

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO PREVISÃO DO BRANQUEAMENTO DE CORAIS EM ESCALA GLOBAL

Douglas Francisco Marcolino Gherardi ¹

Luiz Eduardo de Souza Moraes ²

Lilian Anne Krug ³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
douglas@dsr.inpe.br

²Gerência de Instrumentos e Gestão de Território - Instituto Estadual do Ambiente
Av. Venezuela, 110 - Saúde - 20.081-312, Rio de Janeiro - RJ
ledumoraes@gmail.com

³Centro de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Algarve
Campus das Gambelas. 8005-139. Faro - Portugal
lakrug@ualg.pt

Abstract. Global coral bleaching episodes as those reported in 1982-83 and 1997-98, showed significant intra-regional differences in intensity. These bleaching events are generally associated to climatic forcing, namely thermal anomalies triggered by El Niño events. Evidences show that regional scale environmental variability is one important component that determine the severity of coral bleaching outbreaks. The combined use of remote sensing and model reanalysis data with probabilistic graphical models forms the basis of a process oriented model used to predict bleaching intensity. This model scheme was first applied to back-predict bleaching intensity in seven reef sites across Bahia state coast in Brazil. There is now an ongoing research initiative aimed at testing the robustness of this approach in two areas within the Caribbean region, using bleaching data from the Reefbase Project. Area 1 encompassing Yucatán and Belize, and Area 2 including Florida, Bahamas, Cuba, Jamaica, Haiti, Dominican Republic and Puerto Rico. We have achieved a predictive rate for bleaching of up to 88% with a clear dependence of the five-day accumulated sea surface temperature (SST) and a secondary influence of the wind regime. Area 1 of the Caribbean showed a clear bleaching dependence on the five-day maximum SST, surface salinity and the El Niño Multivariate Index (MEI). Area 2 showed that bleaching is conditionally dependent on the zonal surface current and wind fields and with MEI. These results give a good indication that the increase in the conditional dependencies, compared to the Bahia experiment will contribute to more robust predictions and acceptable prediction rates.

Palavras-chave: remote sensing, reanalysis, coral bleaching, Bayesian networks, sensoriamento remoto, reanálise, branqueamento de corais, redes Bayesianas.

1. Introdução

As estruturas recifais biológicas construídas por colônias de corais hermatípicos apresentam alta produtividade primária e elevada diversidade biológica, propiciando importantes serviços ecossistêmicos. Estes organismos mantêm uma associação simbiótica com grupos de microalgas dinoflageladas, denominadas zooxantelas. Nesta simbiose, as microalgas beneficiam-se da proteção fornecida pelos indivíduos (pólipos), utilizando-se de produtos gerados por seu metabolismo como gás carbônico (CO₂), nitrogênio e fósforo (Wood, 1983). Os pólipos, por sua vez, recebem das algas compostos orgânicos necessários à sua atividade metabólica (Tanaka et al., 2006). As zooxantelas também auxiliam na formação das estruturas calcárias, utilizando o excesso de CO₂ produzido pelo metabolismo individual dos pólipos. Desta forma, os recifes coralíneos assumem importante papel como sumidouros do CO₂, um importante. O branqueamento de corais consiste na eliminação das zooxantelas pelos pólipos, causando uma descoloração dos corais e uma ruptura na relação simbiótica. Este processo não causa, necessariamente, a morte das colônias de corais, mas o branqueamento aumenta a sua vulnerabilidade a outros agentes estressantes, que podem levar à morte dos pólipos (Glynn, 1996).

O branqueamento decorre de condições ambientais estressantes, induzidas por forçantes locais e regionais e moduladas pela variabilidade oceânica e atmosférica (Carpenter et al., 2008). Em escala regional, os eventos de branqueamento têm sido associados a aumentos na incidência de radiação ultravioleta (Gleason & Wellington, 1993; Fitt et al., 2001), a anomalias extremas (positivas e negativas) de temperatura superficial do mar (TSM) (Hoeg-Guldberg & Fine 2004), a mudanças na circulação local (Smith, 2001), a ocorrência de baixas salinidades e ao aumento da turbidez (Glynn, 1993). O branqueamento em larga escala pode resultar de extremos positivos de TSM (Tupper et al., 2013) relacionados a episódios de El Niño de grande intensidade. Embora a TSM seja considerada como o principal fator de estresse, os eventos de branqueamento podem resultar de interações complexas entre os fatores físicos supracitados. Além disto, a susceptibilidade dos corais pode variar entre diferentes espécies, e para uma mesma espécie, em função de fatores genéticos, e associados à interação hospedeiro-simbionte (Podestá and Glynn, 2001; Baker et al., 2008).

Por causa destas interações complexas entre a atmosfera, os oceanos e a biologia dos corais, torna-se um desafio a tentativa de antecipar eventos futuros de branqueamento de corais. Uma forma de atacar esta questão é com o uso de redes bayesianas, que permitem a elaboração de modelos orientados por processo, com representação explícita das relações entre as variáveis de interesse. As incertezas e complexidades são incorporadas através da propagação de evidências com base em probabilidades condicionais. Modelos que traduzem estas relações complexas podem ser utilizados na quantificação das probabilidades de branqueamento, assumindo-se níveis críticos para determinadas condições ambientais. O método permite o uso de diferentes tipos de dados, fornecendo atualização constante dos resultados, mediante a incorporação de novas informações durante a análise. Isso torna a metodologia flexível o suficiente para permitir o desenvolvimento de ferramentas operacionais para previsão do branqueamento.

2. Áreas de estudo e dados ambientais

A ênfase aqui será na metodologia utilizada para o estudo do branqueamento de corais no Caribe, apresentada na Figura 1. Esta é, em sua estrutura, idêntica àquela empregada para os corais da Bahia e está descrita em Krug et al. (2013).

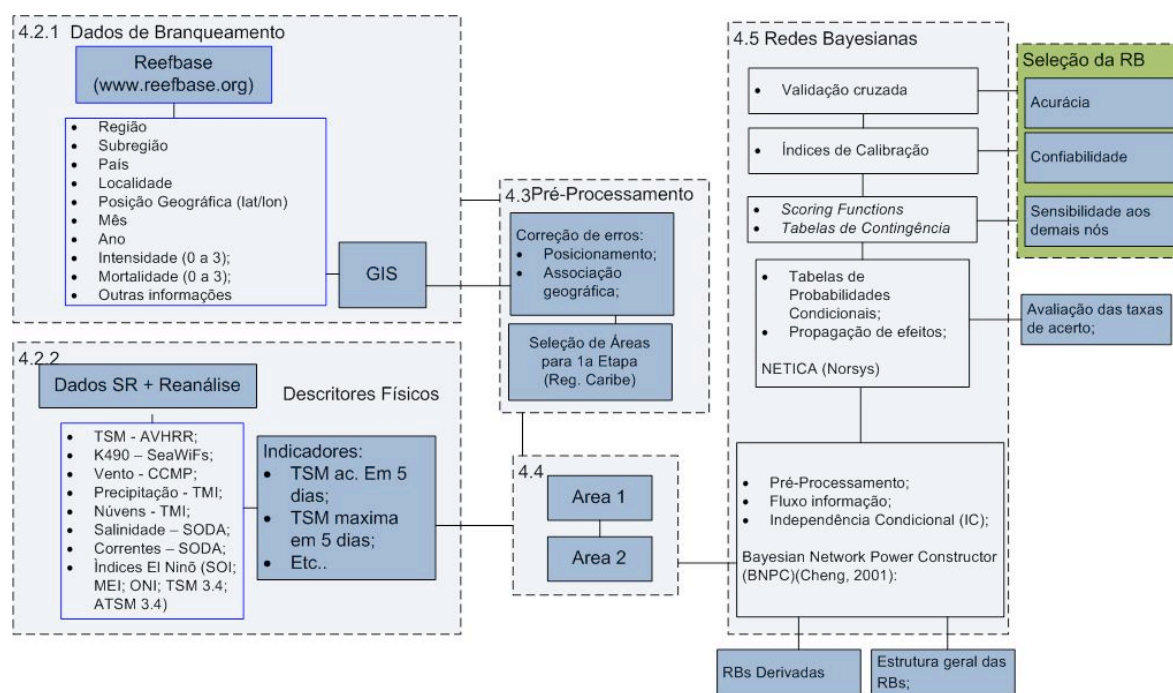


Figura 1. Fluxograma que descreve os procedimentos metodológicos.

Os registros de branqueamento de corais foram obtidos da base de dados mantida pelo Projeto Reefbase (<http://www.reefbase.org>), que incorpora dados do Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN; acessível em <http://gcrmn.org>) e registros reportados voluntariamente pela comunidade científica através de relatórios padronizados de branqueamento. O período de cobertura para a Bahia foi de 1998 a 2005 (veja Figura 1 de Krug et al., 2013) e no Caribe, estendeu-se até 2009 para a Área I (Península de Yucatan, México e Belize, Figura 2), com 945 registros, e até 2010 para a Área II (Florida, Cuba, Bahamas, Jamaica, Dominica e Porto Rico, Figura 3), com 345 registros. Os episódios de branqueamento são classificados de acordo com sua severidade, de 1 a 3; sendo 1 como severidade desconhecida e 3 como severidade alta. Os dados de TSM foram obtidos por radiômetros termiais, a bordo dos satélites TIROS e NOAA. O processamento, organização e livre disponibilização para a comunidade científica são providos pelo Projeto *Pathfinder* (PODAAC/NASA), atualmente em sua versão 5.2 (<http://www.nodc.noaa.gov>). Os dados possuem resoluções espacial de 4 km, e temporal diária, cobrindo o período de 1985 a 2009. Os dados de TSM originaram dois produtos: a TSM máxima acumulada em períodos de cinco dias ($T_{mac_5d_d}$) e a TSM máxima correspondente às penteadas do mês de branqueamento ($T_{max_5d_d}$). As componentes zonal ($u_{curr_Xm_d}$) e meridional ($v_{curr_Xm_d}$) de velocidade das correntes superficiais oceânicas ($m.s^{-1}$) a 5m e 15m de profundidade, a salinidade (sal_Xm_d , em ppm), nas mesmas profundidades, foram obtidas dos conjuntos de reanálises SODA.

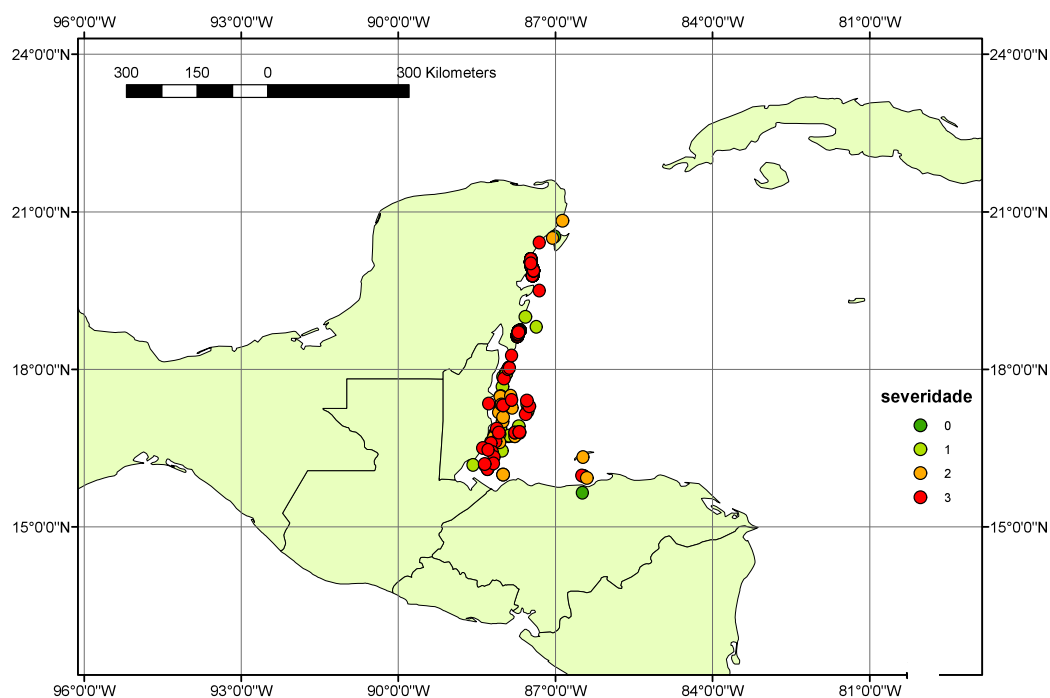


Figura 2. Mapa da área 1 com a localização das informações sobre a severidade do branqueamento de corais.

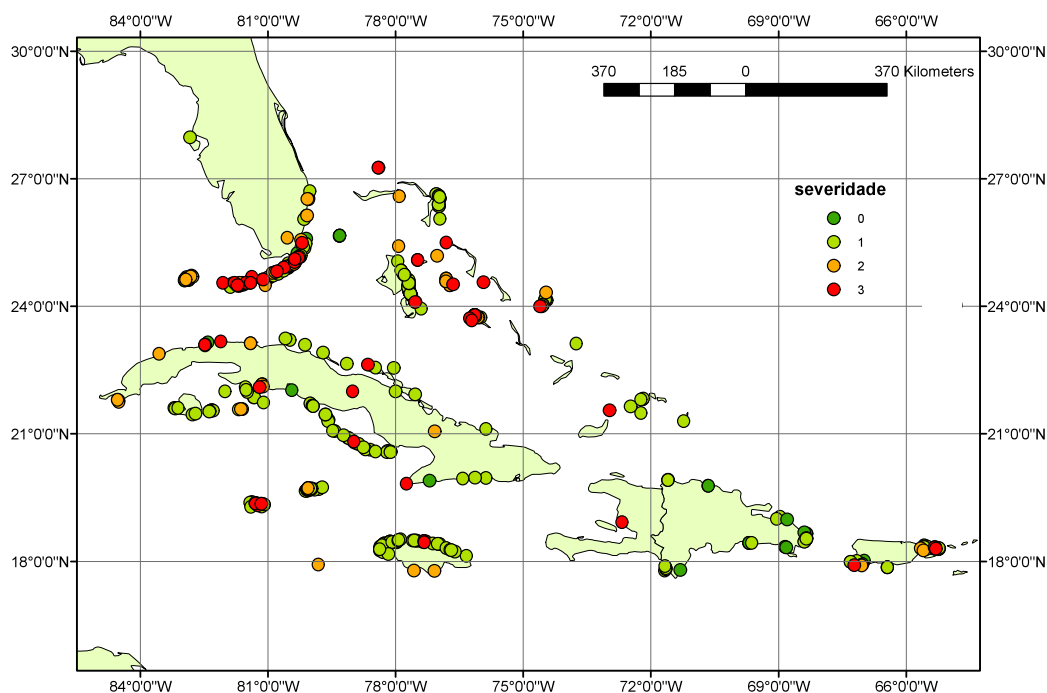


Figura 3. Mapa da área 2 com a localização das informações sobre a severidade do branqueamento de corais.

O coeficiente de atenuação difusa para o comprimento de onda de 490 nm (K_{490_d} , m^{-1}) foi obtido do sensor SeaWiFS (1998 – 2010), sendo processada e disponibilizada pelo Projeto Ocean Color (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Foram empregadas composições (médias) de 8 dias, com resolução espacial de 9 km. Os dados de precipitação atmosférica (RAIN_d) e

nuvens (Cloud_d) (mm) foram obtidos pelo sensor TRMM Microwave Imager (TMI), radiômetro que opera na faixa das micro-ondas, voando a bordo da plataforma TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), sendo processados, organizados e distribuídos pela Remote Sensing Systems (<http://www.ssmi.com>). O período de cobertura compreende os anos de 1998 a 2012. Os dados empregados possuem resolução temporal diária, e espacial de aproximadamente 25 km, sendo calculados os totais mensais para os períodos de interesse. As componentes de velocidade do vento (uw_d, vw_d, e wspd_d (resultante); em m.s-1) foram obtidos de produtos Cross Calibrated Multi Platform (CCMP), que resultam do processamento de dados de vento de diversos sensores (

Os seguintes índices foram utilizados para a caracterização de episódios El Niño: SOI (Southern Oscillation Index; adimensional; <http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi.php>) (SOI_d e SOI_Std_d); ONI (oceanic Niño Index; °C; http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml); e o MEI (Multivariate ElNiño Index, adimensional; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>) (MEI_d), além da TSM média (CSST_N34_d), e anomalias da TSM (SSTA_N34_d) na Região Niño 3.4.

3. Modelagem em redes bayesianas

Para a construção das redes Bayesianas (Figura 1) as variáveis foram discretizadas no programa Data Pre-Processor (Cheng, 2007), gerando conjuntos de estados (6 categorias) para cada nó. Os nomes atribuídos aos estados dizem respeito apenas aos valores observados, não guardando relação com o histórico dos fenômenos. Com os estados definidos, as relações de dependência condicional entre os nós foram analisadas por um processo iterativo, utilizando-se o Programa Bayesian Network Power Constructor (BNPC) (Cheng, 2002; 2007). A estruturação das Redes Bayesianas utilizou métodos do tipo search and score e de independência condicional. Inicialmente as redes, para cada área, foram definidas em função dos respectivos fluxos de informação, sem considerar qualquer condicionante baseada em conhecimento prévio sobre as relações causais entre os nós. Em seguida, as redes foram refinadas, eliminando-se nós redundantes, mantendo-se os nós com influência sobre o nó "branqueamento", e inserindo-se informações sobre as relações causais entre as variáveis (ordenamento e relações nó-pai x nó-filho não-permitidas). Este processo gerou uma RB para cada área, que serão analisadas a seguir. Uma vez criadas as Redes Bayesianas, foram calculadas as Tabelas de Probabilidades Condicionais (TPCs), que fornecem as probabilidades para cada estado do nó, dado(s) o(s) estado(s) do(s) nó(s) pai. Esta etapa foi conduzida no aplicativo Netica (NORSYS, 2006), que emprega o algoritmo de inferência probabilística desenvolvido por Lauritzen e Spiegelhalter (1988) no processo de propagação de evidências.

4. Resultados e discussão

As RBs desenvolvidas para os corais da Bahia tiveram uma taxa máxima de acerto nas previsões de 88%, relacionando as variáveis do ambiente termal com o branqueamento em todos os testes (Figura 4). Este resultado concorda com a expectativa da TSM ser a principal responsável pelo branqueamento. Entretanto, mostra também que as informações contidas nas variáveis localizadas acima da TSM acumulada de 5 dias (nós pai) são pouco relevantes para

a previsão do branqueamento. Isto, possivelmente, é resultado do pequeno número de amostras (17 amostras, compare com 1290 registros para o Caribe). O impacto do El Niño sobre os corais foi indicado pelo MEI de duas formas, com ou sem defasagem de sete meses (MEI_7). Foi notado que os algoritmos de aprendizado conectaram o MEI_7 diretamente a uma variável relacionada ao ambiente termal (PCA, na rede de ambiente termal) enquanto o MEI se conectou com nós relativos a variáveis atmosféricas. Isto confirma os resultados de Soppa (2007) que relacionou o MEI com variáveis ambientais e encontrou para a TSM maiores correlações com o índice defasado em sete meses. Como as outras RB sugerem, o branqueamento apresenta alguma dependência condicional com as variáveis atmosféricas. Os dados de precipitação e de vento entraram em três das quatro RBs construídas.

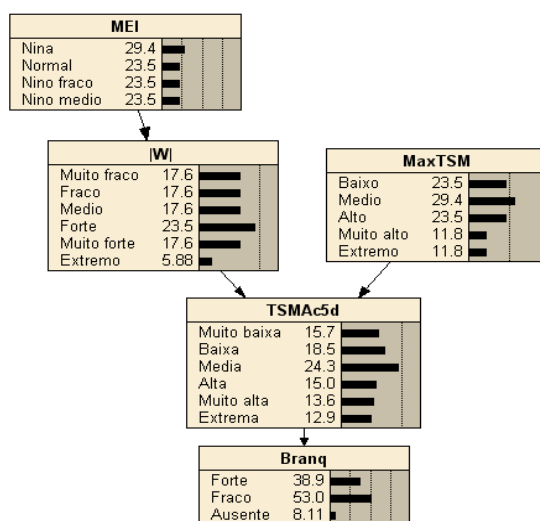


Figura 4. Rede Termal-eólica relacionando o índice multivariado do El Niño (MEI), a resultante do vento a 10 m da superfície do mar (W), a máxima TSM (MaxTSM), a TSM acumulada de 5 dias (TSMac5d) e branqueamento (Branq).

Embora ainda não tenham sido realizados os testes de acurácia, confiabilidade e sensibilidade para as redes do Caribe, as redes geradas mostram que, para a Área 1 (Península de Yucatan e Belize), o nó de branqueamento é relacionado principalmente à TSM máxima correspondente às penteadas do mês de branqueamento (Tmax_5d_d), da salinidade superficial e o MEI (Figura 5). Para a Área 1, observa-se uma relação de dependência com as variações na TSM local, em especial com persistência de temperaturas mais altas. Essa relação de dependência probabilística, entretanto, ocorre em sinergia com a salinidade local, e ocorre também associada ao regime de oscilação Niño predominante. Em geral, os resultados mostram o aumento das probabilidades de intensificação do branqueamento, quando as temperaturas máximas locais atingem valores acima de 28°. Curiosamente, os efeitos do aquecimento local (Tmac_5d_d) aparentemente não alteram as probabilidades de ocorrência de branqueamento, o que pode estar relacionado à limitações, em termos da aquisição em escala diária, relativa aos dados de sensoriamento remoto. A relação com a TSM é amplamente registrada para outras regiões do globo (Brown, 1997; Fitt et al., 2001; Hoeg-Guldberg e Fine, 2004; Belkerman et al., 2004; Goreau e Hayes, 2005). Por outro lado, os efeitos relacionados ao processo de aquecimento local são relatados em Wooldridge e Done (2004) e em Belkerman et al. (2004). Para a área 2, o nó de branqueamento assumiu relação de dependência condicional com a componente zonal da corrente a 15m de profundidade (u_curr15m_d), com a componente zonal do vento na superfície (uw_d) e com o Índice MEI (Figura 6). Não se observa para a Área 2 qualquer dependência condicionada com a TSM.

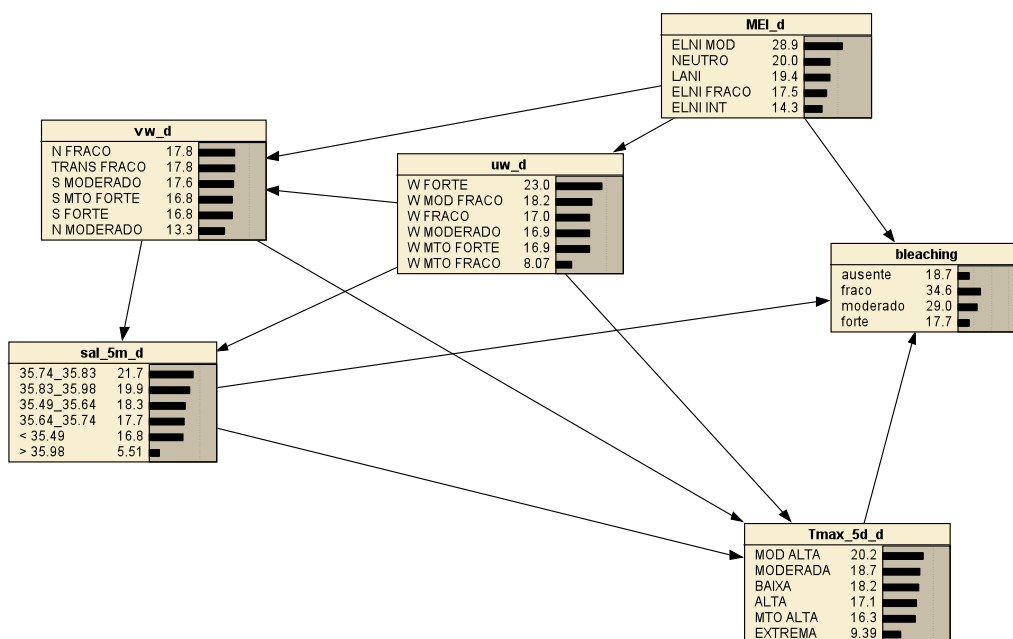


Figura 5. Rede Bayesiana para a área 1. Note o branqueamento (bleaching) é diretamente influenciado pelo MEI, a TSM máxima de 5 dias no mês de ocorrência do branqueamento e da salinidade.

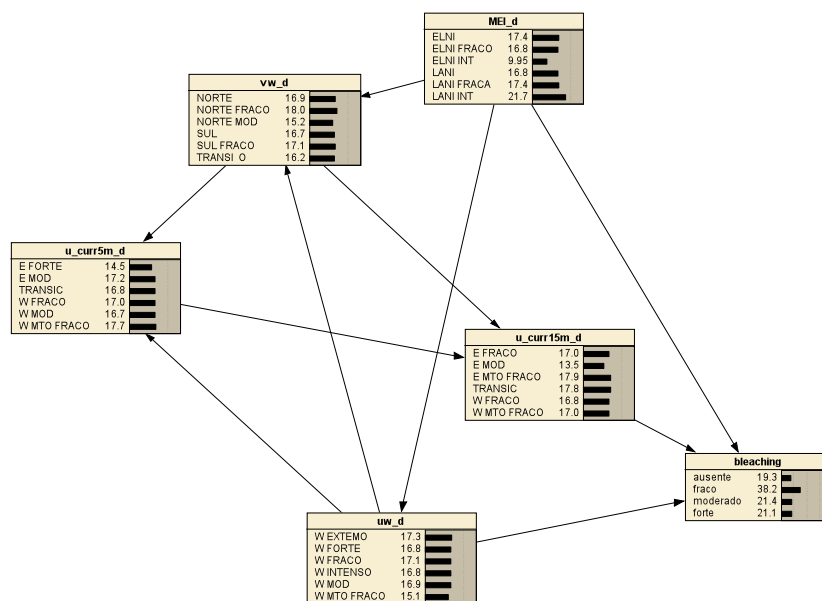


Figura 6. Rede Bayesiana para a área 2. Note o branqueamento (bleaching) é diretamente influenciado pelo MEI, pela componente zonal da corrente a 15m de profundidade (u_curr15m_d) e pela componente zonal do vento na superfície (uw_d).

5. Conclusões

O modelo de previsão do branqueamento dos corais da costa da Bahia alcançou um percentual de acerto elevado. Entretanto, a dependência isolada da TSM indica que as outras variáveis não são relevantes para o processo de branqueamento, o que contradiz a hipótese da influência de diferentes fatores ambientais. Os modelos para a região do Caribe sugerem que

o aumento no número de registros de branqueamentos utilizados pode conferir maior robustez ao modelo. No caso da área 1, os resultados sugerem uma maior influência das reduções de salinidade durante episódios de Niño fracos, ao passo em que os efeitos associados a TSMs máximas mantêm um padrão consistente em episódios de diferentes intensidades. Para a área 2, os resultados sugerem efeitos inversos para a intensidade da componente zonal do vento e para as correntes em sub superfície. Em Niños fracos a ocorrência de ventos intensos a oeste e correntes fracas parece intensificar as probabilidades para eventos de branqueamento. Em Niños moderados e fortes, esse padrão se inverte.

6. Referências Bibliográficas

- Baker A.C., Glynn P.W., Riegl B. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 80, p. 435-471, 2008.
- Belkermans, R.; De'ath, G.; Kininmonth, S.; Skirving, W. J. A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: spatial correlation, patterns, and predictions. **Coral Reefs**, v. 23, n.1, p. 74-83, 2004.
- Brown, B. E. Coral bleaching: causes and consequences. **Coral Reefs**, v.16, n. 1, p. 129-138, 1997.
- Carpenter K.E., Abrar M., Aeby G., Aronson R.B., Banks S., Bruckner A., et al. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. **Science**, v.321, p. 560-563, 2008.
- Cheng, J.; Griener, R.; Kelly, J.; Bell, D.; Liu, W. Learning bayesian networks from data: an information-theory based approach. **Artificial Intelligence**, v. 137, n. 3, p. 43-90, 2002.
- Cheng, J. **Belief Network PowerConstructor 2.2 Beta**. Alberta: 2001. Disponível em: < <http://www.cs.ualberta.ca/~jcheng/bnpp.htm>>. Acesso em: 15 dez. 2012.
- Fitt W.K., Brown B.E., Warner M.E., Dunne R.P. Coral bleaching: interpretation of thermal tolerance limits and thermal thresholds in tropical corals. **Coral Reefs**, v. 20, p.51-65, 2001.
- Gleason D.F., Wellington G.M. Ultraviolet radiation and coral bleaching. **Nature**, v. 365, p. 836 - 838, 1993.
- Glynn P.W. Coral reef bleaching. **Coral Reefs**, v. 12, p.1-17, 1993.
- Glynn, P.W. Coral reef bleaching: facts, hypotheses and implications. **Global Change Biology**, v. 2, p. 495 - 509, 1996.
- Goreau T. F. Mass expulsion of zooxanthellae from Jamaican reef communities after Hurricane Flora. **Science**, v. 145, p. 383-386, 1964.
- Hoegh-Guldberg O.; Fine M. Low temperature cause coral bleaching. **Coral Reefs**, v. 23, p. 444, 2004.
- Krug L.A., Gherardi D.F.M.; Stech J.L.; Leão Z.M.A.N.; Kikuchi R.K.P.; Hrushka JR. E.R.; Suggett D.J. The construction of causal networks to estimate coral bleaching intensity, **Environmental Modelling & Software**, v. 42, p. 157-167, 2013.
- Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J. Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. **Journal of the Royal Statistical Society B**, v. 50, p. 157-224, 1988.
- NORSYS. Netica 3.17. Vancouver: Norsys Software Corp. 2006. Disponível em: < www.norsys.com>. Acesso em: 03 dez. 2013.
- Podestá G.P., Glynn P.W. The 1997-98 El Niño event in Panamá and Galápagos: an update of thermal stress indices relative to coral bleaching. **Bulletin of Marine Sciences**, v. 69, p.43 – 59, 2001.
- Tanaka, Y.; Miyajima, T.; Koike, I; Hayashibara; Ogawa, H. Translocation and conservation of organic nitrogen within the coral-zooxanthella symbiotic system of *Acropora pulchra*, as demonstrated by dual isotope-labeling techniques. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 336, n.1, p.110-119, 2006.
- Tupper, M.; Tan, M.K.; Tan, S.L.; Radius, M.J.; Abdullah, S. **ReefBase: A Global Information System on Coral Reefs**. Disponível em: <<http://www.reefbase.org>> Acesso em: março de 2013.
- Wood, E. M. **Corals of the world**. Neptune City: T. F. H. Publications, 1983. 256p.
- Wooldridge S.; Done T. Learning to predict large-scale coral bleaching from past events: a bayesian approach using remotely sensed data, insitu data, and environmental proxies. **Coral Reefs**, v. 23, p. 96-108, 2004.