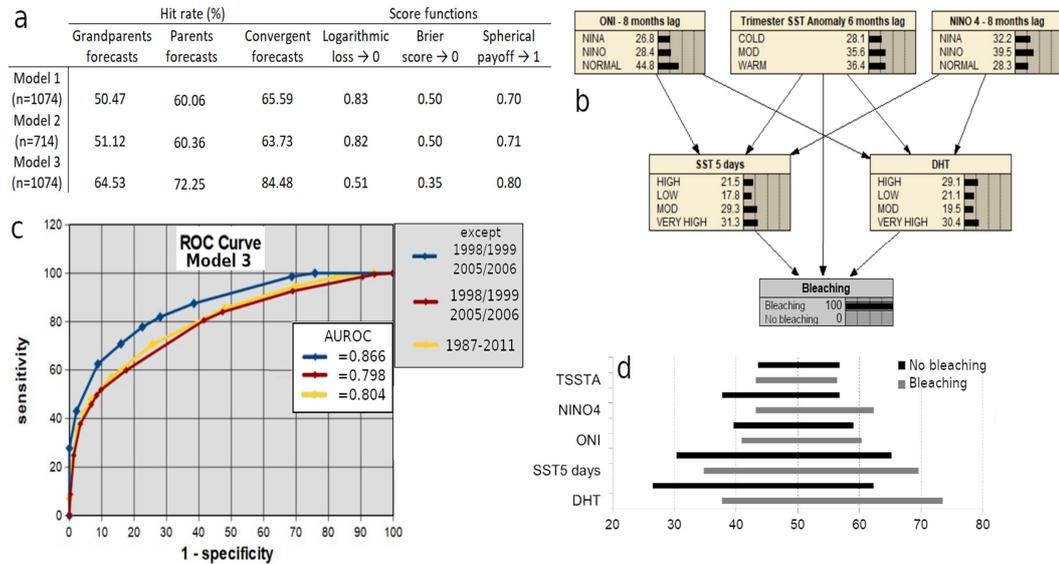


Figure 1. (a) Models hit rates for the three forecasting analyses performed, and the score function values used as a criterion for comparison between the models. (b) BN graphical structure with the table of probabilities (bars and numerical values) conditioned by "Bleaching" events (the query node is treated as a finding). The model conditioned by "No bleaching" events is presented in SI Figure S9. (c) Curves of the receiver operating characteristics used as comparison criteria between the performances in different time windows. (d) Sensitivity analysis to determine the degree of influence of the environmental variables on the bleaching state. The gray (black) bars represent the amplitude of the variation in the probability of occurrence of a "Bleaching" ("No bleaching") event according to changes in the nodes observed on the Y-axis.

3.3.2 Coral bleaching input datasets

One hundred and seventy-four coral bleaching observations concerning different reefs within our study area (geographic locations in SI Figure S1) from the period from 1987 to 2011 were classified according to the percentage of bleached colonies in each category and used as the input dataset: "Mild" (less than 10% of bleached colonies - 478 observations), "Moderate" (between 10% and 50% of bleached colonies - 358 observations), and "Severe" (more than 50% of bleached colonies - 238 observations). These data were essentially unbalanced, not only between categories but also over time/space. Although we know that the imbalance between categories can express real differences in their frequency of occurrence, for modeling purposes, this imbalance may compromise the predictive ability for the less frequent categories. To address this imbalance, additional competing models (models 2 and 3) were trained from balanced datasets according to two procedures: for model 2, a random sample of observations was selected (714 instances in total) containing the same number of instances for each bleaching category; for model 3, the "Moderate" and "Severe" categories were merged into a single category regarding the presence of bleaching. Although it results in relevant simplification, this procedure was adopted to design a parsimonious model, which uses as many observations as possible (no data were suppressed), to generate more reliable and accurate predictions (measures presented in subsection 3.3).

To address the issue of the concentration of data in the "Moderate" and "Severe" categories from the years 1998/1999 and 2005/2006 (88% of observations; yearly maps of observations discriminated by the model's forecasting capacity, SI Figures S5-S8), additional validation procedures that considered the data within and outside these time windows were performed. Hit rates (SI Table S1) and values of AUROC (Figure 1c) demonstrated that the predictive capacity of the model is not restricted to periods of higher data occurrence.

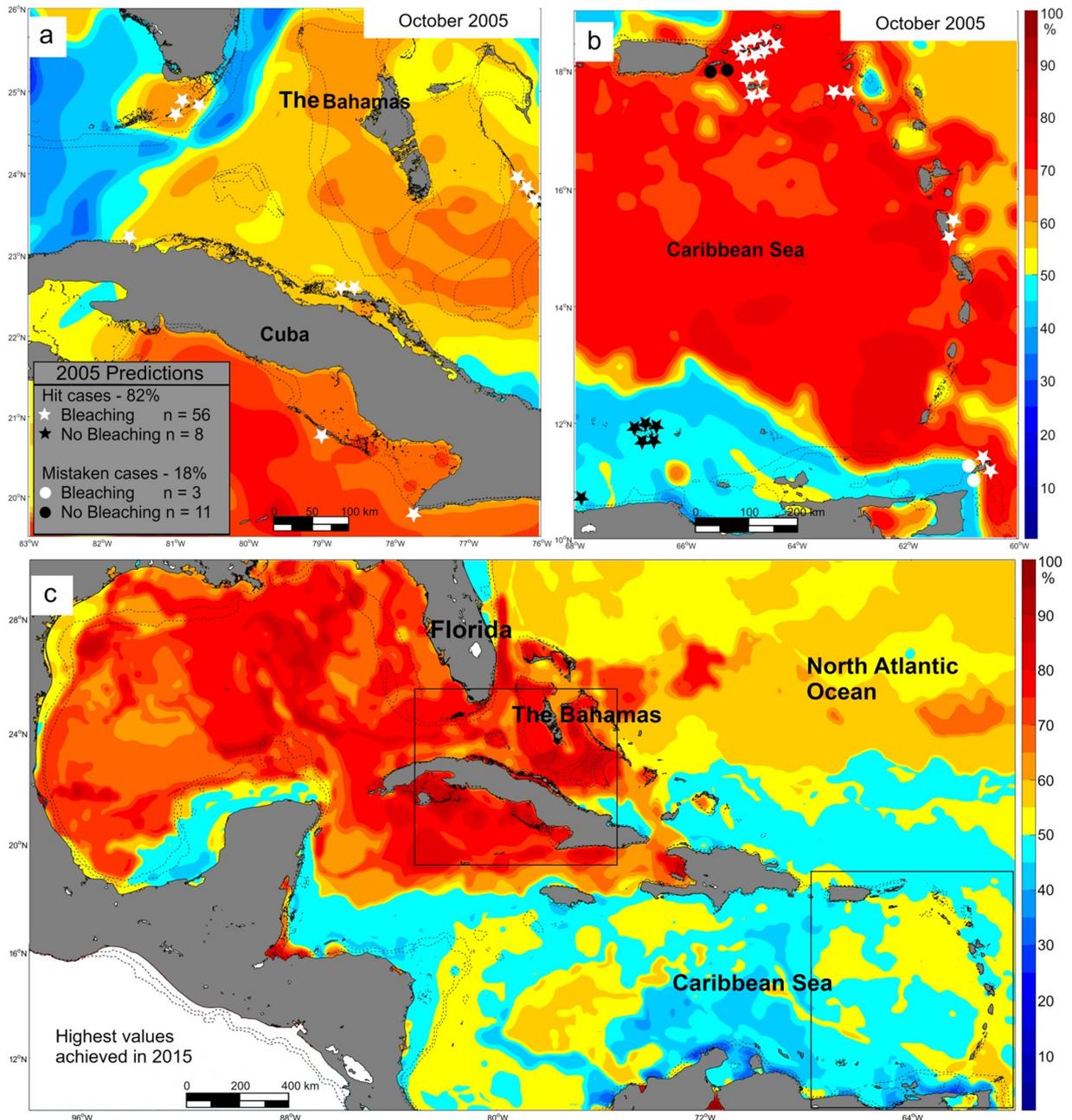


Figure 2. Smoothed maps of the coral bleaching probabilities constructed from the combined information of the thermal indicators of the model (DHT, SST5days and TSSTA) and their respective relationships with in situ bleaching data collected over 24 years. Examples for October 2005 in (a) and (b) with white (black) stars showing

the locations of the "Bleaching" ("No bleaching") observations that the model was able to hit. The same analysis was performed for cases in which the model missed the prediction, as shown by circles on the map. For this particular month, the model presented 82% accuracy (black and white stars), with approximately 78.5% mistaken predictions referring to false positives (black circles). (c) Smoothed map of the maximum coral bleaching probabilities reached in 2015, when coral bleaching was considered a global event, showing even higher values for the region plotted in (a) and significantly lower values for the region plotted in (b) than those in 2005 (areas are highlighted in rectangles for easy comparison).

3.3.3 Validation procedures

The validation procedures were used as criteria for comparison (and selection) between tests and competing models. The agreement levels in terms of correct prognostics of observed coral bleaching categories were assessed in three ways: 1- considering the information of the grandparent nodes related to the seasonal forecast (the parent nodes are treated as unknowns); 2- considering the information regarding the parent nodes, related to near-real-time predictions; and 3- considering only the instances in which the parent and grandparent nodes have the same prognosis.

The hit rates achieved by competing models show a relevant evolution in the accuracy among the tests conducted (from column 1 to 3 at Figure 1a), particularly when considering the cases in which near-real-time thermal forecasting confirmed the seasonal prediction previously performed by El Niño indicators (overall hit rate of 84.48% for model 3). For this model, all variables showed significant influence on the state of bleaching (Figure 1d), as they were able to redefine the diagnosis of the model. Detail analysis on two distinct sensitivity tests (further details SI Figures S10 and S11), as well as the validation per bleaching category (SI Table S2), shows that balancing the database (i.e. from model 1 to model 2) promoted an increase in the ability to forecast "Severe" events, but not "Moderate" and led to a loss in "Mild" cases. This is important because points to the feasibility of modeling the occurrence of bleaching, rather than its severity. In addition, improved scores reached in all measurements justified the selection of model 3 (referred to as the general model from now on) for more detailed analysis and to serve as a basis for the design of alternative models.

3.3.4 Custom model development

The construction of BNs from a subsampling technique results from a data mining process that evaluates the spatial and temporal arrangement of bleaching observations according to the predictions (monthly forecast maps for 1998 and 2005 in SI Animated Maps S7 – S8). Taking the 78 reef reports from October 2005 as an example, as the reef observations showed high representativeness during this period (the most expressive regions in Figure 2a and 2b), 59 of these records reported "Bleaching", with 56 of them (approximately 95%) being correctly predicted by the model. When these data were used as a past analog for comparison with the probability values reached in 2015 (Figure 2c), it is notable that the forecasts indicate even more intense probabilities of bleaching around Florida, the Bahamas and Cuba than in 2005. Indeed, reports of severe bleaching in these regions during 2015 led to the declaration of the third-ever global bleaching event on record (Hughes et al., 2018). When analyzing the consistency of forecasts for the whole period (maps can be found in the online repository), it is clear that most of the mistaken cases refer to observations collected from nearby reefs and those with contrasting information regarding the reported bleaching category. This phenomenon is probably due to the

erratic bleaching pattern combined with the lack of spatial resolution of the SST data required to monitor these processes at the reef level. Moreover, these mistaken predictions show that the model is not particularly vulnerable in remote regions, as was expected because of the low availability of bleaching data.

To evaluate the possibility of improving the model's efficiency, subsets of samples from the reefs of Florida, Cuba, Belize and Jamaica, as well as subsets of samples from El Niño years (canonical or Modoki; see Karnauskas 2013 to distinguish the different El Niño types), were used to construct custom BNs. The results of the validation and scoring steps (Table 1; SI Table S3; spatial disposition and AUROC in Figure S12; sensitivity analysis in Figure S13) show significant advantages over the general model in all tests, in particular for the convergent predictions, showing considerable decreases in the error rates that are not necessarily reflected as increases in the correctness levels on account of the loss of prediction power. At this point, it is emphasized that as the size of the database decreases, the model loses its prediction ability (Table 1; and the lack of background colors in Figure 3), and the adjustment mechanism can result in overfitting (Cheng et al., 2002). On the other hand, the subsampling technique offers advantages by calculating the probability distribution and discretizing the variables conditioned on only the local bleaching history (numerical intervals corresponding to the categories of all variables can be found in SI Table S4).

Table 1. Comparison of the performance measures of the general model with the custom models. Blue indicates relatively high scores when compared to red (column three vs. column two and columns 4 through 8 compared with the last row).

Database (Observations)	Bleaching convergent forecast		Predictability power (%)	Score functions		
	General BN Error (%)	Custom BN Error (%)		LL* 0←∞	BS* 0←2	SP* 0→1
Jamaica (36)	12.50	6.67	43.9	0.05	0.04	0.98
Belize (82)	18.00	7.30	56.1	0.27	0.17	0.90
Cuba (106)	25.00	0.00	58.54	0.38	0.25	0.86
Florida (259)	16.46	14.55	56.1	0.45	0.30	0.83
Can.* (565)	26.45	20.81	85.36	0.51	0.35	0.80
Modoki (959)	27.89	18.65	95.12	0.50	0.33	0.80
Gen.* (1074)	15.23	-	100	0.51	0.35	0.80

*Note. LL – Logarithmic Loss; BS – Brier score; SP – Spherical payoff; Can – Canonical; Gen – General; AUROC – Area under the receiver operating characteristics curve.

The time series shows the variation in the bleaching parent nodes (thermal indices DHT, SST5days and TSSTA) during 2005 for reefs located around Jamaica and Cuba (Figure 3), highlighting the periods according to the respective prognosis of the models (background color). The uncolored areas in the graphs show the periods in which the models were not able to generate predictions because no such conditions were present in the database, which highlights the crucial

role of consistent field data over time. It is noteworthy that in both regions, the SST5days index peaked in early summer was considered sufficient to trigger bleaching by the different models, which probably intensified in August and September because of the accumulated heat measured by the DHT index (the hit rates for this specific period were Jamaica = 85.71%; Cuba = 72.73%)

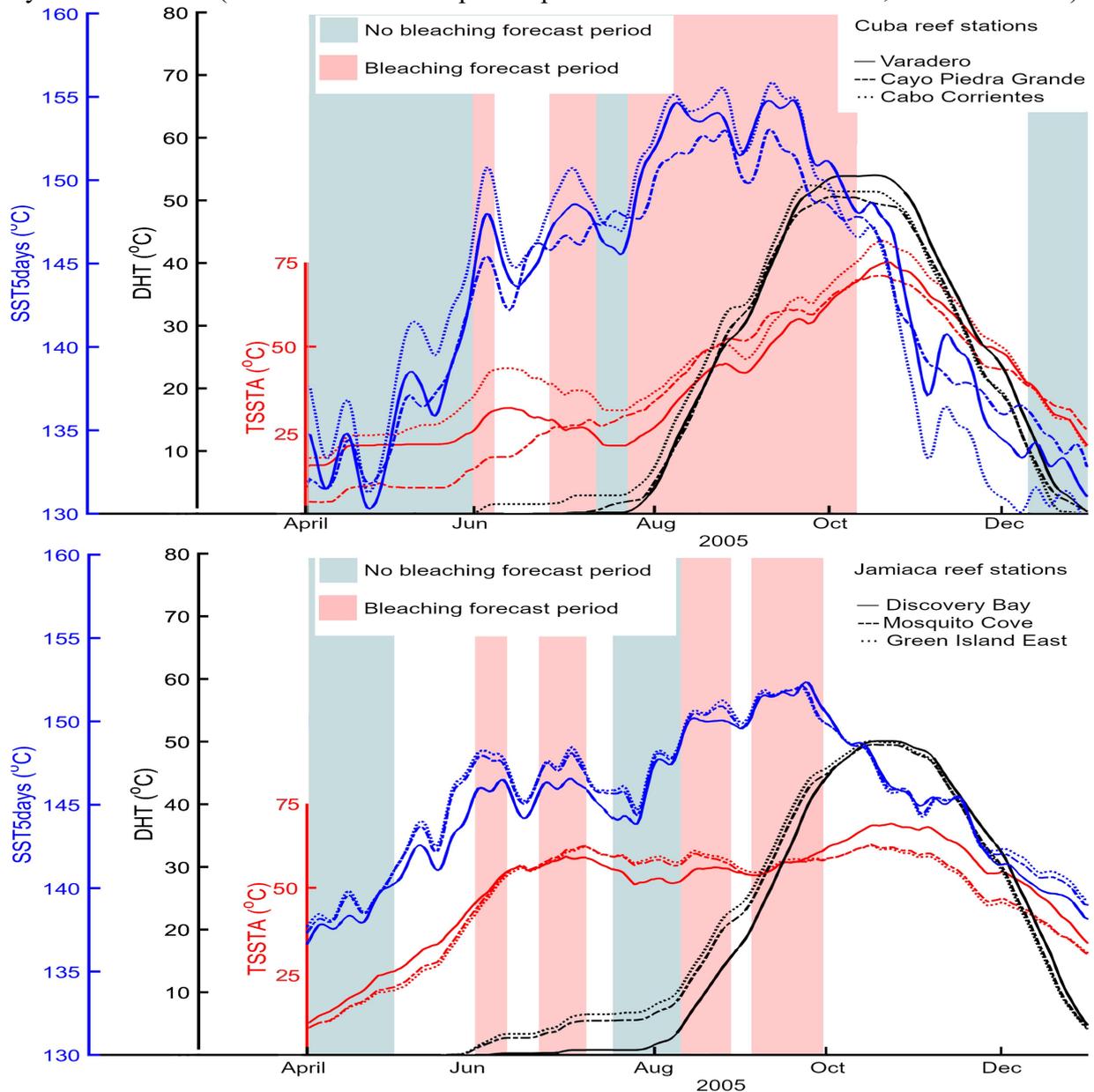


Figure 3. Time series of the reef stations located around Cuba (upper) and Jamaica (lower) for the TSSTA (red), DHT (black) and SST5days (blue) for 2005, when severe bleaching levels were reported not only in these reefs but also in a large part of the study area. The hot (cold) color of the background represents the periods when the models predicted the occurrence of bleaching (no bleaching).

3.4 Conclusions

In the present study, we wanted to demonstrate that coral bleaching in the North Atlantic Ocean is a modellable pattern when a combination of regional and remote forcings related to present and recent conditions is used. Although this is only one of many possible combinations of variables, through testing and validation procedures, we have shown that this approach is particularly suitable for predicting bleaching occurrence with months in advance. Custom models trained with restricted data from specific periods and regions (i.e., examples of models built specifically for the El Niño years, either canonical or Modoki, and for reefs around Jamaica, Belize, Cuba, and Florida) represent alternatives to improve the accuracy of the predictions.

As more detailed observational data becomes available, the model can be updated and refined to more accurate spatial/temporal resolutions, which would inevitably promote an improvement in the quality of the forecasts. Finally, we believe that the model developed here represents a useful resource for coral reef scientists, governments, and reef managers not only for its practicality to inform bleaching, but also for the possibility to promote a shared understanding through the graphic representation of the network about the main process responsible for it.

3.5 Acknowledgments, Samples, and Data

All the custom code written in MATLAB R2015a, animated maps for the components and predictions of the model, as well as all the files used to construct, train and validate the models are available at <https://data.mendeley.com/datasets/7jcpt6ppbw/4>. We thank Dr. Marilia D. M. Oliveira and Dr. Ricardo Rios for their inputs on the first draft of this manuscript. We also thank the two anonymous reviewers for their insightful contribution to this final form of the paper. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001, and by the National Institute of Science and Technology for the Tropical Atlantic Environments (inctAmbTropic) under grant no. CNPq 465634/2014-1. RPKK benefits from a CNPq fellowship (PQ-1C).

3.6 References

- Ashok, K., Behera, S., Rao, S., Weng, H., Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.*, 112(10.1029), 1–3; 9–10; 38
- Ban, S. S., Pressey, R. L., & Graham, N. A. J. (2014). Assessing interactions of multiple stressors when data are limited: A Bayesian belief network applied to coral reefs. *Global Environmental Change*, 27, 64–72.
- Berkelmans, R., De'ath, G., Kininmonth, S., & Skirving, W. J. (2004). A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: Spatial correlation, patterns, and predictions. *Coral Reefs*, 23, 74–83.
- Bickel, J. E. (2007). Some comparisons among quadratic, spherical, and logarithmic scoring rules. *Decision Analysis*, 2, 49–65.
- Brown, B. E. (1997). Coral bleaching: Causes and consequences. *Coral Reefs*, 16, 129–138.
- Brown, B. E., Dunne, R. P., Goodson, M. S., & Douglas, A. E. (2002). Experience shapes the susceptibility of a reef coral to bleaching. *Coral Reefs*, 21, 119–126.

- Cheng, J., 1998, "PowerConstructor System". <http://www.cs.ualberta.ca/~jcheng/bnpc.htm>
- Cheng, J., Griener, R., Kelly, J., Bell, D., & Liu, W. (2002). Learning Bayesian networks from data: An information-theory based approach. *Artificial Intelligence Magazine*, 137, 43–90.
- Donlon, C. J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., & Wimmer, W. (2012). The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system, *Remote Sens. Environ.*, 116, 140–158.
- Donner, S. D., W. J. Skirving, C. M. Little, M. Oppenheimer, and O. Hoegh-Guldberg. (2005). Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Global Change Biology* 11:2251–2265.
- Donner, S.D., Rickbeil, G.J.M., Heron, S.F. (2017). A new, high-resolution global mass coral bleaching database. *PLoS ONE* 12(4): e0175490.
- Dorfman DD, Berbaum KS, Metz CE, Lenth RV, Hanley JA, and Abu Dagga H (1996). Proper receiver operating characteristic analysis: the bigamma model. *Academic Radiology*, 4, 138-149.
- Eakin, C.M., Lough, J.M., and Heron, S.F. (2009) Climate Variability and Change: Monitoring Data and Evidence for Increased Coral Bleaching Stress. In *Coral Bleaching*, van Oppen MJH and Lough JM eds. *Ecological Studies* 205: 41-67.
- Eakin, C. M., Liu, G., Gomez, A. M., La Cour, J. L. D., Heron, S. F., Skirving, W. J., et al. (2016). Global coral bleaching 2014–2017? Status and an appeal for observations. *Reef Encounter*, 31(1), 20–26.
- Gupta, M. R., & Chen, Y. (2010). Theory and use of the EM algorithm. *Foundation Trends in Signal Processing*, 4, 223–296.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research* 50:839–866
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., et al. (2007), Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318(5857):1737-1742.
- Hoerling, M. P., & Kumar, A. (2000). Understanding and predicting extratropical teleconnections related to ENSO. In H. F. Diaz & V. Markgraf (Eds.), *El Niño and the southern oscillation: Multi-scale variations and global and regional impacts*, 57–88.
- Hruschka, J. R. E. R., Hruschka, E. R., & Ebecken, N. F. F. (2003). A feature selection 'bayesian approach for extracting classification rules with a clustering genetic algorithm. *Applied Artificial Intelligence*, 17(5–6), 489–506.
- Hughes, T. P. et al. (2018), Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene. *Science*, 359, 80–83.
- Karnauskas K. B. (2013). Can we distinguish canonical El Niño from Modoki? *Geophys. Res. Lett.*, 40(19), 5246–5251.
- Klein, S. A., Soden, B. J., & Lau, N. (1999). Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *Journal of Climate*, 12, 917–932.

- Korb, K. B., & Nicholson, A. E. (2003). *Bayesian artificial intelligence*. London, UK: Chapman & Hall.
- Lisboa, D. S., Kikuchi, R. K. P., & Leão, Z. M. A. N. (2018). El Niño, sea surface temperature anomaly and coral bleaching in the South Atlantic: a chain of events modeled with a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123.
- Loya, Y., K. Yamazato, Y. Nakano, H. Sambali, R. van Woesik (2001). Coral bleaching: the winners and the losers. *Ecol. Lett.* 4, 122–131.
- Neapolitan, R. E. (2004). *Learning Bayesian networks*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Strong, A. E., Barrientos, C. S., Duda, C., & Sapper, J. (1997). Improved satellite techniques for monitoring coral reef bleaching. In *Proceedings of 8th international coral reef symposium*, 2, 1495–1498.
- Vega Thurber, R. L. et al. (2014). Chronic nutrient enrichment increases prevalence and severity of coral disease and bleaching. *Global Change Biology*. 20, 544–554.
- Wooldridge, S., & Done, T. (2004). Learning to predict large-scale coral bleaching from past events: A Bayesian approach using remotely sensed data, in-situ data, and environmental proxies. *Coral Reefs*, 23, 96–108.



Geophysical Research Letters

Supporting Information for

Will coral reefs in the North Atlantic Ocean bleach during the next season? A probabilistic answer

D. S. Lisboa^{1,2*}, R. K. P. Kikuchi¹

¹Coral Reef and Global Climate Change Research Group, Federal University of Bahia (UFBA), Rua Barão de Jeremoabo, Ondina, Salvador, 40170-115, Bahia, Brazil, ²Post-Graduate Program in Geology, Federal University of Bahia (UFBA), Rua Barão de Jeremoabo s/n, Ondina, Salvador, 40170-115, Bahia, Brazil

Contents of this file

Methods for construction of custom-made BN models.

Figures S1 to S11.

Tables S1 to S2.

Captions for the animated maps S1 to S8

Methods for construction of custom-made BN models

The differentiation between the models is due exclusively to their input databases. For regional models (i.e. Cuba, Jamaica, Belize and Florida) only data on local reefs were taken into account for the construction of the respective input databases. To models constructed specifically for the El Niño years (if Canonical or Modoki) the bleaching data for the entire study area were considered (an equatorial portion of the North Atlantic Ocean: 10°N - 30°N, 60°W - 98°W) taken into account the periods classified according to the type of El Niño (Karnauskas et al., 2013). In other words, for the Canonical model, data from all years excluding El Niño Modoki years were considered, just as for the Modoki model all years were considered except the Canonical years.

Matlab files, text files and spreadsheets containing the input databases of all models can be found in supplementary materials.

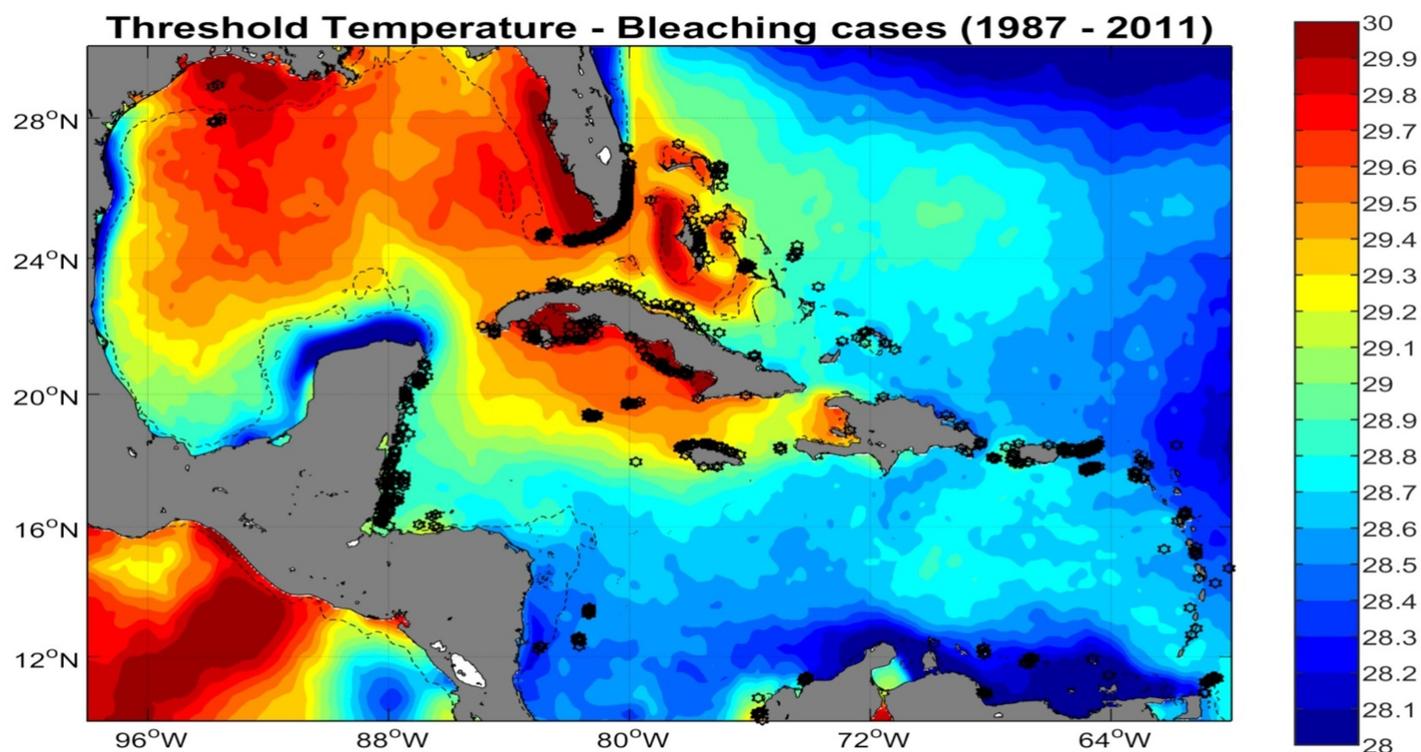


Figure S1. Map of threshold temperature (°C), calculated from monthly climatological maximum temperatures (1985 – 1994; 1992 and 1993 were omitted). It represents the thermal threshold above which temperature is classified as causing thermal stress for corals (details in Strong et al., 1997). The black stars show the geographic disposition of coral bleaching observations (1987-2011) used as the Bayesian network input dataset.

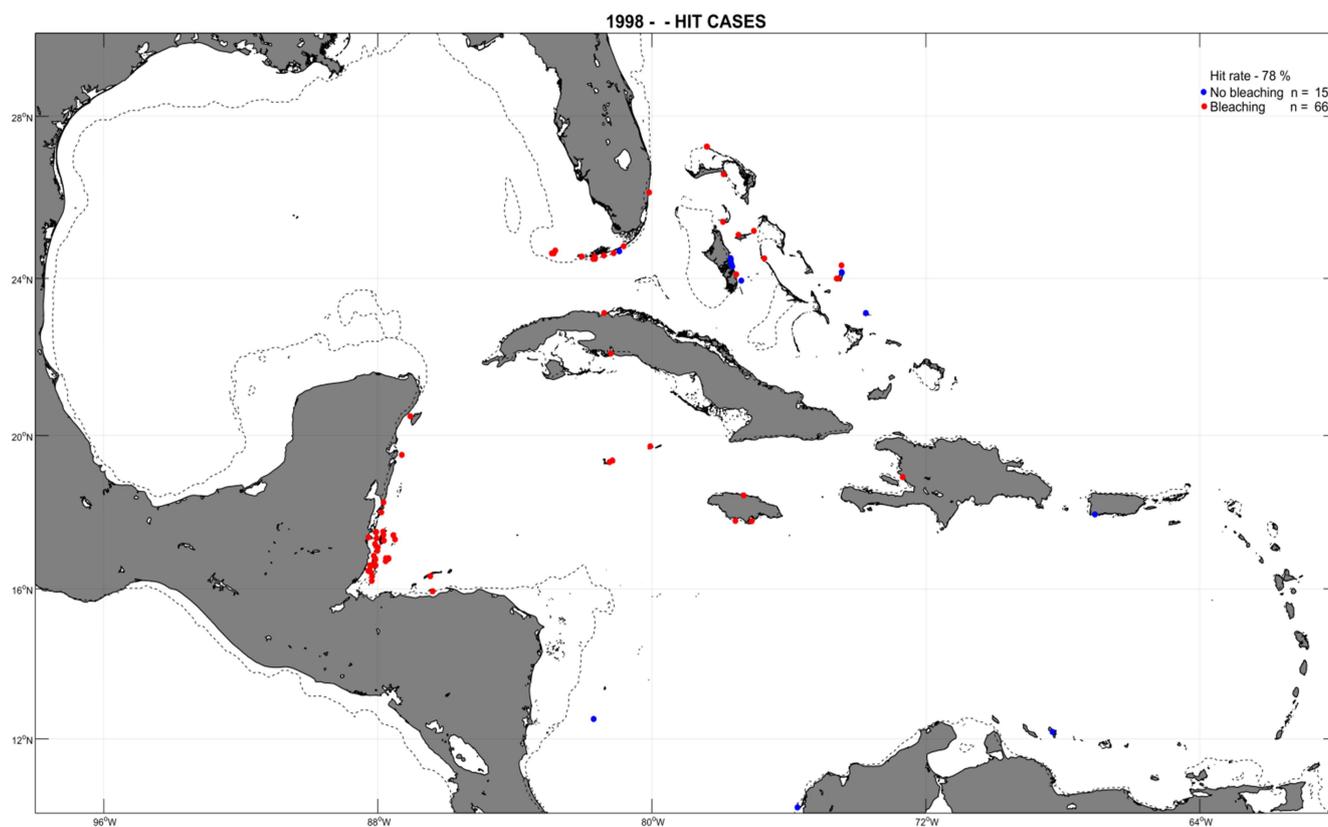


Figure S2. Geographic locations of coral bleaching observations of 1998 that the model was able to hit discriminated according to the category of bleaching observed in the field. The number of samples and the model's hit rate can be seen in the top right corner.

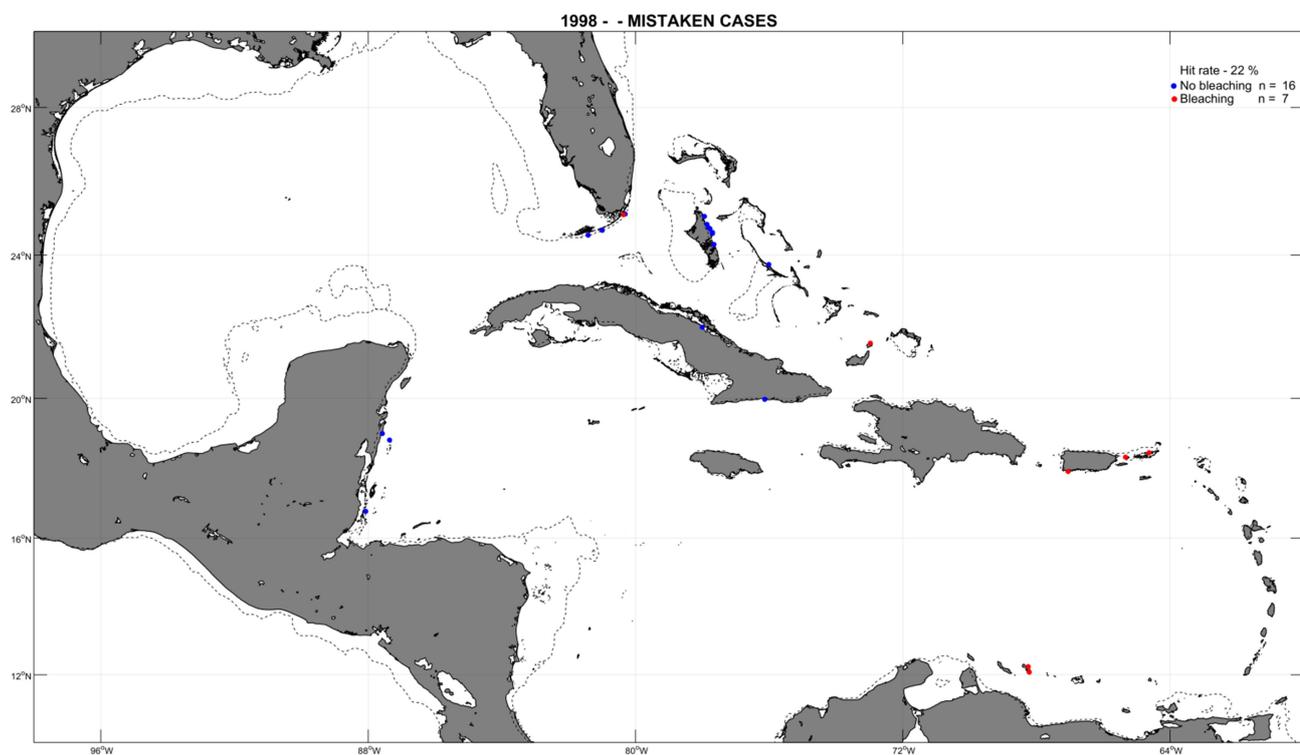


Figure S3. Geographic locations of coral bleaching observations of 1998 that the model wasn't able to hit, discriminated according to the category of bleaching observed in the field. The number of samples and the model's error rate can be seen in the top right corner.

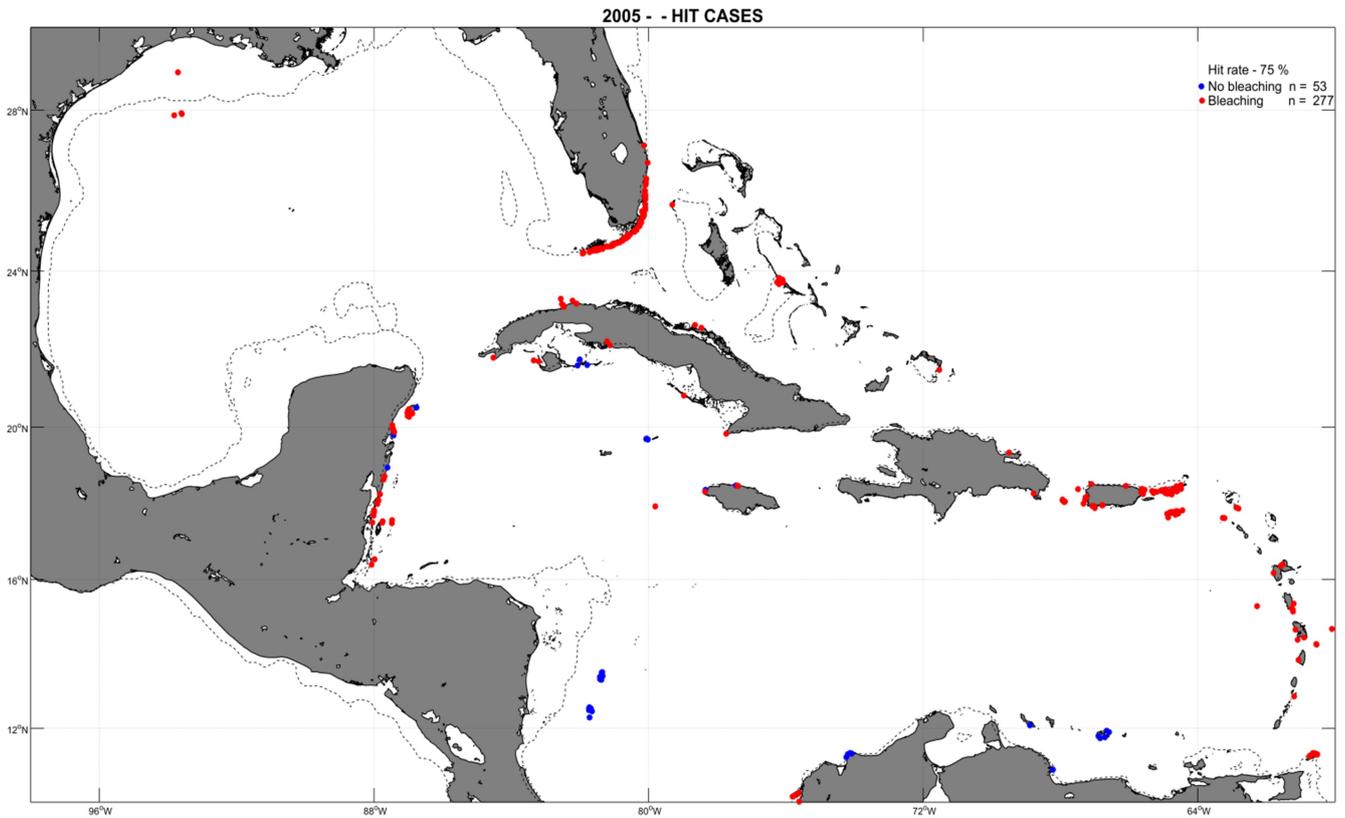


Figure S4. Geographic locations of coral bleaching observations of 2005 that the model was able to hit, discriminated according to the category of bleaching observed in the field. The number of samples and the model's hit rate can be seen in the top right corner.

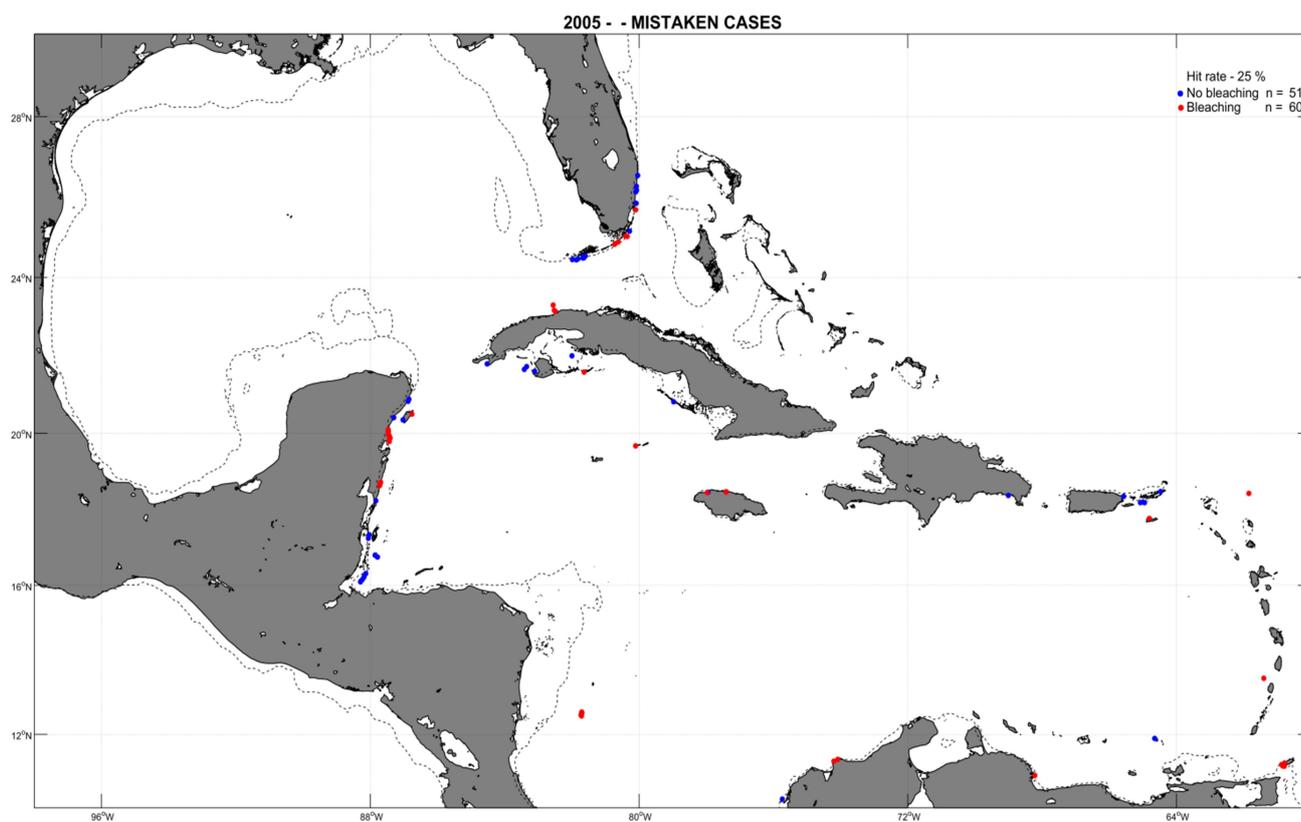


Figure S5. Geographic locations of coral bleaching observations of 2005 that the model wasn't able to hit, discriminated according to the category of bleaching observed in the field. The number of samples and the model's error rate can be seen in the top right corner.

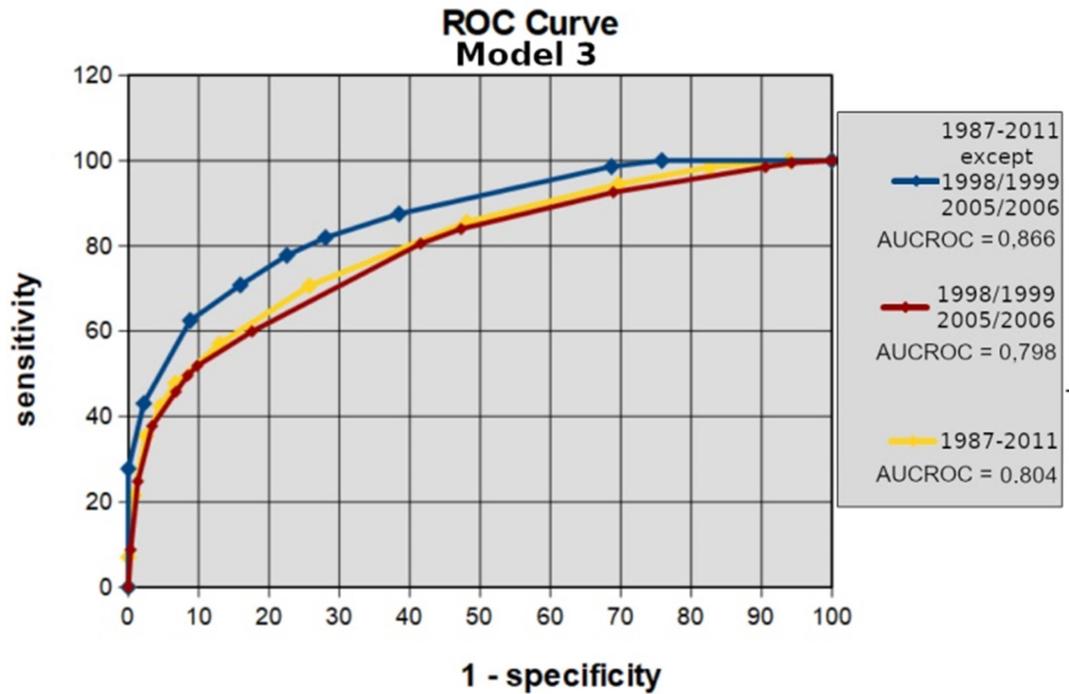


Figure S6. Curves of the receiver operating characteristics for model 3, considering three distinct time intervals. The areas under the curves (AUCROC; best performance = 1) were used as comparison criteria between the performance of model 3 in these different time windows.

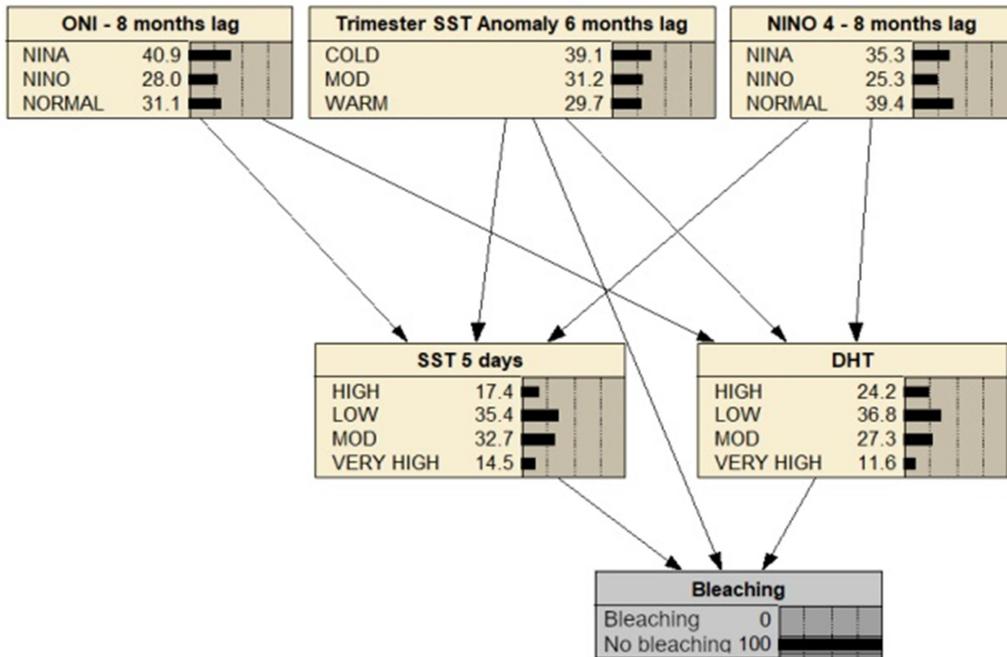


Figure S7. BN graphical structure exhibiting the table of probabilities (bars and numerical values) conditioned by "No bleaching" events (the query node is treated as a finding).

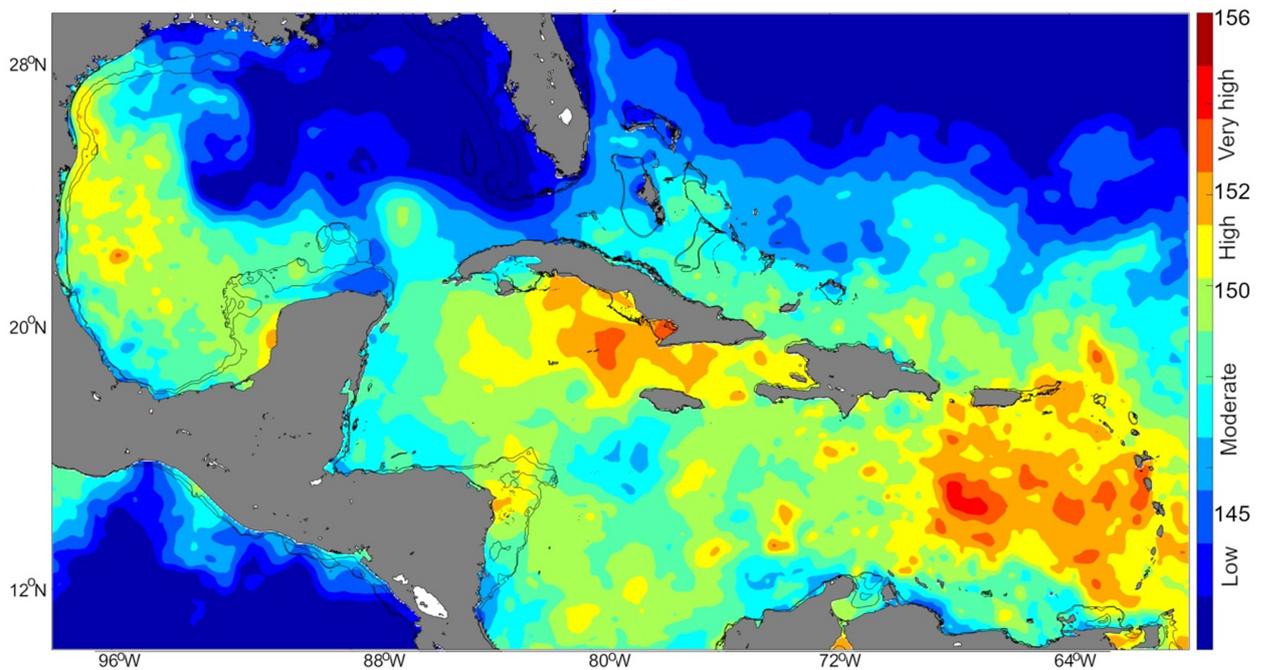


Figure S8. SST5days map of October 2005 showing values of SST ($^{\circ}$ C) sum of five consecutive days. High values were spread in much of Caribbean Sea, the east portion of the study area.

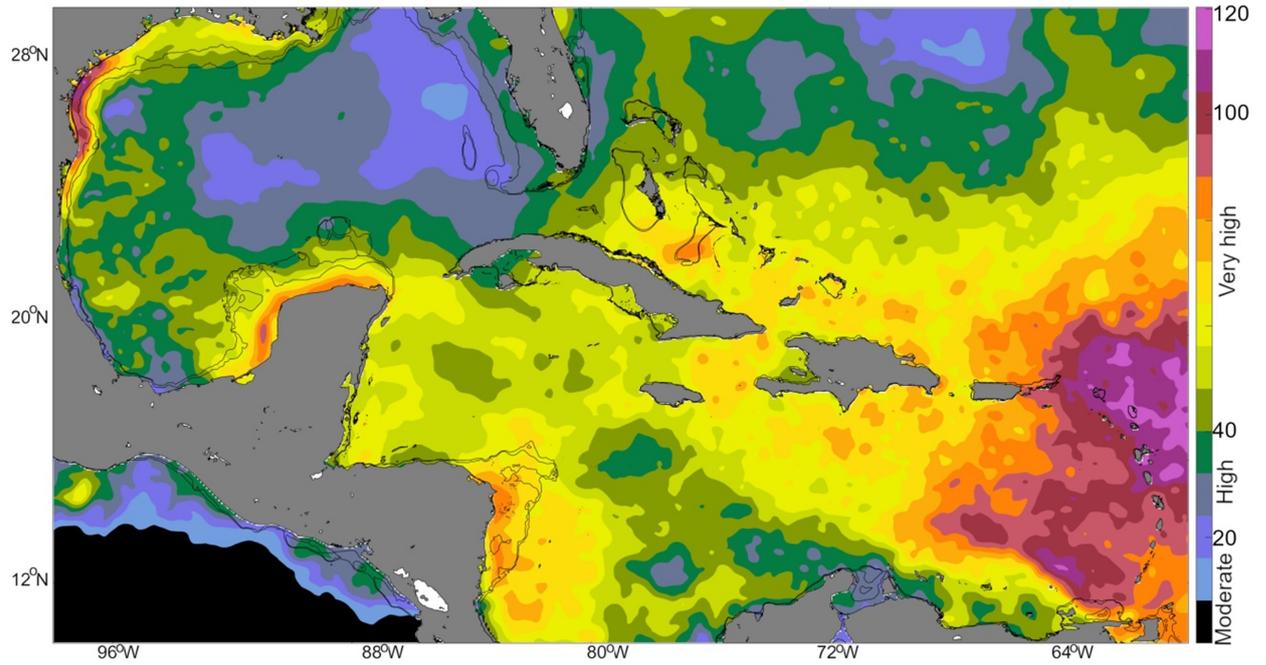


Figure S9. DHT map of October 2005 showing the amount of heat accumulated ($^{\circ}\text{C}$) in a time window of three months. The highest values were concentrated in the eastern portion of the study area.

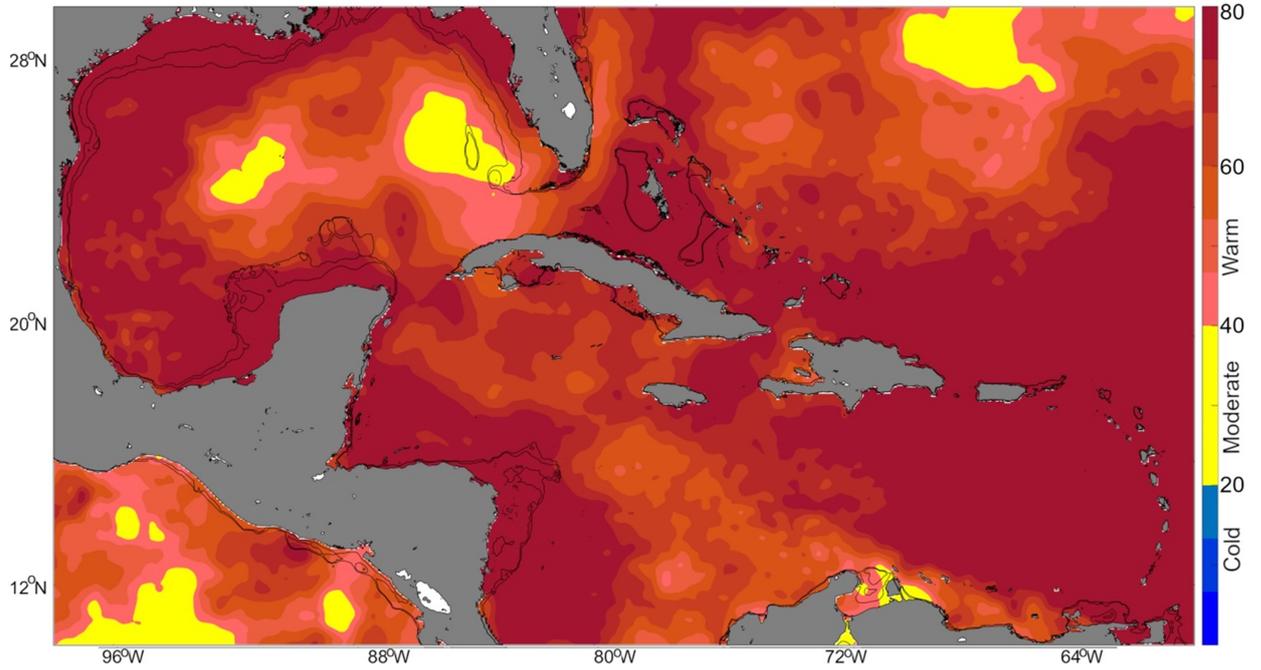


Figure S10. TSSTA map ($^{\circ}\text{C}$) of October 2005 showing values considered by the model as sufficient to a “bleaching” forecast in great majority of the study area.

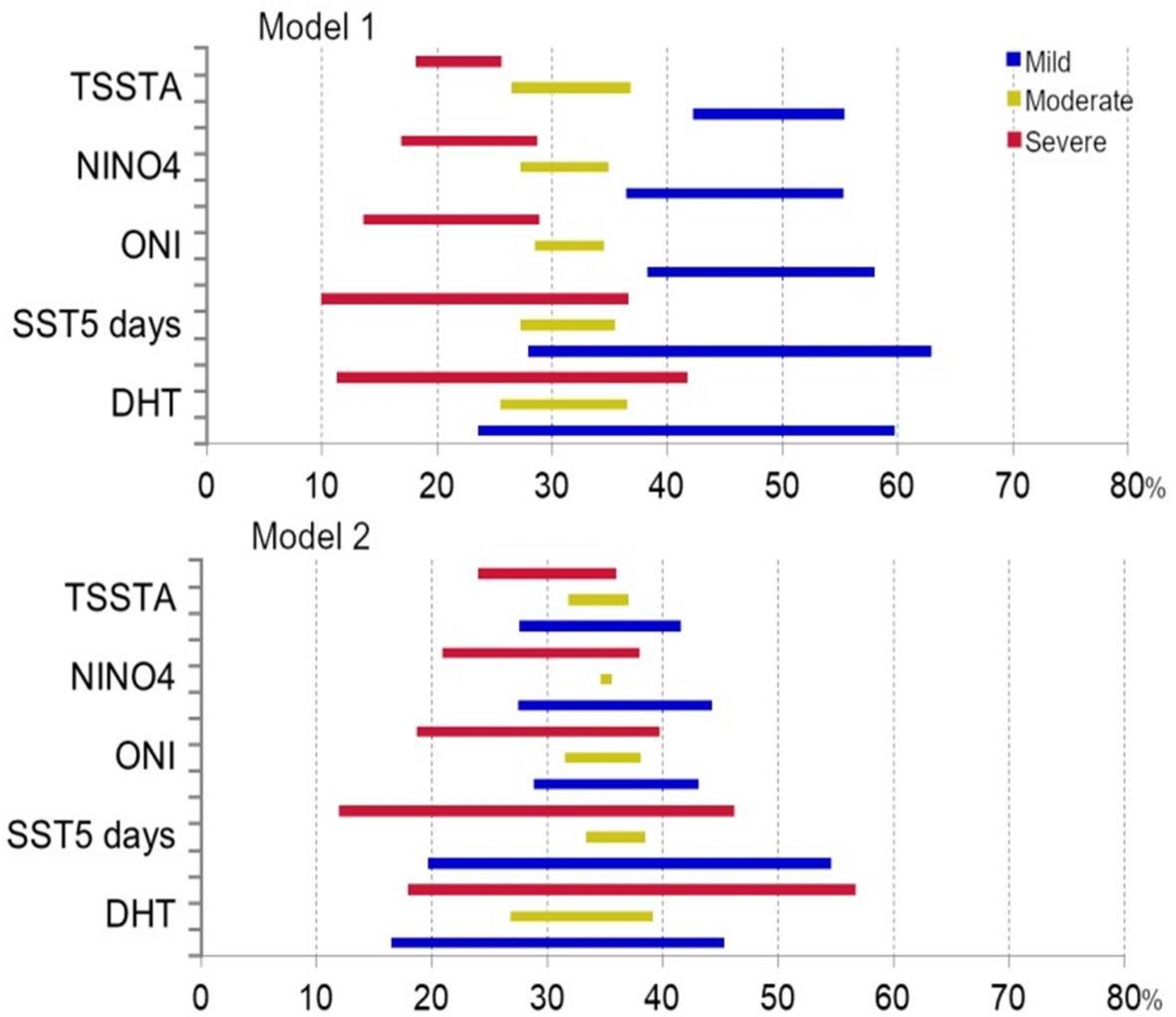


Figure S11. Sensitivity analysis of the three classes of coral bleaching to the environmental variables for model 1 (above) and model 2 (below). The bars represent the variation range of probability of bleaching classes, according to the variation of the variables observed in the Y-axis.

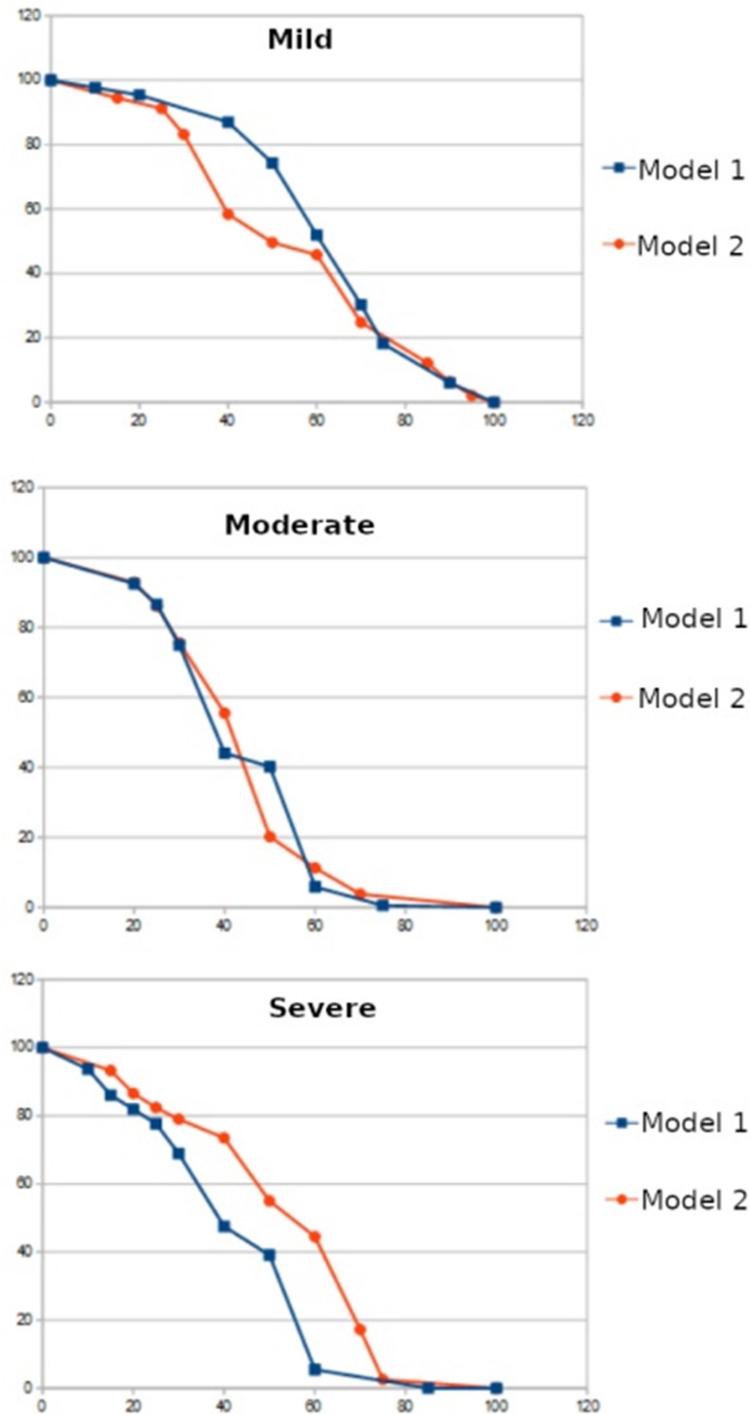


Figure S12. Sensitivity test performed to investigate changes in the strength of believing by bleaching class provided by balancing the database from model 1 to model 2. The graph indicates the percentage of data that was correctly predicted by the models (X-axis) with probabilities higher than the cutoff threshold probabilities (Y-axis). The curves show that model 1 was a bit more efficient in predicting "Mild" cases, while model 2 was considerably more efficient in predicting "Severe" cases. Both models showed a weakness in predicting the "Moderate" class.

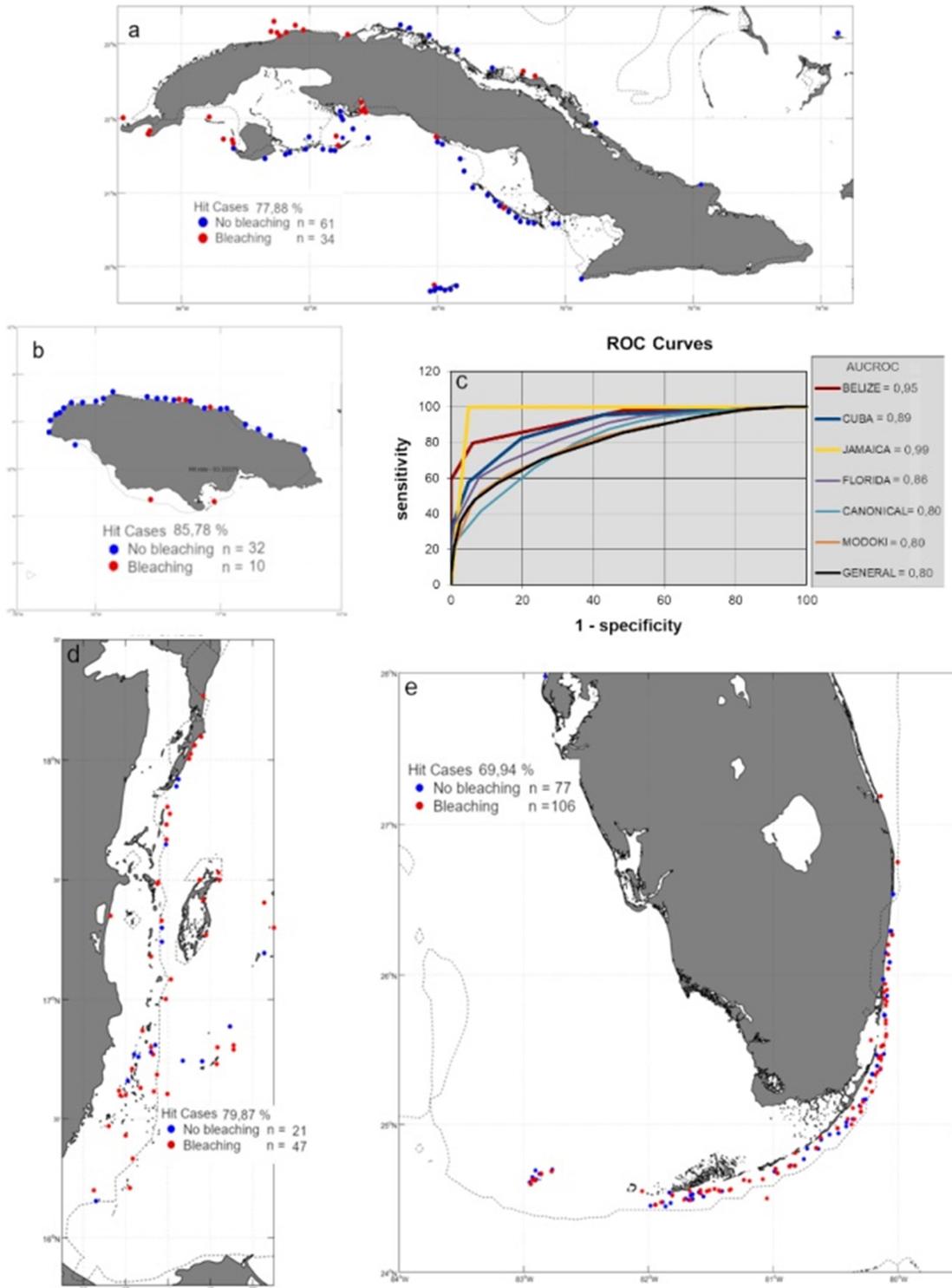


Figure S13. Spatial distribution of coral bleaching observations correctly predicted by specific region custom-made models (a = Cuba; b = Jamaica; d = Belize; e = Florida). (c) Curves of the receiver operating characteristics and the values of respective areas (AUCROC) used to compare the performances of all custom models.

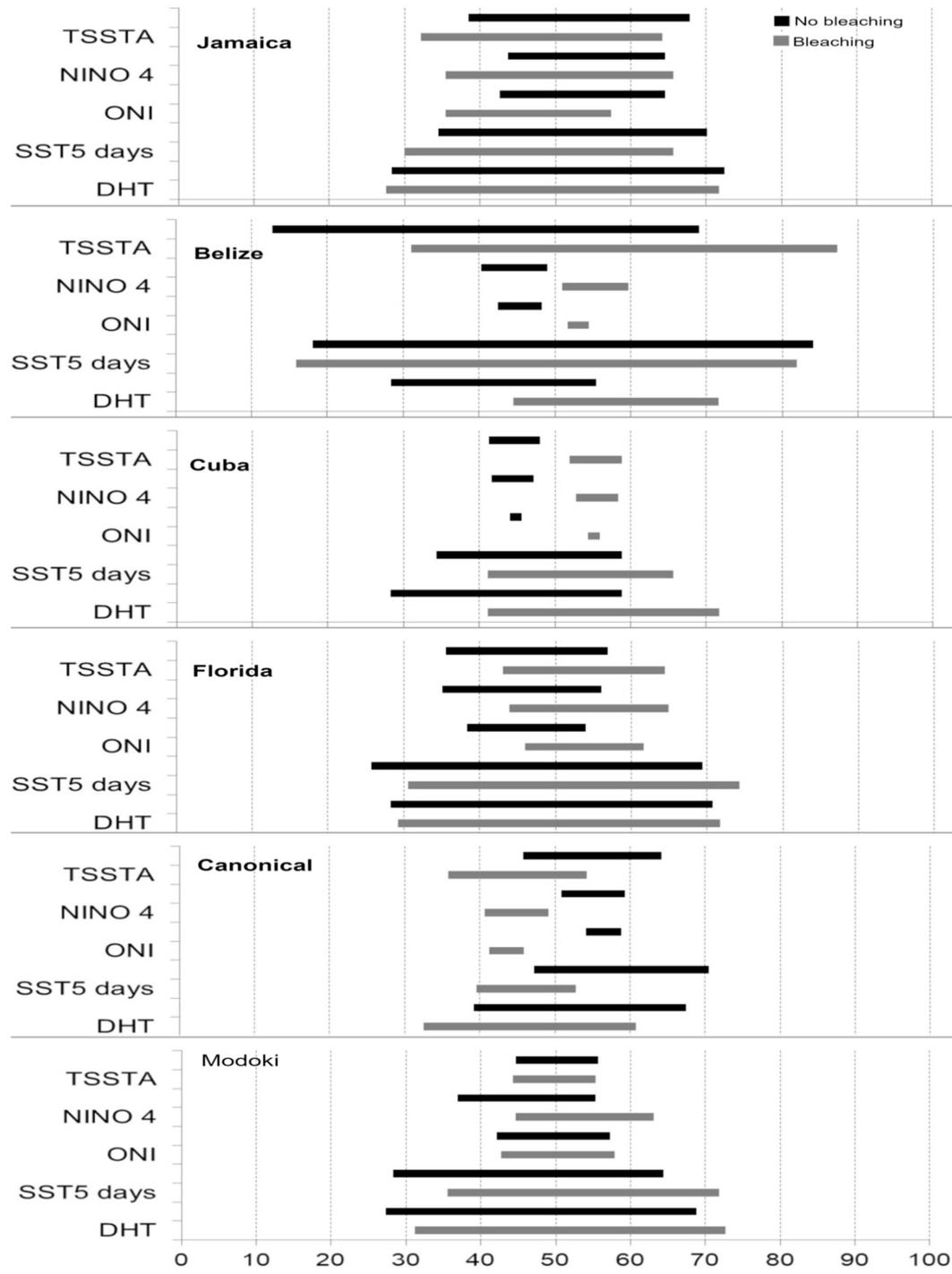


Figure S14. Sensitivity analysis of the coral bleaching node to the environmental variables for Jamaica, Belize, Cuba, Florida, Canonical and Modoki (top to bottom respectively). Black (grey) bars represent the variation range of the probability of a “Bleaching” (“No bleaching”) event to occur, according to the variation between states of the nodes observed in the Y-axis.

	Time window 1998/1999 + 2005/2006		Time window 1987-2011 except 1998/1999 + 2005/2006
	Hit rate (%)	Prediction rate (%)	Hit rate (%)
Model 1	55.49	95.12	69.29
Model 2	62.38	97.56	57.14
Model 3	67.32	100.00	74.26

Table S1. Hit rates according to the leave-one-out method for models 1, 2 and 3 considering the instances within and outside two distinct time windows.

MODEL	Parents (%)			Grandparents (%)			Convergent forecast (%)	
	Severe	Moderate	Mild	Severe	Moderate	Mild	Severe	Moderate
model 1	56.13	43.58	81.59	46.22	10.89	81.59	65.59	56.60
model 2	72.69	47.06	57.14	60.50	26.47	65.13	63.73	50.00
model 3	70.64	-	74.27	65.77	-	62.34	85.32	-

Table S2. Hit rates per bleaching category according to the leave-one-out method for models 1, 2 and 3.

MODEL	ALL CASES		BLEACHING CONVERGENT CASES		PREDICTABILITY POWER (%)
	GENERAL ERROR (%)	LOCAL ERROR (%)	GENERAL ERROR (%)	LOCAL ERROR (%)	
Jamaica	14.22 (n=36)	2.78 (n=36)	12.5 (n=8)	6.7 (n=15)	43.9
Belize	20.13 (n=82)	19.51 (n=82)	18.0 (n=50)	7.3 (n=41)	56.1
Cuba	22.12 (n=106)	25.47 (n=106)	25.0 (n=8)	0.0 (n=7)	58.54
Florida	30.06 (n=259)	27.8 (n=259)	16.46 (n=99)	14.55 (n=110)	56.01
Canonical	44.20 (n=565)	28.83 (n=565)	26.45 (n=112)	20.81 (n=112)	85.36
Modoki	32.12 (n=959)	25.13 (n=959)	27.89 (n=386)	18.65 (n=386)	95.12
General	27.75 (n=1074)	-	15.23 (n=348)	-	100

Table S3. Error rates and the number of samples for all cases and cases of convergent prediction of the general model and the custom models.

		General	Jamaica	Cuba	Florida	Belize
Bleaching	Bleaching	>10%	>10%	>10%	>10%	>10%
	No bleaching	≤10%	≤10%	≤10%	≤10%	≤10%
DHT	Low	<1.32	<0.261	<1.498	<2.321	<18.338
	Moderate	≥1.32<22.61	≥0.261<8.90	≥1.498<9.905	≥2.321<16.12	≥18.33<
	High	≥22.61<43.10	≥8.90<37.43	≥9.905<32.92	≥16.12<27.45	≥43.45<
	Very high	≥43.10	≥37.43	≥32.92	≥27.45	≥55.485
SST5days	Low	<145.92	<146.87	<147.51	<150.40	<148.69
	Moderate	≥145.95<150.35	≥146.87<150.37	≥147.51<152.01	≥150.40<152.86	≥148.69
	High	≥150.35<152.18	≥150.37<151.94	≥152.01<153.90	≥152.86<155	≥151.32
	Very high	≥152.18	≥151.94	≥153.905	≥155	≥152.47
TSSTA	Cold	<22.02	<2.76	<9.146	<18.94	<39.22
	Moderate	≥22.02<46.12	≥2.76<22.59	≥9.146<31.21	≥18.94<31.81	≥39.22<
	Warm	≥46.12	≥22.59	≥31.21	≥31.81	≥71.26
ONI	Niña	<0.05	<-1.1	<-0.65	<0	<0.65
	Normal	≥0.05<0.65	≥-1.1<0.65	≥-0.65<0.65	≥0<0.85	
	Niño	≥0.65	≥0.65	≥0.65	≥0.85	≥0.65
NINO4	Niña	<0.125	<-0.84	<-0.645	<0.26	<0.52
	Normal	≥0.125<0.74	≥-0.84<0.785	≥-0.645<0.67	≥0.26<0.765	≥0.52<0
	Niño	≥0.74	≥0.785	≥0.67	≥0.765	≥0.88

Table S4. Environmental variables discretized in mutually excluding intervals for learning the structure and conditional probabilities of the different Bayesian networks developed.

Animated Maps S1 – S2. Daily animated maps of SST 5 days (°C) for 1998 and 2005 respectively.

Animated Maps S3 – S4. Daily animated maps of degree heating trimester (°C) for 1998 and 2005 respectively.

Animated Maps S5 – S6. Daily animated maps of trimester sea surface temperature anomaly (°C) for 1998 and 2005 respectively.

Animated Maps S7 – S8. Monthly probabilistic animated maps of coral bleaching forecast (%) for 1998 and 2005 respectively.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

O aumento na temperatura média global em 1,5° ou 2°C acima das condições pré-industriais, previsto para as próximas décadas, deve aumentar a frequência dos eventos extremos de branqueamento, enquanto diminui gradativamente a intervalo de recorrência entre eles (Hughes et al., 2018). Estimativas indicam que a recuperação completa das assembléias de corais pode levar de 10 a 15 anos para as espécies de crescimento mais rápido, e muito mais tempo do que isso para as espécies de crescimento lento (Glynn et al., 2015). Desde a década de 1980, quando os episódios de branqueamento em escala regional representavam ocorrências raras ou ausentes (Glynn, 1993), o intervalo de recorrência médio entre eventos extremos diminuiu de 25-30 para 5.9 anos (Hughes et al., 2018). Isto, somado aos múltiplos fatores impactantes aos quais os recifes estão sujeitos, deve testar a capacidade de aclimação e impulsionar a adaptação dos corais. As altas taxas de mortalidade decorrentes dos episódios de branqueamento globais dos últimos 20 anos (e.g. 1997/1998, 2009/2010 e 2015-2017, este último também classificado como multi-ano), entretanto, sugerem que os corais e suas zooxantelas podem não se aclimatar/adaptar acompanhando o ritmo acelerado do aquecimento da água do mar (Hughes et al. 2017).

Além da diminuição significativa do intervalo de recorrência, um outro aspecto fundamental, sob o ponto de vista da modelagem e previsão do branqueamento dos corais, é que à medida que o aquecimento global se intensifica, a associação do El Niño como principal responsável pelos eventos de branqueamento em massa diminui (Hughes et al., 2018). Padrões de branqueamento recentes indicam que já estamos ingressando em um cenário em que todo verão quente, mesmo sem estar associado ao El Niño, tem o potencial de causar branqueamento e mortalidade em escala regional (>1000 km) (Donner et al., 2017; Hughes et al., 2018). À este ponto é pertinente esclarecer que isto não torna obsoleta a abordagem desenvolvida na presente pesquisa, mas sim, chama atenção para dois aspectos relevantes que devem ser considerados para a modelagem apropriada dos eventos de branqueamento esperados para os próximos anos: (1) o monitoramento continuado dos recifes afim de fornecer dados necessários para simulações baseadas em uma caracterização atualizada dos eventos de branqueamento (e de suas relações com as variáveis ambientais que compõe o modelo); (2) a importância do processo de subamostragem para a formulação de uma base de dados mais significativa possível de acordo com o propósito da modelagem. Para o caso da previsão dos eventos neste novo momento (i.e. quando todo verão é potencialmente perigoso), isto, necessariamente, requer um conhecimento prévio do especialista/modelador acerca da evolução histórica dos padrões do branqueamento ao longo das últimas décadas. Por exemplo, empregar uma combinação de dados (i.e. branqueamento vs índices termais vs indicadores do El Niño) referentes ao período de 1980 à 2000, quando todos os eventos extremos foram associados à períodos de El Niño, pode não ser mais proficiente para prever o padrão de branqueamento dos dias atuais (ou para os próximos anos).

Ainda à respeito de desdobramentos metodológicos futuros, ressalta-se que à medida que dados com resolução espacial mais detalhada e consistentes ao longo do tempo, assim como novas observações de branqueamento, tornam-se disponíveis o modelo pode ser continuamente

atualizado, o que inevitavelmente promoveria uma melhoria na qualidade das previsões. Entretanto, é importante considerar que a aplicabilidade do modelo para outras regiões e períodos deve estar restrita à recategorização das variáveis e reestruturação do modelo dentro deste mais novo conjunto de observações. Além disso, outro aspecto relevante que poderia ser implementado em etapas futuras refere-se ao incremento da base de dados de entrada para além das observações de branqueamento. A abordagem Bayesiana apresenta esta valiosa característica de ser capaz de empregar dados com variados atributos, inclusive dados omissos, para o cálculo das probabilidades condicionais. Isto pode ser muito proveitoso para estabelecer as relações de causa e efeito entre os índices termais e os indicadores do El Niño baseando-se em série de dados bem mais longas, não restritas aos locais e períodos das observações de branqueamento.

É importante considerar que o branqueamento já representa um tema global amparado internacionalmente por diversas organizações e institutos de pesquisa há algumas décadas, e sua previsão caracteriza-se como um dos grandes desafios científicos vinculados à gestão dos ecossistemas costeiros. Apesar de ao longo deste período as redes Bayesianas terem sido empregadas como ferramentas populares de modelagem para lidar com domínios incertos e complexos, sua aplicação no contexto dos ecossistemas recifais, e particularmente associadas ao fenômeno de branqueamento dos corais ainda representa um campo pouco explorado. Diante disso, a presente pesquisa também pode ser considerada como uma tentativa de aproximar aqueles comprometidos em salvaguardar a saúde e biodiversidade dos ecossistemas recifais com a abordagem Bayesiana, que sob o ponto de vista expressado aqui, apresenta as características requeridas para amparar esta intrincada tarefa.

Em geral podemos dizer que nesta pesquisa pretendemos contribuir para o estado atual de conhecimento acerca do emprego de redes Bayesianas como ferramenta apta à auxiliar a gestão dos recifes de corais. Seja através de sistemas de auxílio à tomada de decisões, ou por sistemas de investigação das possíveis alternativas de gestão ou de resultados específicos, ou mesmo através de sistemas de aviso prévio, estas ferramentas probabilísticas podem assessorar estudantes, pesquisadores e gestores recifais durante o processo de depreciação previsto para as próximas décadas. A esta altura destacam-se duas importantes questões generalistas relacionadas a diferentes aspectos, e que podem ser beneficiadas pelo emprego de RBs: 1 – como as variáveis ditas significativas devem se comportar diante dos distúrbios ambientais atuais e futuros, e quais impactos relacionados a elas para o ambiente recifal; e 2 – de que maneira as alternativas de intervenções podem auxiliar os gestores ambientais na prevenção da saúde e na dinâmica destes ambientes.

Como realmente serão as respostas dos recifes diante de eventos cada vez mais severos de branqueamento, ainda é motivo para muita especulação. O que sabemos de fato, é que estamos a poucos passos, se tomados na direção errada, de atingir um ponto sem retorno, onde as consequências das nossas ações vão, inevitavelmente, assumir um carácter irreversível para os ecossistemas recifais (Ban et al., 2014). Não há mais tempo, nem recursos a serem desperdiçados por decisões erradas. É neste sentido que esta pesquisa compartilha um desafio crucial relacionado ao manejo e conservação dos ecossistemas de recifes de corais: desenvolver técnicas e métodos alternativos capazes de auxiliar a compreensão de processos críticos a ponto de substanciar a tomada de decisões. Se ainda pretendemos auxiliar os ecossistemas recifais no decorrer da árdua trajetória aguardada para as próximas décadas, e eventualmente salvá-los, temos que tirar conclusões apropriadas dos processos atuantes no presente (e passado recente), para fornecer avaliações precisas de processos e de possíveis resultados de alternativas de gestão.

Acreditamos que a abordagem Bayesiana é adequada para amparar este desafio graças à sua capacidade de aceitar dados, conhecimentos e hipóteses com variadas características e combiná-los em uma estrutura sem necessariamente ter que elucidar todas as minúcias existentes nas relações entre eles. Para a modelagem do branqueamento isto é particularmente interessante, pois confere a oportunidade de lidar com incertezas ao utilizar as propensões dos sistemas físicos em conjunto com métodos de inferência para calcular as probabilidades condicionais de um conjunto de entidades, dadas as evidências disponíveis. No nosso caso, ao empregar esta abordagem, esperamos ter contribuído para a caracterização das relações existentes entre as diversas variáveis ambientais analisadas e o fenômeno de branqueamento dos corais nas duas regiões recifais mais proeminentes do oceano Atlântico (i.e. complexo recifal dos Abrolhos no oceano Atlântico Sul e áreas recifais na porção oeste do oceano Atlântico Norte). Além disso, acreditamos que o modelo aqui desenvolvido representa um recurso fundamental de fácil utilização e entendimento para os cientistas, governos e gestores dos recifes de coral diante de sua praticidade em informar com certa antecedência onde o branqueamento deve ocorrer.

A estrutura do modelo, inicialmente formalizada em um modelo conceitual, e depois aplicada como modelos de rede nestas duas regiões (em Lisboa et al. (2018) e Lisboa e Kikuchi, (2020) respectivamente) demonstrou a contundência dos dois pressupostos teóricos sob os quais a modelagem se sustentou através de uma representação gráfica bem simples (exposta na arquitetura do modelo). Neste sentido, esperamos também ter contribuído para o desenvolvimento de uma ferramenta com potencial para proporcionar o apredinzado social através do entendimento compartilhado e da disseminação do conhecimento para além da comunidade científica acerca dos principais fatores responsáveis pelo branqueamento nas áreas recifais do oceano Atlântico.

Além disso, através da revisão teórica fornecemos importantes diretrizes para promover uma modelagem padrão em cada uma das principais etapas da construção destes modelos probabilísticos, destacando boas práticas que foram fundamentais para o êxito da presente pesquisa, e que devem ser levadas em conta por aqueles empenhados em modelar ambientes incertos, complexos e variados como os recifes de corais. Apesar do desenvolvimento de RBs ser metodologicamente flexível, seguir regras e diretrizes cientificamente bem estabelecidas pode ser de grande valia para assegurar a devida credibilidade aos modelos.

Por fim gostaríamos de expressar que acreditamos que a condição futura dos recifes, e os serviços ecossistêmicos que eles fornecem às pessoas, dependerá criticamente da nossa capacidade de mitigar os impactos atuantes nesses ecossistemas não apenas em escala local/regional, mas principalmente em escala global. Isto, indubitavelmente, só pode ser alcançado através do desenvolvimento de métodos científicos capazes de fundamentar a compreensão dos principais processos vigentes através de avaliações formais passíveis de serem aproveitadas durante diferentes etapas da gestão ambiental, especialmente durante o processo de tomada de decisões. Neste sentido, acreditamos que a abordagem bayesiana para modelagem de curto prazo do branqueamento e seus aspectos teóricos, aqui apresentados, representam valiosos recursos a serem adicionados na caixa de ferramenta dos cientistas/modeladores dedicados aos ambientes de recifes de corais.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA 1

Guide for Authors

Your Paper Your Way

We now differentiate between the requirements for new and revised submissions. You may choose to submit your manuscript as a single Word or PDF file to be used in the refereeing process. Only when your paper is at the revision stage, will you be requested to put your paper in to a 'correct format' for acceptance and provide the items required for the publication of your article.

To find out more, please visit the Preparation section below.



Introduction

The journal is concerned with the use of mathematical models and systems analysis for the description of ecological processes and for the sustainable management of resources. Human activity and well-being are dependent on and integrated with the functioning of ecosystems and the services they provide. We aim to understand these basic ecosystem functions using mathematical and conceptual modelling, systems analysis, thermodynamics, computer simulations, and ecological theory. This leads to a preference for process-based models embedded in theory with explicit causative agents as opposed to strictly statistical or correlative descriptions. These modelling methods can be applied to a wide spectrum of issues ranging from basic ecology to human ecology to socio-ecological systems. The journal welcomes research articles, short communications, review articles, letters to the editor, book reviews, and other communications. The journal also supports the activities of the International Society of Ecological Modelling (ISEM).

Types of contributions

Before submitting an article to Ecological Modelling please read carefully the editorial policy which can also be found on the ECOMOD homepage. Editorial Policy

1. Original research papers (regular papers)
2. Review articles
3. Short communications
4. Letters to the Editor
5. Book reviews
6. News and announcements
7. Viewpoint

Original research papers should report the results of original research. The material should not have been previously published elsewhere, except in a preliminary form.

Review articles should cover subjects falling within the scope of the journal which are of active current interest. They may be submitted or invited.

A Short communication is a concise but complete description of a limited investigation, which will not be included in a later paper. Short communication should be as completely documented, both by reference to the literature and description of the experimental procedures employed, as a regular paper. They should not occupy more than 6 printed pages (about 12 manuscript pages, including figures, tables and references).

Letters to the Editor offering comment or useful critique on material published in the journal are welcomed. The decision to publish submitted letters rests purely with the Editor-in-Chief. It is hoped that the publication of such letters will permit an exchange of views which will be of benefit to both the journal and its readers.

Book reviews will be included in the journal on a range of relevant books which are not more than 2 years old. Book reviews will be solicited by the Editor-in-Chief. Unsolicited reviews will not usually be accepted, but suggestions for appropriate books for review may be sent to the Editor-in-Chief Brian Fath at bfath@towson.edu.

Viewpoint articles are short commentaries of 2,000 words or less that express a personal viewpoint on ecological modelling such as new research directions, gaps in current research, interdisciplinary perspectives are welcomed. Papers for this section should contain a condensed abstract to highlight the main points of the commentary.

Submission checklist

You can use this list to carry out a final check of your submission before you send it to the journal for review. Please check the relevant section in this Guide for Authors for more details.

Ensure that the following items are present:

One author has been designated as the corresponding author with contact details:

- E-mail address
- Full postal address

All necessary files have been uploaded:

Manuscript:

- Include keywords
- All figures (include relevant captions)
- All tables (including titles, description, footnotes)
- Ensure all figure and table citations in the text match the files provided
- Indicate clearly if color should be used for any figures in print

Graphical Abstracts / Highlights files (where applicable)
Supplemental files (where applicable)

Further considerations

- Manuscript has been 'spell checked' and 'grammar checked'
- All references mentioned in the Reference List are cited in the text, and vice versa
- Permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Internet)
- A competing interests statement is provided, even if the authors have no competing interests to declare
- Journal policies detailed in this guide have been reviewed
- Referee suggestions and contact details provided, based on journal requirements

For further information, visit our Support Center.



Before You Begin

Ethics in publishing

Please see our information pages on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication.

<https://www.journals.elsevier.com/ecological-modelling/news/editorial-policy-details/>

Further Details on Editorial Policy

Editorial Policy Ecological Modelling

We most recently provided a thorough framework for authors in an editorial published in 2006 (Jørgensen et al. 2006). The editors have followed this framework in deciding which papers are within the journal scope. Due to the large increase in the number of submissions during the ensuing years, we have had to maintain a fairly strict interpretation of this scope, and as such the rejection rate has increased. Some authors may not be aware of this framework so it is repeated below.

1. All papers must present a new model or a new contribution to systems ecology.
2. Papers based on the use of statistical analyses on ecological data cannot be accepted. There are other journals that publish the use of statistics in ecology.
3. Papers that apply an existing model to a new case study will not be published as research articles. Unique case studies can be published as a short communication (a few pages only) but are more appropriate for specialty or national/regional journals.
4. Papers should include the support of ecological data for calibration and validation.
5. All papers should highlight the model's novelty compared with previous models focusing on the same or approximately the same topic and ecosystem. The readers inevitably will ask: why should I use this new model and not an existing one?

6. The journal is called Ecological Modelling, which means that we want to publish papers on models of ecosystems or ecological processes, not models of physical or technological systems. For example, models of strictly atmospheric, chemical, or hydrological systems have other outlets. The models should bring new ecological knowledge and should emphasize the ecological implications of the model results. There is rapid rise in the need for integrated socio-ecological models which fall within the journal scope, but the focus must be on the ecological aspects not the sociological or economic.

7. New results in ecological theory are welcome, but the authors must emphasize the paper novelty. The papers must present how the paper expands our knowledge and if possible how we can utilize this new knowledge in ecological modelling or in our general understanding of ecosystems.

8. New results in modelling theory are also welcome; but with the implications of an ecological model that has been improved by this new modelling theory.

9. New controversial results are also welcome. We do not have in Ecological Modelling an editorial policy to reject papers that are not in accordance with orthodox theories. On the contrary, we encourage new ideas even if they are controversial because that will inevitably lead to new scientific results. In this context, you have the possibility to publish a letter to the editor, which can be used to start a discussion among the readers on new but still not fully accepted ideas.

This refined editorial policy is encapsulated in the following short questions, which are applied during the review process:

- (A) Does the paper focus on an ecological model or on systems ecology?
- (B) Are the results original and novel?
- (C) Does the paper clearly emphasize the scientific progress compared with existing literature?
- (D) Are the results based on ecological observations?
- (E) Is the ecological component sufficiently strong?

All five questions must be answered by "yes" for a paper to be considered for publication. Papers not meeting these standards will be rejected by the handling editor prior to external peer review.

In addition to these five questions about the content of the paper, the following questions focus on the presentation of the results:

- (F) Has the model been presented by a conceptual diagram?
- (G) Has the model been presented in such details that the reader is able to develop the model? In Ecological Modelling "Material and Methods" is the model. Note, this does not mean that computer code must be in the text of every paper, but enough information should be given.
- (H) Are the state variables, forcing functions, and the parameters clearly defined and dimensionalized (preferably in a table)?
- (I) Are the equations presented in sufficient detail? Should they be presented in an appendix (or on-line)?
- (J) Are all relevant references included?
- (K) Does the discussion focus on the scientific progress in ecological modelling (question C)?
- (L) Is the paper well written and the English language presentation clear?

These seven presentation questions will be considered in the review process, and if some of the questions will be answered by "no", then minor, moderate, or major revisions will be required. We would like to encourage the authors of papers to be submitted to Ecological Modelling to use these 12 questions (A-L) when they are reviewing their own paper before submission to reduce the probability for rejection. If one of the questions A-E will be answered by no, then Ecological Modelling is not the right scientific journal for your paper.

We hope that this editorial policy will result in the submission of higher quality papers because the authors will know before submission if a paper fits to the editorial policy of Ecological Modelling. The end result will be a higher quality journal, which benefits both authors and readers.

References

Jørgensen, S.E., Fath, B.D., Grant, W., Nielsen, S.N. 2006. The editorial policy of Ecological Modelling. *Ecol. Model.*, 199(1), 1-3.

Declaration of interest

All authors must disclose any financial and personal relationships with other people or organizations that could inappropriately influence (bias) their work. Examples of potential conflicts of interest include employment, consultancies, stock ownership, honoraria, paid expert testimony, patent applications/registrations, and grants or other funding. Authors should complete the declaration of interest statement using this template and upload to the submission system at the Attach/Upload Files step. If there are no interests to declare, please choose: 'Declarations of interest: none' in the template. This statement will be published within the article if accepted. More information.

Submission declaration and verification

Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract, a published lecture or academic thesis, see 'Multiple, redundant or concurrent publication' for more information), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. To verify originality, your article may be checked by the originality detection service Crossref Similarity Check.

Preprints

Please note that preprints can be shared anywhere at any time, in line with Elsevier's sharing policy. Sharing your preprints e.g. on a preprint server will not count as prior publication (see 'Multiple, redundant or concurrent publication' for more information).

Use of inclusive language

Inclusive language acknowledges diversity, conveys respect to all people, is sensitive to differences, and promotes equal opportunities. Content should make no assumptions about the beliefs or commitments of any reader; contain nothing which might imply that one individual is superior to another on the grounds of age, gender, race, ethnicity, culture, sexual orientation, disability or health condition; and use inclusive language throughout. Authors should ensure that writing is free from bias, stereotypes, slang, reference to dominant culture and/or cultural assumptions. We advise to seek gender neutrality by using plural nouns ("clinicians, patients/clients") as default/wherever possible to avoid using "he, she," or "he/she." We recommend avoiding the use of descriptors that refer to personal attributes such as age, gender, race, ethnicity, culture, sexual orientation, disability or health condition unless they are relevant and valid. These guidelines are meant as a point of reference to help identify appropriate language but are by no means exhaustive or definitive.

Author contributions

For transparency, we encourage authors to submit an author statement file outlining their individual contributions to the paper using the relevant CRediT roles: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Funding acquisition; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing - original draft; Writing - review & editing. Authorship statements should be formatted with the names of authors first and CRediT role(s) following. More details and an example

Changes to authorship

Authors are expected to consider carefully the list and order of authors **before** submitting their manuscript and provide the definitive list of authors at the time of the original submission. Any addition, deletion or rearrangement of author names in the authorship list should be made only **before** the manuscript has been accepted and only if approved by the journal Editor. To request such a change, the Editor must receive the following from the **corresponding author**: (a) the reason for the change in author list and (b) written confirmation (e-mail, letter) from all authors that they agree with the addition, removal or rearrangement. In the case of addition or removal of authors, this includes confirmation from the author being added or removed. Only in exceptional circumstances will the Editor consider the addition, deletion or rearrangement of authors **after** the manuscript has been accepted. While the Editor considers the request, publication of the manuscript will be suspended. If the manuscript has already been published in an online issue, any requests approved by the Editor will result in a corrigendum.

Article transfer service

This journal is part of our Article Transfer Service. This means that if the Editor feels your article is more suitable in one of our other participating journals, then you may be asked to consider transferring the article to one of those. If you agree, your article will be transferred automatically on your behalf with no need to reformat. Please note that your article will be reviewed again by the new journal. More information.

Copyright

Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete a 'Journal Publishing Agreement' (see more information on this). An e-mail will be sent to the corresponding author confirming receipt of the manuscript together with a 'Journal Publishing Agreement' form or a link to the online version of this agreement.

Subscribers may reproduce tables of contents or prepare lists of articles including abstracts for internal circulation within their institutions. Permission of the Publisher is required for resale or distribution outside the institution and for all other derivative works, including compilations and translations. If excerpts from other copyrighted works are included, the author(s) must obtain written permission from the copyright owners and credit the source(s) in the article. Elsevier has preprinted forms for use by authors in these cases.

For gold open access articles: Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete an 'Exclusive License Agreement' (more information). Permitted third party reuse of gold open access articles is determined by the author's choice of user license.

Author rights

As an author you (or your employer or institution) have certain rights to reuse your work. More information.

Elsevier supports responsible sharing

Find out how you can share your research published in Elsevier journals.

Role of the funding source

You are requested to identify who provided financial support for the conduct of the research and/or preparation of the article and to briefly describe the role of the sponsor(s), if any, in study design; in the collection, analysis and interpretation of data; in the writing of the report; and in the decision to submit the article for publication. If the funding source(s) had no such involvement then this should be stated.

Open access

Please visit our Open Access page for more information.

Elsevier Researcher Academy

Researcher Academy is a free e-learning platform designed to support early and mid-career researchers throughout their research journey. The "Learn" environment at Researcher Academy offers several interactive modules, webinars, downloadable guides and resources to guide you through the process of writing for research and going through peer review. Feel free to use these free resources to improve your submission and navigate the publication process with ease.

Language (usage and editing services)

Please write your text in good English (American or British usage is accepted, but not a mixture of these). Authors who feel their English language manuscript may require editing to eliminate

possible grammatical or spelling errors and to conform to correct scientific English may wish to use the English Language Editing service available from Elsevier's Author Services.

Submission

Our online submission system guides you stepwise through the process of entering your article details and uploading your files. The system converts your article files to a single PDF file used in the peer-review process. Editable files (e.g., Word, LaTeX) are required to typeset your article for final publication. All correspondence, including notification of the Editor's decision and requests for revision, is sent by e-mail.

During the submission process, you will need to select a minimum of 4 classifications. Click: 'Select Manuscript Classifications' to open a window containing a list of the classifications for this journal. Classifications will help the Editor to select appropriate Reviewers for your manuscript.

Submit your article

Please submit your article via <https://ees.elsevier.com/ecomod/default.asp>

PDF support for queries

If there are problems regarding equations whilst building the PDF please contact this support link for a workaround solution: https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/302

If you need extra support please visit our Support Center.

Referees

All authors must suggest 4 reviewers on submission, together with their full addresses and email details. The suggested reviewers should not be a colleague, a close collaborator or in the same institutional location as the author(s).

Summary Guide and Checklist for Authors

This page is a summary of essential information. It is hoped that this list will be useful during the final checking of an article prior to sending it to the journal's Editor for review. Please consult this Guide for Authors for further details of any item.

1. Submission of an article to ECOMOD implies that it is an original submission which has not been published previously or has not been submitted to any other journal.
2. All authors must suggest 4 reviewers on submission, together with their full addresses and email details. The suggested reviewers should not be a colleague, a close collaborator or in the same institutional location as the author(s).
3. Before submitting a manuscript to ECOMOD, please carefully read the Editorial Policy that can be found at the journal website. Be sure that the answer to the following five questions concerning the content of the manuscript is Yes:

- Does the paper focus on an ecological model or on systems ecology?
- Are the results based on ecological observations?
- Is the ecological component sufficiently strong?
- Does the paper present new results in ecological modelling or in systems ecology?
- Does the paper clearly emphasize the scientific progress of results in ecological modelling or systems ecology compared with our established knowledge and with previously published results?;

1. As outlined in the Editorial Policy, all submissions will be reviewed according to the following criteria:

- Has the model been presented by a conceptual diagram?
- Has the model been presented in such details that the reader is able to develop the model?
- Are the state variables, the forcing functions, and the parameters clearly presented?
- Are the equations presented in sufficient details? Should the equations eventually be presented in an appendix (or on-line)?
- Are all relevant references included?
- Is the discussion also focusing on the scientific progress in ecological modelling?

New Submissions

Submission to this journal proceeds totally online and you will be guided stepwise through the creation and uploading of your files. The system automatically converts your files to a single PDF file, which is used in the peer-review process. As part of the Your Paper Your Way service, you may choose to submit your manuscript as a single file to be used in the refereeing process. This can be a PDF file or a Word document, in any format or lay-out that can be used by referees to evaluate your manuscript. Manuscripts must be word processed, double-spaced or 1.5-spaced. It should contain high enough quality figures for refereeing. If you prefer to do so, you may still provide all or some of the source files at the initial submission. Please note that individual figure files larger than 10 MB must be uploaded separately.

References

There are no strict requirements on reference formatting at submission. References can be in any style or format as long as the style is consistent. Where applicable, author(s) name(s), journal title/book title, chapter title/article title, year of publication, volume number/book chapter and the article number or pagination must be present. Use of DOI is highly encouraged. The reference style used by the journal will be applied to the accepted article by Elsevier at the proof stage. Note that missing data will be highlighted at proof stage for the author to correct.

Formatting requirements

There are no strict formatting requirements but all manuscripts must contain the essential elements needed to convey your manuscript, for example Abstract, Keywords, Introduction, Materials and Methods, Results, Conclusions, Artwork and Tables with Captions. If your article includes any Videos and/or other Supplementary material, this should be included in your initial submission for peer review purposes. Divide the article into clearly defined sections.

Figures and tables embedded in text

Please ensure the figures and the tables included in the single file are placed next to the relevant text in the manuscript, rather than at the bottom or the top of the file. The corresponding caption should be placed directly below the figure or table.

Peer review

This journal operates a single blind review process. All contributions will be initially assessed by the editor for suitability for the journal. Papers deemed suitable are then typically sent to a minimum of two independent expert reviewers to assess the scientific quality of the paper. The Editor is responsible for the final decision regarding acceptance or rejection of articles. The Editor's decision is final. More information on types of peer review.

REVISED SUBMISSIONS

Use continuous line numbering throughout the document.

Use of word processing software

Regardless of the file format of the original submission, at revision you must provide us with an editable file of the entire article. Keep the layout of the text as simple as possible. Most formatting codes will be removed and replaced on processing the article. The electronic text should be prepared in a way very similar to that of conventional manuscripts (see also the Guide to Publishing with Elsevier). See also the section on Electronic artwork.

To avoid unnecessary errors you are strongly advised to use the 'spell-check' and 'grammar-check' functions of your word processor.

LaTeX

You are recommended to use the Elsevier article class `elsarticle.cls` to prepare your manuscript and BibTeX to generate your bibliography.

Our LaTeX site has detailed submission instructions, templates and other information.

Article structure***Subdivision - numbered sections***

Divide your article into clearly defined and numbered sections. Subsections should be numbered 1.1 (then 1.1.1, 1.1.2, ...), 1.2, etc. (the abstract is not included in section numbering). Use this numbering also for internal cross-referencing: do not just refer to 'the text'. Any subsection may be given a brief heading. Each heading should appear on its own separate line.

Introduction

State the objectives of the work and provide an adequate background, avoiding a detailed literature survey or a summary of the results.

Material and methods

Provide sufficient details to allow the work to be reproduced by an independent researcher. Methods that are already published should be summarized, and indicated by a reference. If

quoting directly from a previously published method, use quotation marks and also cite the source. Any modifications to existing methods should also be described.

Theory/calculation

A Theory section should extend, not repeat, the background to the article already dealt with in the Introduction and lay the foundation for further work. In contrast, a Calculation section represents a practical development from a theoretical basis.

Results

Results should be clear and concise with effective use of visuals (figures, tables, etc.).

Discussion

This should explore the significance of the results of the work, not repeat them. The discussion should explain the significance of the research findings in the context of the current literature.

Conclusions

The main conclusions of the study should be presented in a short Conclusions section.

Appendices

If there is more than one appendix, they should be identified as A, B, etc. Formulae and equations in appendices should be given separate numbering: Eq. (A.1), Eq. (A.2), etc.; in a subsequent appendix, Eq. (B.1) and so on. Similarly for tables and figures: Table A.1; Fig. A.1, etc.

Essential title page information

- ***Title.*** Concise and informative. Titles are often used in information-retrieval systems. Avoid abbreviations and formulae where possible.
- ***Author names and affiliations.*** Please clearly indicate the given name(s) and family name(s) of each author and check that all names are accurately spelled. You can add your name between parentheses in your own script behind the English transliteration. Present the authors' affiliation addresses (where the actual work was done) below the names. Indicate all affiliations with a lower-case superscript letter immediately after the author's name and in front of the appropriate address. Provide the full postal address of each affiliation, including the country name and, if available, the e-mail address of each author.
- ***Corresponding author.*** Clearly indicate who will handle correspondence at all stages of refereeing and publication, also post-publication. This responsibility includes answering any future queries about Methodology and Materials. **Ensure that the e-mail address is given and that contact details are kept up to date by the corresponding author.**
- ***Present/permanent address.*** If an author has moved since the work described in the article was done, or was visiting at the time, a 'Present address' (or 'Permanent address') may be indicated as a footnote to that author's name. The address at which the author actually did the work must be retained as the main, affiliation address. Superscript Arabic numerals are used for such footnotes.

Highlights

Highlights are mandatory for this journal as they help increase the discoverability of your article

via search engines. They consist of a short collection of bullet points that capture the novel results of your research as well as new methods that were used during the study (if any). Please have a look at the examples here: [example Highlights](#).

Highlights should be submitted in a separate editable file in the online submission system. Please use 'Highlights' in the file name and include 3 to 5 bullet points (maximum 85 characters, including spaces, per bullet point).

Abstract

A concise and factual abstract is required. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided, but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself.

Graphical abstract

Although a graphical abstract is optional, its use is encouraged as it draws more attention to the online article. The graphical abstract should summarize the contents of the article in a concise, pictorial form designed to capture the attention of a wide readership. Graphical abstracts should be submitted as a separate file in the online submission system. Image size: Please provide an image with a minimum of 531×1328 pixels (h \times w) or proportionally more. The image should be readable at a size of 5×13 cm using a regular screen resolution of 96 dpi. Preferred file types: TIFF, EPS, PDF or MS Office files. You can view [Example Graphical Abstracts](#) on our information site.

Authors can make use of Elsevier's Illustration Services to ensure the best presentation of their images and in accordance with all technical requirements.

Keywords

Immediately after the abstract, provide a maximum of 6 keywords, using American spelling and avoiding general and plural terms and multiple concepts (avoid, for example, 'and', 'of'). Be sparing with abbreviations: only abbreviations firmly established in the field may be eligible. These keywords will be used for indexing purposes.

Abbreviations

Define abbreviations that are not standard in this field in a footnote to be placed on the first page of the article. Such abbreviations that are unavoidable in the abstract must be defined at their first mention there, as well as in the footnote. Ensure consistency of abbreviations throughout the article.

Acknowledgements

Collate acknowledgements in a separate section at the end of the article before the references and do not, therefore, include them on the title page, as a footnote to the title or otherwise. List here

those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.).

Formatting of funding sources

List funding sources in this standard way to facilitate compliance to funder's requirements:

Funding: This work was supported by the National Institutes of Health [grant numbers xxxx, yyyy]; the Bill & Melinda Gates Foundation, Seattle, WA [grant number zzzz]; and the United States Institutes of Peace [grant number aaaa].

It is not necessary to include detailed descriptions on the program or type of grants and awards. When funding is from a block grant or other resources available to a university, college, or other research institution, submit the name of the institute or organization that provided the funding.

If no funding has been provided for the research, please include the following sentence:

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Units

Follow internationally accepted rules and conventions: use the international system of units (SI). If other units are mentioned, please give their equivalent in SI.

Math formulae

Please submit math equations as editable text and not as images. Present simple formulae in line with normal text where possible and use the solidus (/) instead of a horizontal line for small fractional terms, e.g., X/Y. In principle, variables are to be presented in italics. Powers of e are often more conveniently denoted by exp. Number consecutively any equations that have to be displayed separately from the text (if referred to explicitly in the text).

Footnotes

Footnotes should be used sparingly. Number them consecutively throughout the article. Many word processors build footnotes into the text, and this feature may be used. Should this not be the case, indicate the position of footnotes in the text and present the footnotes themselves separately at the end of the article.

Artwork

Electronic artwork

General points

- Make sure you use uniform lettering and sizing of your original artwork.
- Preferred fonts: Arial (or Helvetica), Times New Roman (or Times), Symbol, Courier.
- Number the illustrations according to their sequence in the text.
- Use a logical naming convention for your artwork files.
- Indicate per figure if it is a single, 1.5 or 2-column fitting image.
- For Word submissions only, you may still provide figures and their captions, and tables within a

single file at the revision stage.

- Please note that individual figure files larger than 10 MB must be provided in separate source files.

A detailed guide on electronic artwork is available.

You are urged to visit this site; some excerpts from the detailed information are given here.

Formats

Regardless of the application used, when your electronic artwork is finalized, please 'save as' or convert the images to one of the following formats (note the resolution requirements for line drawings, halftones, and line/halftone combinations given below):

EPS (or PDF): Vector drawings. Embed the font or save the text as 'graphics'.

TIFF (or JPG): Color or grayscale photographs (halftones): always use a minimum of 300 dpi.

TIFF (or JPG): Bitmapped line drawings: use a minimum of 1000 dpi.

TIFF (or JPG): Combinations bitmapped line/half-tone (color or grayscale): a minimum of 500 dpi is required.

Please do not:

- Supply files that are optimized for screen use (e.g., GIF, BMP, PICT, WPG); the resolution is too low.
- Supply files that are too low in resolution.
- Submit graphics that are disproportionately large for the content.

Color artwork

Please make sure that artwork files are in an acceptable format (TIFF (or JPEG), EPS (or PDF), or MS Office files) and with the correct resolution. If, together with your accepted article, you submit usable color figures then Elsevier will ensure, at no additional charge, that these figures will appear in color online (e.g., ScienceDirect and other sites) regardless of whether or not these illustrations are reproduced in color in the printed version. **For color reproduction in print, you will receive information regarding the costs from Elsevier after receipt of your accepted article.** Please indicate your preference for color: in print or online only. Further information on the preparation of electronic artwork.

Figure captions

Ensure that each illustration has a caption. A caption should comprise a brief title (**not** on the figure itself) and a description of the illustration. Keep text in the illustrations themselves to a minimum but explain all symbols and abbreviations used.

Tables

Please submit tables as editable text and not as images. Tables can be placed either next to the relevant text in the article, or on separate page(s) at the end. Number tables consecutively in accordance with their appearance in the text and place any table notes below the table body. Be sparing in the use of tables and ensure that the data presented in them do not duplicate results described elsewhere in the article. Please avoid using vertical rules and shading in table cells.

References

Citation in text

Please ensure that every reference cited in the text is also present in the reference list (and vice versa). Any references cited in the abstract must be given in full. Unpublished results and personal communications are not recommended in the reference list, but may be mentioned in the text. If these references are included in the reference list they should follow the standard reference style of the journal and should include a substitution of the publication date with either 'Unpublished results' or 'Personal communication'. Citation of a reference as 'in press' implies that the item has been accepted for publication.

Reference links

Increased discoverability of research and high quality peer review are ensured by online links to the sources cited. In order to allow us to create links to abstracting and indexing services, such as Scopus, CrossRef and PubMed, please ensure that data provided in the references are correct. Please note that incorrect surnames, journal/book titles, publication year and pagination may prevent link creation. When copying references, please be careful as they may already contain errors. Use of the DOI is highly encouraged.

A DOI is guaranteed never to change, so you can use it as a permanent link to any electronic article. An example of a citation using DOI for an article not yet in an issue is: VanDecar J.C., Russo R.M., James D.E., Ambeh W.B., Franke M. (2003). Aseismic continuation of the Lesser Antilles slab beneath northeastern Venezuela. *Journal of Geophysical Research*, <https://doi.org/10.1029/2001JB000884>. Please note the format of such citations should be in the same style as all other references in the paper.

Web references

As a minimum, the full URL should be given and the date when the reference was last accessed. Any further information, if known (DOI, author names, dates, reference to a source publication, etc.), should also be given. Web references can be listed separately (e.g., after the reference list) under a different heading if desired, or can be included in the reference list.

Data references

This journal encourages you to cite underlying or relevant datasets in your manuscript by citing them in your text and including a data reference in your Reference List. Data references should include the following elements: author name(s), dataset title, data repository, version (where available), year, and global persistent identifier. Add [dataset] immediately before the reference so we can properly identify it as a data reference. The [dataset] identifier will not appear in your published article.

References in a special issue

Please ensure that the words 'this issue' are added to any references in the list (and any citations in the text) to other articles in the same Special Issue.

Reference management software

Most Elsevier journals have their reference template available in many of the most popular reference management software products. These include all products that support Citation Style Language styles, such as Mendeley. Using citation plug-ins from these products, authors only

need to select the appropriate journal template when preparing their article, after which citations and bibliographies will be automatically formatted in the journal's style. If no template is yet available for this journal, please follow the format of the sample references and citations as shown in this Guide. If you use reference management software, please ensure that you remove all field codes before submitting the electronic manuscript. More information on how to remove field codes from different reference management software.

Users of Mendeley Desktop can easily install the reference style for this journal by clicking the following link:

<http://open.mendeley.com/use-citation-style/ecological-modelling>

When preparing your manuscript, you will then be able to select this style using the Mendeley plug-ins for Microsoft Word or LibreOffice.

Reference formatting

There are no strict requirements on reference formatting at submission. References can be in any style or format as long as the style is consistent. Where applicable, author(s) name(s), journal title/book title, chapter title/article title, year of publication, volume number/book chapter and the article number or pagination must be present. Use of DOI is highly encouraged. The reference style used by the journal will be applied to the accepted article by Elsevier at the proof stage. Note that missing data will be highlighted at proof stage for the author to correct. If you do wish to format the references yourself they should be arranged according to the following examples:

Reference style

Text: All citations in the text should refer to:

1. *Single author:* the author's name (without initials, unless there is ambiguity) and the year of publication;
2. *Two authors:* both authors' names and the year of publication;
3. *Three or more authors:* first author's name followed by 'et al.' and the year of publication.

Citations may be made directly (or parenthetically). Groups of references can be listed either first alphabetically, then chronologically, or vice versa.

Examples: 'as demonstrated (Allan, 2000a, 2000b, 1999; Allan and Jones, 1999).... Or, as demonstrated (Jones, 1999; Allan, 2000)... Kramer et al. (2010) have recently shown ...'

List: References should be arranged first alphabetically and then further sorted chronologically if necessary. More than one reference from the same author(s) in the same year must be identified by the letters 'a', 'b', 'c', etc., placed after the year of publication.

Examples:

Reference to a journal publication:

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., Lupton, R.A., 2010. The art of writing a scientific article. *J. Sci. Commun.* 163, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.Sc.2010.00372>.

Reference to a journal publication with an article number:

Van der Geer, J., Hanraads, J.A.J., Lupton, R.A., 2018. The art of writing a scientific article. *Heliyon.* 19, e00205. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00205>.

Reference to a book:

Strunk Jr., W., White, E.B., 2000. *The Elements of Style*, fourth ed. Longman, New York.

Reference to a chapter in an edited book:

Mettam, G.R., Adams, L.B., 2009. How to prepare an electronic version of your article, in: Jones,

B.S., Smith, R.Z. (Eds.), Introduction to the Electronic Age. E-Publishing Inc., New York, pp. 281–304.

Reference to a website:

Cancer Research UK, 1975. Cancer statistics reports for the UK.

<http://www.cancerresearchuk.org/aboutcancer/statistics/cancerstatsreport/> (accessed 13 March 2003).

Reference to a dataset:

[dataset] Oguro, M., Imahiro, S., Saito, S., Nakashizuka, T., 2015. Mortality data for Japanese oak wilt disease and surrounding forest compositions. Mendeley Data, v1.

<https://doi.org/10.17632/xwj98nb39r.1>.

Journal abbreviations source

Journal names should be abbreviated according to the List of Title Word Abbreviations.

Video

Elsevier accepts video material and animation sequences to support and enhance your scientific research. Authors who have video or animation files that they wish to submit with their article are strongly encouraged to include links to these within the body of the article. This can be done in the same way as a figure or table by referring to the video or animation content and noting in the body text where it should be placed. All submitted files should be properly labeled so that they directly relate to the video file's content. In order to ensure that your video or animation material is directly usable, please provide the file in one of our recommended file formats with a preferred maximum size of 150 MB per file, 1 GB in total. Video and animation files supplied will be published online in the electronic version of your article in Elsevier Web products, including ScienceDirect. Please supply 'stills' with your files: you can choose any frame from the video or animation or make a separate image. These will be used instead of standard icons and will personalize the link to your video data. For more detailed instructions please visit our video instruction pages. Note: since video and animation cannot be embedded in the print version of the journal, please provide text for both the electronic and the print version for the portions of the article that refer to this content.

Data visualization

Include interactive data visualizations in your publication and let your readers interact and engage more closely with your research. Follow the instructions here to find out about available data visualization options and how to include them with your article.

Supplementary material

Supplementary material such as applications, images and sound clips, can be published with your article to enhance it. Submitted supplementary items are published exactly as they are received (Excel or PowerPoint files will appear as such online). Please submit your material together with the article and supply a concise, descriptive caption for each supplementary file. If you wish to make changes to supplementary material during any stage of the process, please make sure to

provide an updated file. Do not annotate any corrections on a previous version. Please switch off the 'Track Changes' option in Microsoft Office files as these will appear in the published version.

Research data

This journal encourages and enables you to share data that supports your research publication where appropriate, and enables you to interlink the data with your published articles. Research data refers to the results of observations or experimentation that validate research findings. To facilitate reproducibility and data reuse, this journal also encourages you to share your software, code, models, algorithms, protocols, methods and other useful materials related to the project.

Below are a number of ways in which you can associate data with your article or make a statement about the availability of your data when submitting your manuscript. If you are sharing data in one of these ways, you are encouraged to cite the data in your manuscript and reference list. Please refer to the "References" section for more information about data citation. For more information on depositing, sharing and using research data and other relevant research materials, visit the research data page.

Data linking

If you have made your research data available in a data repository, you can link your article directly to the dataset. Elsevier collaborates with a number of repositories to link articles on ScienceDirect with relevant repositories, giving readers access to underlying data that gives them a better understanding of the research described.

There are different ways to link your datasets to your article. When available, you can directly link your dataset to your article by providing the relevant information in the submission system. For more information, visit the database linking page.

For supported data repositories a repository banner will automatically appear next to your published article on ScienceDirect.

In addition, you can link to relevant data or entities through identifiers within the text of your manuscript, using the following format: Database: xxxx (e.g., TAIR: AT1G01020; CCDC: 734053; PDB: 1XFN).

Mendeley Data

This journal supports Mendeley Data, enabling you to deposit any research data (including raw and processed data, video, code, software, algorithms, protocols, and methods) associated with your manuscript in a free-to-use, open access repository. During the submission process, after uploading your manuscript, you will have the opportunity to upload your relevant datasets directly to *Mendeley Data*. The datasets will be listed and directly accessible to readers next to your published article online.

For more information, visit the Mendeley Data for journals page.

Data in Brief

You have the option of converting any or all parts of your supplementary or additional raw data into one or multiple data articles, a new kind of article that houses and describes your data. Data articles ensure that your data is actively reviewed, curated, formatted, indexed, given a DOI and publicly available to all upon publication. You are encouraged to submit your article for *Data in Brief* as an additional item directly alongside the revised version of your manuscript. If your research article is accepted, your data article will automatically be transferred over to *Data in Brief* where it will be editorially reviewed and published in the open access data journal, *Data in Brief*. Please note an open access fee of 600 USD is payable for publication in *Data in Brief*. Full details can be found on the Data in Brief website. Please use this template to write your Data in Brief.

MethodsX

You have the option of converting relevant protocols and methods into one or multiple MethodsX articles, a new kind of article that describes the details of customized research methods. Many researchers spend a significant amount of time on developing methods to fit their specific needs or setting, but often without getting credit for this part of their work. MethodsX, an open access journal, now publishes this information in order to make it searchable, peer reviewed, citable and reproducible. Authors are encouraged to submit their MethodsX article as an additional item directly alongside the revised version of their manuscript. If your research article is accepted, your methods article will automatically be transferred over to MethodsX where it will be editorially reviewed. Please note an open access fee is payable for publication in MethodsX. Full details can be found on the MethodsX website. Please use this template to prepare your MethodsX article.

Data statement

To foster transparency, we encourage you to state the availability of your data in your submission. This may be a requirement of your funding body or institution. If your data is unavailable to access or unsuitable to post, you will have the opportunity to indicate why during the submission process, for example by stating that the research data is confidential. The statement will appear with your published article on ScienceDirect. For more information, visit the Data Statement page.

ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA 2

TEXT REQUIREMENTS

Preparing your paper as outlined below will help expedite consideration.

AGU journals consider a number of different paper types. Each of these has different length limits or guidelines.

In submitting, the corresponding author affirms that:

- All authors have read and approved the paper and will be informed about all reviews and revisions. It is expected that authors will have: (1) made substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data, or creation of new software used in the work; or have drafted the work or substantively revised it; (2) approved the submitted version (and any substantially modified version that involves the author's contribution to the study); and (3) agreed to be personally accountable for their own contributions and for ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work, even ones in which the author was not personally involved, are appropriately investigated, resolved, and documented in the literature. AGU will notify each co-author about a submission and all revisions.
- All author affiliations related to the work are indicated.
- Any real or perceived conflicts of interest related to this work are declared to the editors in the cover letter
- Data and data products related to the paper will be available upon publication in a repository practicing the FAIR principles. AGU journals follow the guidelines for Enabling FAIR data.
- The paper is an original submission and not under active consideration elsewhere. All papers are checked for plagiarism. Papers with significant overlap will be rejected or returned for correction.

General guidelines

Please prepare your manuscript following our checklists and templates listed under our How to Submit resources.

Length

For most journals, Research Articles are allowed to be up to 25 publication units (PU), where 1 PU is 500 words or 1 display element (figure or table). The title, authors, affiliations, key points, keywords, text in tables (but not captions) and references are excluded from word counts. Longer papers are assessed an excess length fee. Research Letters for *Geophysical Research Letters* have a maximum length of 12 publication units. *Longer papers are not considered in GRL and will be returned for shortening.* For most journals, Commentaries are limited to 6 publication units (recommended length is about 2000 words and 1-2 figures). Complete information about Publication Fees and length is here.

LaTeX

For LaTeX, use the AGU template. AGU LaTeX templates are also on Overleaf, a cloud-based LaTeX authoring system that allows direct submission to AGU journals. Please DO NOT introduce any extraneous formatting, new commands, macros, or shortcuts, as they are not

compatible with our publishing process. Papers with extensive extraneous formatting, macros, or shortcuts (including `\def`, `\newcommands`, `\renewcommands`, and especially those commands with #) will be returned for correction.

Companion manuscripts

AGU will consider papers that are companions or so related that publication and citation should be coordinated. AGU can work with other journals to coordinate publication. If you are submitting companion papers, please indicate this and any information regarding coordination in your cover letter and provide copies of all papers as part of your submission if they are not being submitted to the same journal. Please provide regular updates to the editors on the progress of related papers, especially at revision. If there are multiple companions, we strongly recommend that you contact our staff and the journal editors in advance.

Other papers under consideration elsewhere and related to your AGU submission should also be included for the editors and the relation explained in the cover letter. AGU will not publish manuscripts with any references that are not yet published. If the citation of such manuscripts is approved by the editor, AGU will hold final publication until the cited literature is accepted and publicly available.

Sample identification

AGU recommends use of International Geo Sample Numbers (IGSNs) for all samples reported in AGU Journals. IGSNs provide a unique identifier allowing samples to be linked across publications and searched through a central repository. We strongly encourage authors to register samples and obtain IGSNs and use them throughout their manuscript and tables. We recognize IGSNs during our production process and will provide links in manuscript tables to the registered sample descriptions.

Data

AGU requires that all data needed to understand, evaluate, and build upon the reported research be available at the time of publication. AGU journals follow the guidelines for enabling FAIR data and AGU is a signatory of the Commitment Statement on open and FAIR data.

This policy applies to the data, derived data and data products typically deposited in community repositories for that discipline and presented in the figures and analyses in the paper, and software or other methods used to generate, interpret, or process the data. If the methods and data are previously published, these can be cited. Large data sets and newly compiled data sets should be deposited in repositories that practice the FAIR principles prior to publication. Deposited data sets should be cited as full references in the reference list. Specifically:

All publishers who are signatories of the Enabling FAIR Data Commitment Statement support trusted repositories that curate research data, software, and physical samples for use by the scientific community. Authors should follow the guidelines below and in this FAQ:

1. Deposit research data in a FAIR-aligned repository, with a preference for those that explicitly follow the FAIR Data Principles and demonstrate compliance with international standards for data repositories, (e.g. CoreTrustSeal). Supplements to articles should not be used as an archive for data. For assistance, including in finding a repository, see the FAQ's.
2. Cite and link to the data in the article, following the Joint Declaration of Data Citation Principles and ESIP Guidelines, using the unique, resolvable, and persistent identifiers provided by the repository in which the data are archived. In particular:
3. Include a Data Availability Statement describing how the data underlying the findings of their article can be accessed and reused.

- In special cases, where data access is restricted, authors are required to mention these restrictions in the Data Availability Statement provided with the article. Such restrictions might be determined by applicable laws, university and research institution policies, funder terms, privacy, intellectual property and licensing agreements, and the ethical context of your research.
 - If the data cannot be made open, it should still be preserved in a FAIR-compliant repository with appropriate access and controls in place. Repositories that provide appropriate access controls can be found here.
4. Provide unrestricted access to all data and materials underlying reported findings for which ethical or legal constraints do not apply. These restrictions can include:
- **Data Disclosure Risks.** If there are possible data disclosure risks (the data pose privacy, confidentiality, or legal concerns, e.g., where data might reveal the identity or location of participants), the authors must specify that data are available on request in the Data Availability Statement and identify the group to which requests should be submitted. The reasons for restrictions on public data deposition must also be specified. Note that it is not acceptable for the authors to be the sole named individuals responsible for ensuring data access.
 - **Data made available by a third party that is not located in a FAIR-aligned repository and without a persistent identifier.** We consider third-party data to be data that cannot be legally distributed by the authors. Authors should share any data specific to their analysis that they can legally distribute. If an author does not have the rights to distribute the data, they must include all necessary contact information in the Data Availability Statement to gain access to the relevant data. If permission is required to use a third-party data set, authors must include the third-party source and verification of permission in the Data Availability Statement, as well as provide proper acknowledgment in the article. Authors are asked to submit information from the data owner that data will be available post-publication, in the same manner as that by which the authors obtained the data.

Preparing your manuscript

For submission, we prefer to receive a single file containing your manuscript, figures, and tables; you can use our checklists and templates in Word and LaTeX. Supporting information and large tables should be uploaded separately.

Your manuscript should be arranged in the following order:

1. **Title page including authors' names and affiliations**
2. **Key Points**
3. **Abstract and Plain Language Summary (required for some journals)**
4. **Keywords**
5. **Text (including appendices) and Equations**
6. **Acknowledgments and Data Availability Statement**
7. **References**
8. **Tables**
9. **Figures**
10. **Supporting information (e.g., graphs)**

Title Page

A title should be specific, informative, and brief. Use abbreviations only if they are defined in the abstract.

Authors are individuals who have significantly contributed to the research and preparation of the article (see specific guidelines above). Group authors are allowed, if each author in the group is separately identified in an appendix or supplement. Other contributors who do not meet the authorship criteria should be acknowledged.

Author affiliations should indicate to the reader where the author was employed or affiliated with at the time of the work. Current addresses or affiliations should be indicated with a footnote. Authors are expected to indicate in the acknowledgements and cover letter any additional affiliations or employment that might be perceived as a conflict of interest related to the paper.

AGU now requires all corresponding authors to register for an ORCID identifier and connect it to your account in our editorial system. We strongly encourage all authors and reviewers to register for an ORCID. Your ORCID identifier will be included in your published manuscript, and we will in turn update your publication list in your ORCID record. Please look for an email message from ORCID and CrossRef to grant permission for this update process. Including your ORCID identifier helps ensure you get credit for your work, improves integrity in publishing, and enables discovery and linking of your publications, datasets, and more.

AGU Journals allow authors to indicate their respective contributions using the CRediT taxonomy. This information will be published with your paper starting in 2018. If a more specific contribution statement is needed, please add a paragraph as part of the acknowledgements.

Key Points

Key Points convey the main points and conclusions of the article. Up to three key point statements are allowed, and each is limited to at most 140 characters with no abbreviations. Key Points are not included in the word count.

Abstract

The abstract (1) states the nature of the investigation and (2) summarizes the important conclusions. The abstract should be suitable for indexing. Your abstract should:

- Be set as a single paragraph.
- Be less than 250 words for all journals except GRL, for which the limit is 150 words.
- Not include table or figure mentions.
- Avoid reference citations unless dependent on or directly related to another paper (e.g., companion, comment, reply, or commentary on another paper(s)). AGU's Style Guide discusses formatting citations in abstracts.
- Define all abbreviations.

Plain Language Summary

A Plain Language Summary (PLS) can be an incredibly effective science communication tool. By summarizing your paper in non-technical terms, you can explain your research and its relevance to a much broader audience. A PLS is required for submissions to *AGU Advances*, *G-Cubed*, *GeoHealth*, *GRL*, *JAMES*, *JGR: Biogeosciences*, *JGR: Oceans*, *JGR: Planets*, and *Reviews of Geophysics*, but optional for other journals. A PLS should be no longer than 200 words and should be free of jargon, acronyms, equations, and any technical information that would be unknown to people from outside your scientific discipline. Read our tips for creating an effective PLS.

Index Terms and Keywords

Index terms are important for discovery and linking your article. Up to five index terms are allowed and are provided at the time of submission. Use the AGU Index Set. Do not use terms ending in “00.”

Authors may also provide up to six keywords which are not included in the word count. These are free-form terms that can be used to facilitate online searches.

Text

Headings. Except for short manuscripts (such as comments and replies), the text should be divided into sections, each with its own heading.

Sections are numbered with Arabic numerals (1, 2, 3, etc.). A maximum of four levels of heads may be used, with subsections numbered 1.1., 1.2.; 1.1.1., 1.2.1; 1.1.1.1., and so on. Headings should be sentence fragments and do not begin with a lowercase letter or number. They should not include parenthetical reference citations or table and figure callouts.

Footnotes. Footnotes are used only for author affiliations and tables. Incorporate all other footnoted information into text.

Reference citations. Use name-date format, not numbered references, and enclose citations in parentheses. In text citations are included in the word count.

(Zhu et al., 2016) or

Zhu et al. (2009)

Detailed citation style can be found in AGU’s Style Guide.

Mathematics. Build equations with Mathtype or the Word Equation Editor (if using Word), or in Latex. *Do not use graphics for equations.* Equations are counted as one word in the word count.

Acknowledgments and Data

The acknowledgments must list:

- All funding sources related to this work from all authors including any source of direct or in-kind support or source of data or samples. Funding information should also be included in the GEMS submission form. We use this information to make your paper available to your funders through CHORUS. Funding information should include the funding body and contribution number.
- Any real or perceived financial conflicts of interests for any author.
- Other affiliations for any author that may be perceived as creating a conflict of interest with respect to the results of the paper. Further explanations for the editors of conflicts of interests, data, or funding information should be included in the cover letter.
- A statement that indicates to the reader where the data supporting the conclusions can be obtained (for example, the name of a FAIR-aligned repository). For more information: Enabling FAIR data guidelines.
- The acknowledgments are also the appropriate place to thank colleagues and other contributors. AGU does not normally allow dedications. Do not include honorifics such as Dr etc.; include first name or initial and last name.
- An optional separate paragraph indicating author contributions beyond that identified in the CRediT taxonomy.

References

All sources cited in text, tables, figures, and supporting information must appear in the reference list. References in supporting information must also be cited in the main text and included in the reference list of the main paper so that they will be discovered, linked, and indexed. A separate reference list in the supporting information is not necessary. Every reference must be available

publicly online or in print before a paper can be accepted. *Thus “unpublished” or “in press” references are not allowed.* Reference text is not included in excess length calculations.

AGU follows the Joint Declaration of Data Citations Principles and the Enabling FAIR data guidelines. Authors should cite data and software in the reference section of their manuscript. Authors should strive to archive their data in repositories practicing the FAIR principles. AGU’s Publications Style Guide offers examples and style information.

Reference availability

In order for reviewers and readers to assess any paper fully at the time of publication, AGU does not accept citations to in-preparation or submitted/under review-manuscripts. The Editorial Board can, in exceptional circumstances, allow citation of submitted/under review works which are intimately associated with the manuscript submitted to this or other AGU journals. An example would be a companion manuscript submitted to this or another AGU journal where the intent is to have them published together so that cross-citations can be fully updated before publication. Authors willing to cite submitted/under review works must, at submission time, (1) upload a PDF copy of the unpublished work(s), and (2) use the ‘cover letter’ field to justify to the editor why an ‘under review’ reference is required. In the event an exception is granted, the submitted/under review work(s) will have to be accepted or published in its respective journal(s) by the time of acceptance of the manuscript.

Tables

Data sets should be deposited in appropriate repositories practicing FAIR principles (see data section above). Tables can still be used within a manuscript or supporting information as summaries or averages of deposited data or for tabulated information (e.g., standard values used for variables or parameters).

Every table must have a unique title. Explanatory information and definitions should be included in a footnote to the title.

Column heads. All columns (except the first one) must have headings.

Additional information on table formatting is available in AGU’s Publications Style Guide.

Figures

AGU recommends that figures be prepared in one of the following formats: JPG, TIFF, EPS, PS or PDF. Figures should be embedded in the main manuscript for submission but uploaded separately at resubmission or revision (because separate files are needed for production). For revision, each figure file must be complete and contain all parts of a single numbered figure. Do not include figure captions or figure titles (e.g., “Figure 1”) as any part of the figure. Separate files for different parts of a figure cannot be accommodated.

Each figure should also have a caption in the text. These can be placed near the figure at submission.

- Indicate latitude and longitude on maps.
- Use lowercase letters (a, b,c...) to label parts of the figure; do not use Arabic or roman numerals. Combine all figure parts into a single figure.
- When possible, include the figure label in the top left corner of each plot.
- Do not include information in a figure that could easily be included in the caption.
- Cite each figure in numerical order in text. Figures in the main body of the text should be numbered consecutively, not by section. Appendix figures should be numbered separately from the body and should begin with the letter of the appendix (e.g., figure A1 for the first figure in Appendix A).

Figures larger than a typical PDF page (e.g., a large map) should be included as a supplement.

Copyrighted Material

Authors who use figures or other material (e.g., graphics,) from another author or copyright holder must obtain permission to do so. This includes any figures redrawn but basically unaltered or with only slight modifications. Permission is not needed for material that originated in AGU journals or is in the public domain.

Permission must allow for the distribution of the material in any and all media in current and future formats.

Obtaining permission can be a lengthy process, so please make sure that you have the necessary permissions before you submit your manuscript to AGU.

Permission(s) should accompany the revised manuscript when submitted. Articles will not be published until permissions are received at AGU.

Supporting Information

Supporting text and images/figures should be included in one .PDF file, except where limited by file type or size. Movies, .zip archives, and other files can be uploaded separately. Authors should download and make use of our templates. Supporting text can include methods or other information about samples or summary data. Discussion or interpretations should be in the main text only.

All supporting information will be reviewed with your manuscript. References cited in supporting information must also be included in the main text so that they will be discovered, linked, and indexed. A separate list in the supporting information is not necessary. Reference text does not count toward length limits.

Please see Supporting Information Guidelines for more information.

ANEXO C – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO 1

The screenshot shows a web browser window with the URL `editorialmanager.com/ecomod/default.aspx`. The page header includes the "ECOLOGICAL MODELLING" logo and the "Editorial Manager" logo. The user is logged in as "Role: Author" with the username "lisboa.ds". A navigation menu contains links for HOME, LOGOUT, HELP, REGISTER, UPDATE MY INFORMATION, JOURNAL OVERVIEW, MAIN MENU, CONTACT US, SUBMIT A MANUSCRIPT, INSTRUCTIONS FOR AUTHORS, and PRIVACY.

The main content area is titled "Submissions Being Processed for Author Danilo Silva Lisboa, Ph.D". It shows a pagination of "Page: 1 of 1 (1 total submissions)" and a "Display 10 results per page." dropdown menu.

Action	Manuscript Number	Title	Initial Date Submitted	Current Status
Action Links		Probabilistic modeling of coral bleaching: a methodological review and a case of formalizing the conceptual model of short-term forecasting in the Atlantic Ocean	02/09/2021	Submitted to Journal

At the bottom of the table, there is another pagination and display settings section: "Page: 1 of 1 (1 total submissions)" and "Display 10 results per page."

ANEXO D – COMPROVANTE DE ACEITE DO ARTIGO 2



Geophysical Research Letters

RESEARCH LETTER

10.1029/2019GL086442

Key Points:

- The relationships between El Niño, thermal anomalies, and reef observations were used to construct coral bleaching seasonal forecast models
- A Bayesian machine learning approach was suitable for organizing five environmental variables based on historical bleaching occurrences
- Data mining and performance measures were undertaken to evaluate the feasibility of the model to perform short-term coral bleaching forecast

Supporting Information:

- Supporting Information S1

Correspondence to:

D. S. Lisboa,
lisboa.ds@gmail.com

Citation:

Lisboa, D. S., & Kikuchi, R. K. P. (2020). Will coral reefs in the North Atlantic Ocean bleach during the next season? A probabilistic answer. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086442. <https://doi.org/10.1029/2019GL086442>

Received 4 DEC 2019

Accepted 17 APR 2020

Accepted article online 23 APR 2020

Will Coral Reefs in the North Atlantic Ocean Bleach During the Next Season? A Probabilistic Answer

D. S. Lisboa^{1,2} and R. K. P. Kikuchi¹

¹Coral Reef and Global Climate Change Research Group, Federal University of Bahia (UFBA), Salvador, Brazil,

²Postgraduate Program in Geology, Federal University of Bahia (UFBA), Salvador, Brazil

Abstract Coral bleaching in the North Atlantic Ocean was modeled based on the historical relationship between reef observations (1987–2011), El Niño indicators and thermal seawater anomalies. The model components were hierarchically organized into a Bayesian network structure according to their level of influence on coral bleaching to generate seasonal predictions to be confirmed (or not) by the near-real-time forecast at ~5 km scale. Validations and score steps, used as a criterion for comparison between competing models, proved the viability of the Bayesian approach to perform seasonal forecasts of the bleaching occurrence, achieving an overall hit rate of 84%. Custom models with databases restricted to specific situations are presented as an alternative to improve the accuracy levels but at the cost of the loss of predictive ability. The models were developed to be conceptually simple and useful tools to assist environmental management through an early warning system for coral bleaching.

Plain Language Summary We developed a model capable of carrying out seasonal forecasts based on the assumption that coral bleaching in the North Atlantic Ocean is caused by a series of concatenated phenomena that begin with the El Niño phenomenon and manifest in the study area as temperature anomalies. Thus, we built a Bayesian network from the cause-effect relationships between a set of relevant environmental variables and coral bleaching observations collected over 24 years. The model presented a coherent ordering of variables that allowed over 80% accurate predictions of the coral bleaching occurrence. In addition, models constructed for specific situations were even more accurate, suggesting the applicability of the model as a potentially useful tool for performing reliable short-term coral bleaching predictions.

1. Introduction