



Caracterização espectral de corais do Sudoeste do Atlântico

Spectral library of Southwest Atlantic Corals

*Thais Andrade Galvão de Medeiros*¹
*José Carlos Sícoli Seoane*²
*Cassia Cristina de Azevedo Cubas Jonck*³
*Cátia Fernandes Barbosa*⁴
*Gustavo Macedo de Mello Baptista*⁵
*Marjorie Csekö Nolasco*⁶

Recebido em novembro de 2017.
Aprovado em julho de 2018.

RESUMO

Os recifes de coral são um dos ecossistemas mais ricos e diversos na Terra e atualmente tem sofrido diversos impactos sejam eles naturais ou antrópicos. O sensoriamento remoto tem se transformado em um mecanismo na busca da conservação destes ambientes. Conhecer as respostas espectrais dos organismos estudados aumenta a eficiência do uso desta ferramenta nos estudos ambientais. Este trabalho tem como finalidade aumentar o conhecimento acerca dos dados espectrais de corais saudáveis e branqueados coletados no Atlântico Sul. Para isto foram utilizadas diversas análises tais como: análise de médias, derivadas e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI- Normalized Difference Vegetation Index). Ao todo foram coletados 67 dados espectrais de corais e hidrocoral saudáveis e branqueados de diversas espécies endêmicas, de grande resistência e encontradas em outros recifes do Atlântico, as quais são: *Agaricia agaricites*, *Favia gravida*, *Mussismilia braziliensis*, *Mussismilia harttii*, *Porites astreoides*, *Siderastrea stellata* e o hidrocoral *Milepora alcicornis*. Os resultados mostram que a maioria dos corais e o hidrocoral coletados são classificados como corais marrons, e que a espécie *P. astreoides*, diferente do

¹Thais Andrade Galvão. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: thais.agmedeiros@gmail.com

²José Carlos Sícoli Seoane. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: cainho.geo@gmail.com

³Cassia Cristina de Azevedo Cubas Jonck. Programa de Pós-graduação em Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, Brasil. E-mail: quimicassia@gmail.com

⁴Cátia Fernandes Barbosa. Programa de Pós-graduação em Geoquímica, Universidade Federal Fluminense, Brasil. E-mail: catiafb@id.uff.br

⁵Gustavo Macedo de Melo Baptista. Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília, Brasil. E-mail: gmbaptista@unb.br

⁶Marjorie Csekö Nolasco. Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Universidade Estadual de Feira de Santana, Brasil. E-mail: mcn@uefs.br

observado em outros recifes no mundo, seria classificada como azul. As técnicas utilizadas corroboraram com outros trabalhos previamente publicados revelando que é possível separar espectralmente corais saudáveis e branqueados. As diferenças observadas nas derivadas sugerem que seja possível separar estes corais em diferentes espécies, indo além da classificação geral: marrom e azul e a análise do NDVI mostrou a proximidade existente entre os corais branqueados e a espécie *P. astreoides*, e que provavelmente esta relação esteja relacionada com a concentração de clorofila-a nestes organismos.

PALAVRAS-CHAVE: Assinaturas espectrais. Corais do Atlântico Sul. Análise de derivadas. NDVI.

ABSTRACT

Coral reefs are one the richest and most diverse ecosystems, which currently has been suffering from natural and anthropogenic impacts. Remote sensing has acquired paramount importance as a tool for the conservation of this environment, yet its more efficient use depends on the spectral response/data of the organisms. The present study aims to improve the knowledge about healthy and bleached coral's spectral data in the South Atlantic. We used diverse methods: mean analysis, first and second derivatives and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). We collected 67 spectral samples of healthy and bleaching corals and hydrocoral, namely: *Agaricia agaricites*, *Favia gravida*, *Mussismilia braziliensis*, *Mussismilia harttii*, *Porites astreoides*, *Siderastrea stellata* and the hydrocoral *Milepora alcicornis*. The results revealed that most corals and the hydrocoral were classified as brown corals, and the species *P. astreoides*, differently from what was observed elsewhere, was classified as blue coral. Our analyses corroborate works previously published by other researchers, confirming the feasibility of distinguishing spectrally healthy and bleached corals. Differences observed in the derivative suggest the possibility of separating these corals into different species. The NDVI showed the proximity existing between bleached corals and the specie *P. astreoides*, a phenomenon that is probably related to the concentration of chlorophyll-a.

KEYWORDS: Spectral data. South Atlantic's corals. Derivative Analyses. NDVI.

* * *

Introdução

Um dos objetos de estudo do sensoriamento remoto em ambientes marinhos é o comportamento espectral das comunidades bentônicas dos recifes de corais.

O comportamento ou assinatura espectral é definido pelo conjunto de valores sucessivos da energia refletida do objeto ao longo do espectro

eletromagnético e define feições que o caracterizaram pela localização, forma e intensidade de cada banda de absorção (MORAES, 2002).

O conhecimento preliminar do comportamento espectral dos alvos é de extrema importância para informações por meio da interpretação de imagens orbitais e para análise quantitativa (MELENDEZ-PASTOR et al., 2008). A ligação entre os objetos da superfície terrestre e os sensores remotos que os observam é a radiação eletromagnética (REM) logo, entender o funcionamento das interações entre a REM e os objetos torna-se requisito fundamental para interpretar os dados fornecidos pelos sensores (ALVARENGA et al., 2003).

Os primeiros trabalhos que investigaram as assinaturas espectrais de corais foram realizados no final dos anos 90. Holden e LeDrew (1998) analisaram um total de 22 assinaturas espectrais coletadas in situ do gênero *Acropora* (saudável e branqueada), fragmentos e algas que cobriam os corais mortos. Por meio da análise de agrupamento, componentes principais e análise de derivadas mostraram estatisticamente as diferenças entre os espectros.

Myers (1999) descreveu como os dados hiperespectrais podem ser usados para distinguir corais branqueados, pigmentados e macroalgas nos recifes das Bahamas. Em Kaneohe Bay, Oahu, Havaí, Hochberg e Atkison (2000) utilizaram derivadas, técnicas multivariadas de seleção de comprimento de onda e análise de discriminante linear em 274 dados de reflectância in situ. Eles mostraram que era possível separar o bento recifal em três grupos: coral, alga e areia.

Andrefouët (2001) e Hochberg et al. (2003) utilizaram os dados de assinaturas espectrais para classificar os corais saudáveis em dois grandes grupos: marrom e azul. Eles associaram esses dados aos pigmentos existentes nos simbiontes e no tecido do próprio coral. O primeiro é identificado por apresentar um triplo-pico, caracterizado primeiramente por uma depressão na reflectância entre 400 e 550 nm e por feições positivas, ou similares a ombros, próximas a 575, 600 e 650 nm. Os corais que apresentam as

colorações marrom, vermelho, laranja, amarelo ou verde se enquadram nesse padrão. Enquanto que o modelo azul, encontrado nos corais com cores roxo, azul, rosa ou cinza, não possui a feição centrada em 575 nm, possuindo um platô entre 600 e 650 nm.

Os pigmentos das zooxantelas são os componentes mais significantes da assinatura espectral dos corais. A clorofila-a (Cla), Peridina (Perid), clorofila-c (Clc), Diadinoxantina (Diad) e β -caroteno (β -Car) foram identificados como sendo os mais frequentes nesses simbioses, entretanto, a sua composição pode variar mediante fatores ambientais. Os espectros dos pigmentos, como a clorofila, podem ser similares entre as espécies, porém diferenças nas densidades dos pigmentos podem representar mudanças em sua amplitude. Os corais também produzem seu próprio pigmento, sendo conhecido como proteínas verde fluorescente (*Green Fluorescent Proteins* – GFP), que podem ser fluorescentes ou não e são caracterizadas por uma variedade de energia de excitação/emissão e absorção em diferentes comprimentos de onda (HEDLEY e MUMBY, 2002; HOCHBERG et al. 2004).

Minghelli-Roman et al. (2002) mediu reflectâncias de 152 colônias de coral no Mar Vermelho e discriminaram 14 gêneros de corais duros e moles. Hochberg et al. (2004) construíram uma biblioteca espectral de corais com dados de diversas localidades: St. Croix, Puerto Rico, Florida, Havaí, Polinésia Francesa, Palau, Grande Barreira de Corais, Bali, Comoros e Waikiki Aquário.

Diversos outros trabalhos foram realizados ao longo desses anos envolvendo análises espectrais de corais (HOLDEN e LEDREW, 2010; CHAUDHURY et al., 2012, JOYCE e PHINN, 2013; KARPOUZLI et al., 2004; KUTSER et al., 2003, 2006; LEIPER et al., 2009, 2012; NURDIN et al., 2015; REICHSTETTER, 2015; RUNDQUIST et al., 2009).

Entre os mais recentes, Nurdin et al. (2015) acrescentaram conhecimento sobre a reflectância dos corais da Indonésia. Eles mostraram que é possível separar espectralmente os corais saudáveis, mortos cobertos

com alga e os fragmentos de corais, por meio da análise de agrupamento e de correlação, corroborando com os trabalhos anteriormente publicados.

Diversas técnicas foram utilizadas na construção do conhecimento sobre o uso de dados espectrais em ambientes marinhos. A mais comum é a utilização dos dados de reflectância. Pesquisadores da área de química e de fisiologia tem se apropriado dessas técnicas em seus estudos, como Torres-Perez et al. (2012 e 2015) que analisaram pigmentos e a reflectância do coral holobionte buscando encontrar relações entre estes dados. Enquanto isso, Tjissen et al. (2017) analisaram a influência do zinco no crescimento e na coloração do coral *Stylophora pistillata*, utilizando, além de outras técnicas, a análise das assinaturas espectrais.

O segundo método mais utilizado nos estudos relacionados a análise espectral são as derivadas, mais especificadamente as de primeira, segunda e quarta ordem (HOCHBERG e ATKINSON, 2000; DURAKO e CHARTRAND, 2008; WETTLE et al., 2003).

Análises envolvendo corais e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) ainda são escassas e envolvem principalmente estudos ligados a sensoriamento remoto espacial ou aerotransportado (COLLIN e PLANES, 2012; PHIN et al., 2012), experimentos em laboratório (ROCHA et al., 2013a, 2013b; WIJGERDE et al., 2014; TIJSEN et al., 2017) e validação do uso do NDVI como proxy da concentração de Cl_a (LEAL et al., 2015).

Em corais os trabalhos envolvendo o NDVI foram realizados buscando identificar os efeitos da exposição a diferentes intensidades de radiações fotossinteticamente ativas (ROCHA et al., 2013), e a diferentes emissões de luzes do espectro eletromagnético (azul e vermelha) (WIJGERD et al., 2014). Também para identificar, por meio de imagens de fluorescência, a concentração de clorofila e os pigmentos verdes fluorescentes (LEAL et al., 2015) e testar os efeitos do zinco no crescimento, coloração e NDVI (TIJSEN et al., 2017).

Nos últimos anos houve um aumento nos estudos de dados espectrais em ambientes marinhos (Ralph et al. 2007; Stambler e Shashar 2007; Torres-

Perez et al. 2012, 2015, Nurdin et al. 2015, 2016), alguns deles envolvendo corais coletados em diversas partes do mundo (Hochberg et al. 2003), entretanto poucas investigações foram realizadas nos corais sul-americanos. Até o momento apenas um trabalho foi publicado sobre os corais coletados no Atlântico Sul, tendo a assinatura espectral de uma única espécie: a *Montastrea cavernosa* (CRUZ et al., 2015). Outros trabalhos foram apresentados e constam em anais de eventos (Galvão et al. 2011, 2016; Medeiros et al. 2016; Jonck et al. 2017)

Neste estudo um conjunto de dados espectrais de diferentes espécies de corais escleractíneos endêmicos e não endêmicos às águas brasileiras foram comparados e analisados para testar a seguinte hipótese: os corais branqueados e os corais saudáveis localizados na costa do Atlântico-Sul possuem características de reflectância espectral distintas.

Para isso, este estudo objetiva: (1) aumentar as informações acerca dos dados espectrais dos corais sul-americanos nos coletados no Brasil; (2) avaliar as assinaturas espectrais dos corais saudáveis e branqueados; (3) contribuir para a base de conhecimento global da resposta espectral dos corais. Para isso, utilizou-se um conjunto de diferentes técnicas de análise, as quais foram: análise de médias, derivadas de primeira e segunda ordem e NDVI buscando confirmar ou refutar a hipótese proposta.

2 Material e Métodos

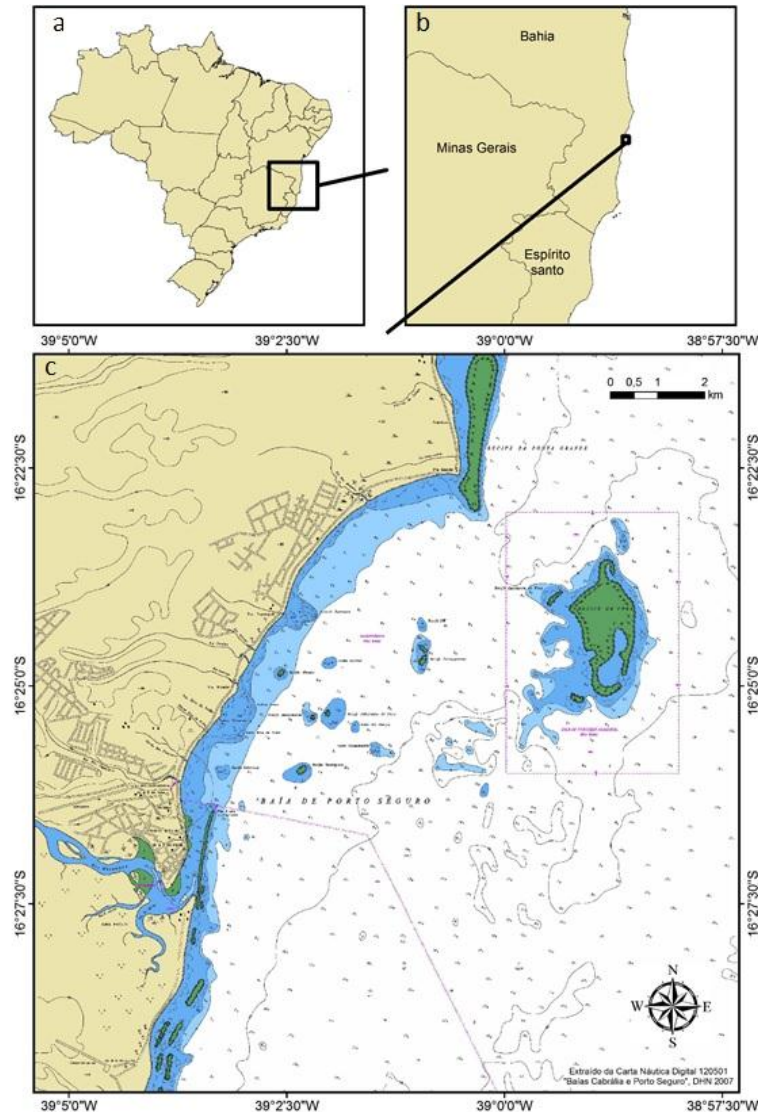
Para a realização do presente estudo foram realizadas as etapas metodológicas descritas a seguir.

2.1 Coleta das amostras

As espécies analisadas foram coletadas no Parque Municipal Marinho do Recife de Fora que se encontra a 5 milhas de Porto Seguro- BA, localizado entre as coordenadas: 16°23'S e 16°26'S e 29°00'W e 39°58'W (Figura 1). A

espécie *M. harttii* se encontra na lista de espécies ameaçadas de extinção e para tal foi solicitado licença para coleta ao ICMBio sob o número 47714-1.

Figura 1 – Área de coleta das amostras localizada no Parque Municipal Marinho do Recife de Fora. a) Localização do Brasil, b) Localização no estado da Bahia e c) Parque Municipal Marinho Recife de Fora.



Fonte: Seoane *et al.*, 2012

Após a remoção dos corais do recife eles foram acondicionados em caixas e ficaram imersos na água até serem transportados à sede do Projeto Coral Vivo, em Arraial D'Ajuda.

Ao todo foram coletados 67 corais dos quais 48 estavam saudáveis e 19 estavam branqueados. Os corais foram identificados como saudáveis e branqueados por análise visual (em que corais com pelo menos 20% de

manchas brancas eram considerados branqueados) e com auxílio do *Coral Health Chart*, um cartão desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Queensland, em que é possível correlacionar a cor do coral analisado com um padrão de coloração pré-estabelecido para corais saudáveis e branqueados. (Figura 2).

Figura 2 - Identificação do padrão de coloração de uma amostra saudável da espécie *Mussismilia harttii* utilizando como base o *Coral Health Chart*.



Fonte: elaborada pelo autor.

Na tabela 1 é possível observar quais espécies foram estudadas e as suas condições de saúde.

As espécies *Mussismilia braziliensis* e *Mussismilia hartii* foram escolhidas por serem endêmicas e exercerem papel fundamental na construção dos recifes de corais sul-americanos. A *Siderastrea Stellata* e a *Favia gravida* por serem resistentes às condições de estresse, como variações na temperatura salinidade e turbidez da água (Leão et al. 2003). E as demais por possuírem ampla distribuição, sendo priorizadas as espécies encontradas em outros recifes do Atlântico (Zaragoza et al. 2012; Ruiz-Ramos et al. 2014).

Tabela 1- Quantidade de corais coletados e suas condições de saúde

Espécies	Amostras saudáveis	Amostras branqueadas
<i>Agaricia agaricites</i>	05	02
<i>Favia gravida</i>	05	05
<i>Milepora alcicornis</i>	09	03
<i>Mussismilia braziliensis</i>	06	04
<i>Mussismilia harttii</i>	10	-
<i>Porites astreoides</i>	09	-
<i>Siderastrea stellata</i>	04	05
Total	48	19

Fonte: elaborada pelo autor.

2.2 Coleta dos dados espectrais

A partir das amostras de corais saudáveis e branqueados, foram coletados 335 espectros.

Para manter um padrão na quantidade de coleta das reflectâncias e devido ao pequeno tamanho de algumas amostras, foram obtidas cinco repetições na parte superior do coral. Durante as medições, buscou-se cobrir a superfície do indivíduo visando obter uma assinatura que melhor representasse a totalidade do organismo, visto que, segundo Hochberg et al. (2004), os corais exibem um nível de variação entre a medida de reflectância nos diferentes locais da colônia.

As medidas de reflectância foram realizadas em bancada, já que uma das finalidades do estudo é: encontrar diferenças nas assinaturas espectrais saudáveis e branqueados sem interferências da coluna d'água, com isso, criando uma biblioteca espectral apenas do substrato que poderá ser utilizada futuramente para mapeamento de recifes de coral utilizando imagens de satélite e modelos de transferência radiativa (Hedley et al. 2012).

As medidas foram realizadas utilizando o espectrorradiômetro portátil FieldSpec® 3 Hi-Res, que possui um intervalo espectral de 350nm até 2500nm. Na banda do visível a resolução espectral é de 3nm e o intervalo de amostragem de 1.4nm. A fonte de luz utilizada foi uma lâmpada de halogêneo que se encontrava acoplada, juntamente com o cabo de fibra ótica, ao ASD Contact Probe apresentando tempo de escaneamento de 100ms e IFOV de 25°. A geometria do sistema foi baseada no posicionamento perpendicular do sensor (e da fonte de iluminação) em relação à amostra, que estava acondicionada em uma bancada coberta por placas de cor preta. Para restringir o campo de visão nos alvos e evitar interferência do fundo/bancada, mediu-se a reflectância dos corais a uma distância de 2cm. Com isso a área amostrada a cada aquisição foi de aproximadamente 0.60 cm². O espectrorradiômetro foi segurado em mãos e buscou-se manter fixo a distância e a angulação na coleta dos dados (Figura 3).

Figura 3- Medições realizadas no coral branqueado *Mussismilia harttii* utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec® 3 Hi-Res, com destaque ao ASD Contact Probe em que estava acoplado o cabo de fibra ótica e a fonte de iluminação.



Fonte: elaborada pelo autor.

Antes de cada medição foi realizada a calibração do espectrorradiômetro através da placa de referência Spectralon® com calibração conhecida. Com isso foi permitido obter a reflectância bidirecional que, segundo Nicodemus et al. (1977), é obtida pela razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície da amostra e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência.

2.3 Análises das assinaturas espectrais

Após a coleta dos dados espectrais, realizou-se o processamento com o software RS3, ViewSpec Pro™ para gerar as curvas de reflectância utilizando os dados na faixa entre 400 e 700nm.

Devido à sensibilidade ao ruído, foi utilizado o método de Savitsky-Golay com 17 pontos, para suavizar os dados espectrais (Savitzky e Golay 1964). Esse método assume que o ruído aleatório tem características semelhantes em todo o espectro e que um procedimento invariante no espectro pode manipulá-lo (Tsai e Philpot 1998).

Para a construção das assinaturas espectrais foi gerada uma média das cinco repetições realizadas nos corais durante a amostragem buscando obter uma assinatura que representasse a totalidade da amostra, devido ao tamanho pequeno de algumas amostras e para manter um padrão foi realizado cinco medições em todos os corais.

As médias foram calculadas utilizando os valores de reflectância das repetições divididos pelo número total das mesmas (cinco) no software ViewSpec Pro™.

2.4 Análises de derivada espectral

A análise derivada é uma técnica amplamente utilizada nos estudos espectrais de corais (HOCHBERG e ATKINSON, 2000; LEIPER et al., 2012; KARPOUZLI et al., 2004; RUSSEL et al., 2016). Ela permite realçar as feições

que se destacam na assinatura espectral de um alvo, tanto das bandas de absorção quanto dos picos de reflexão, e é considerada como uma taxa de mudança da reflectância em relação ao comprimento de onda (RUNDQUIST et al., 1996).

A derivada foi calculada usando a diferença por aproximação finita. O resultado depende do tamanho do filtro ou da largura da banda e da resolução, ou seja, da separação entre as bandas. Essa forma permite a adequação da operação com a resolução das bandas espectrais do espectrômetro utilizado, e representa a taxa de variação da reflectância espectral do alvo em relação à variação do comprimento de onda da energia incidente (BARBOSA, 2007). A equação para o cálculo é apresentada pela Equação 1:

$$\frac{ds}{d\lambda}/_i \approx \frac{s(\lambda_i) - s(\lambda_j)}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

(1)

Onde, $\Delta\lambda$ é a separação entre bandas adjacentes, e, $s(\lambda_i)$ o valor do espectro na faixa de λ_i comprimento de onda.

A análise foi realizada utilizando o método descrito em Louchard et al. (2002). Após geradas a primeira e a segunda derivada foram analisadas. Com a primeira derivada é possível observar as melhores variações na forma dos dados de reflectância e com a segunda pode-se identificar os pigmentos qualitativamente (Torres-Perez et al. 2012).

2.5 Cálculo de NDVI

Para além da técnica de derivada, buscou-se, por meio do NDVI, diferenciar os corais saudáveis dos branqueados. Esse índice pode ser utilizado para estimar a concentração de Cla encontrada nos tecidos do coral,

pois calcula a intensidade da feição espectral na região do vermelho, a partir da diferença normalizada pela soma com o pico de reflectância no infravermelho próximo.

O cálculo do NDVI tem sido utilizado com sucesso em estudos com organismos aquáticos incluindo microalgas dominadas por biofilmes (SERÔDIO et al., 2009; PERKINS et al., 2010), lesmas do mar (SERÔDIO et al. 2009; COSTA et al., 2012), macroalgas e gramas marinhas (PEÑUELAS et al., 1993) e corais (ROCHA et al. 2013; WIJGERDE et al. 2014; LEAL et al. 2015).

O índice de vegetação (NDVI) (ROUSE et al. 1973) foi calculado segundo a metodologia proposta em Rocha et al. (2013) e Wijgerde et al. (2014), para tal utilizou-se a Equação 2:

$$NDVI = \frac{(R_{750} - R_{675})}{(R_{750} + R_{675})} \quad (2)$$

3 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos por meio das análises das assinaturas espectrais, pelos cálculos de media, derivadas, bem como os de NDVI são descritos e discutidos a seguir.

3.1 Análise das assinaturas espectrais

As assinaturas dos corais apresentaram baixos valores de reflectância entre 400-500nm, aumento entre 500-650nm, uma estreita feição de absorção em 675nm e outro rápido aumento nos comprimentos de ondas superiores a 680nm. Resultados similares também foram encontrados por Holden e LeDrew (1998) em corais saudáveis coletados em Fiji e Indonésia e Hochberg et al. (2004) em corais coletados em diversas localidades.

Segundo Dove et al. (1995) e Salih et al. (2000) os baixos valores de reflectância encontrados entre os comprimentos de onda azul (450-495nm) e

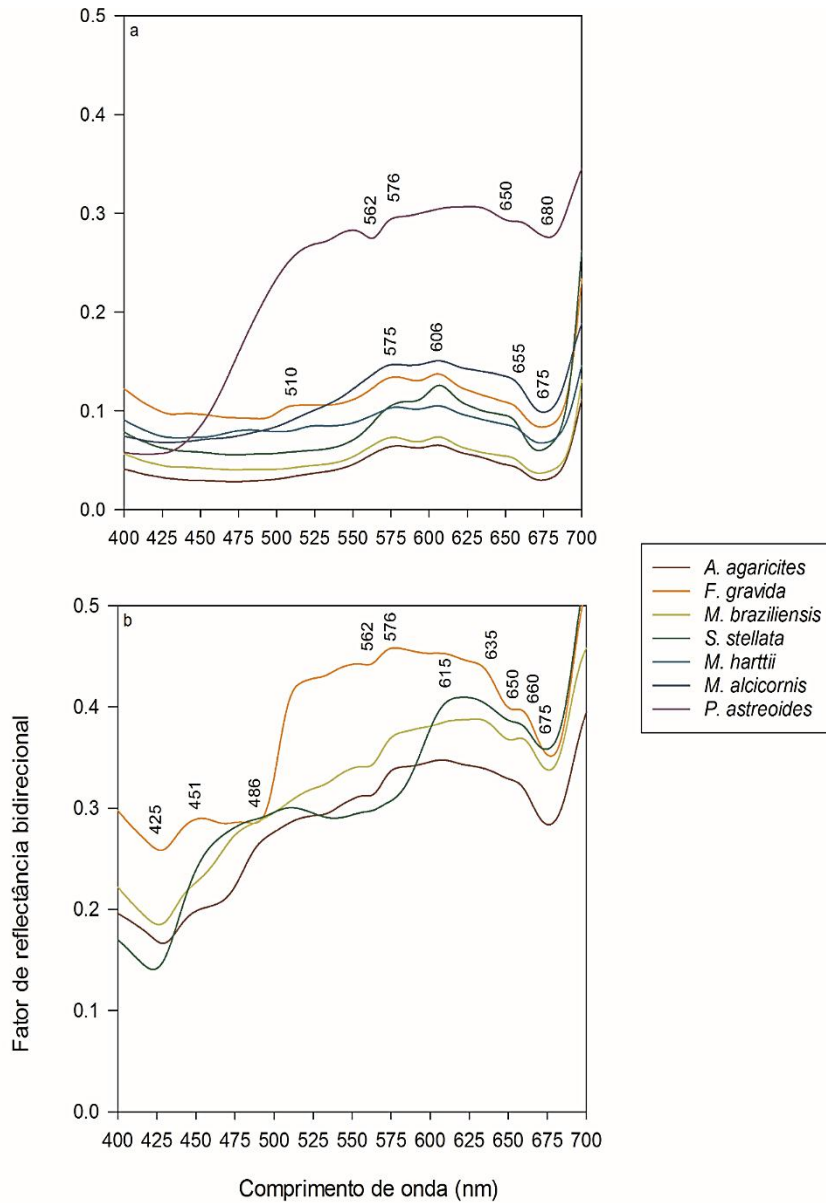
verde (495-570nm) são causados pela absorção de componentes fotossintéticos e fotoprotetores, sendo encontradas na maioria das assinaturas de corais. O aumento nos valores de reflectância encontrado no início da região do vermelho (620-650nm), de acordo com MAZEL (1995), poderia indicar falta de absorção ou presença ativa de fluorescência. A feição de absorção em 675nm e a subida dos valores de reflectância próximo a 680nm são causados pela presença de Cladophora nesses organismos (Hochberg et al. 2003).

Os resultados mostram que as assinaturas espectrais das espécies *S. stellata*, *F. gravida*, *A. agaricites*, *M. braziliensis*, *M. harttii* e do hidrocoral *M. alcicornis* apresentam dois picos de reflectância próximos a 575nm e 606nm e uma feição similar a um ombro em 650nm, essas feições são chamadas de triplo-pico e foram utilizadas para classificar os corais no grupo marrom (HOCHBERG e ATKINSON 2000; HOCHBERG et al., 2003, 2004) (Figura 4).

Figura 4- Fator de reflectância bidirecional de corais saudáveis e branqueadas coletados na América do Sul. a) Fator de reflectância bidirecional de corais saudáveis das espécies A.

agaricites, *F. gravida*, *M. braziliensis*, *M. harttii*, *M. alcornis*, *P. astreoides* e *S. stellata*; b)

Fator de reflectância bidirecional de corais branqueados das espécies *A. agaricites*, *F. gravida*, *M. braziliensis* e *S. stellata*. Diferentes cores representam diferentes espécies e números indicam comprimentos de ondas com picos e depressões.



Fonte: elaborado pelo autor.

Espécies dos gêneros *Acropora*, *Montipora*, *Porites* e outros coletados no Caribe, Pacífico, Indo-Pacífico e Mar Vermelho também apresentaram essas mesmas feições e foram classificados como corais marrons (MAZEL,

1995; MAZEL, 1996; HOCHBERG e ATKINSON, 2000; WETTLE et al., 2003).

A assinatura encontrada para o coral *P. astreoides* não o classifica como pertencente a esse grupo. A sua feição de absorção em 580nm e o platô entre 600 e 650nm, são típicas dos corais classificados como azuis, segundo o proposto por Hochberg et al. (2003).

Os resultados observados para essa espécie se opõem aos encontrados por Hochberg et al. (2004) em corais de Porto Rico e St. Crois (EUA) e Torres-Perez et al. (2015) no Caribe, para esses autores o coral *P. astreoides* é classificado como marrom. Possivelmente essa espécie nas águas sul-americanas esteja produzindo diferentes pigmentos do que produziria em outros recifes. Segundo Hochberg et al. (2004) e Mazel e Fuchs (2003) os corais do tipo azul possuem maior influência dos pigmentos do tecido do coral.

Torres-Perez et al. (2015) afirmaram que os pigmentos dos corais são determinados principalmente por fatores genéticos em detrimento aos fatores ambientais. Esperava-se encontrar diferenças genéticas entre as populações de corais do Caribe e do Brasil para que pudessem embasar as diferenças nas assinaturas dessa espécie. Entretanto, no trabalho realizado por Nunes et al. (2011) em que foram analisados corais das espécies *M. cavernosa* e *P. astreoides*, coletadas no Brasil e no Caribe, não foram encontradas diferenças genéticas significativas entre essas duas populações.

Resultado similar foi encontrado por Rocha et al. (2003) com a espécie *Stylophora pistillata*. Nesse trabalho ela foi identificada como coral azul sendo que, na literatura, a espécie já tinha sido classificada como marrom.

Os corais podem apresentar diferentes colorações desde marrom até cinza (VERON, 2000), e de acordo com o estudo realizado por Hochberg et al. (2003), utilizando dados espectrais em corais coletados em diferentes partes da Terra, existe um padrão entre as cores que os corais possuem e a classe em que eles se enquadram.

Hochberg et al. (2003) propuseram que os corais com as cores amarela, marrom, laranja, branca e vermelha seriam classificados como marrom, e os

que possuem coloração azul, rosa ou cinza seriam identificados como pertencentes à classe azul. O coral *P. astreoides* estudado se encontra fora dessa regra, visto que apesar de possuir coloração amarela teve assinatura similar ao dos corais classificados como azul (Figura 4).

Espera-se que novos estudos comparativos entre os corais existentes na costa do Atlântico possam elucidar as diferenças observadas nas assinaturas espectrais dessa espécie.

De forma geral as assinaturas espectrais encontradas nos corais sul-americanos são similares às observadas nas espécies do Pacífico e Caribe, apresentando as mesmas classificações: marrom e azul (Hochberg et al. 2003). Os primeiros sendo mais determinados pela absorção dos pigmentos dos simbiontes, enquanto os últimos pela expressão dos GFPs (HOCHBERG et al., 2004).

As assinaturas do *P. astreoides* saudável e dos outros corais branqueados apresentam semelhanças entre si. Ela deve estar relacionada à baixa quantidade de pigmentos fotossintetizantes, visto que à medida que o coral sofre branqueamento há uma redução na concentração de simbiontes, o que gera menor produção dos seus pigmentos, e segundo Hochberg et al. (2004) e Mazel e Fuchs (2003) os corais do tipo azul são caracterizados por apresentarem baixa concentração de simbiontes e maior influência dos pigmentos do tecido do coral.

Além das semelhanças observadas entre esta espécie e os corais branqueados, também foram observadas diferenças entre eles, a saber: subida uniforme dos valores de reflectância presente no *P. astreoides* a partir de 450nm, a não existência, nessa espécie, do formato da feição de absorção próxima a 425nm característica encontrada nos corais branqueados e a diferença dos valores de reflectância principalmente na região do azul.

Os corais branqueados apresentaram um padrão em suas assinaturas sendo caracterizado pelo desmonte do triplo pico, ficando apenas um ombro em 660nm, presença de altos valores de reflectância e a existência de feições

de absorção próximas aos comprimentos 425nm, 563nm, 650 nm e 675nm (Figura 4).

Durante o branqueamento, com a perda dos pigmentos fotossintéticos das zooxantelas, o tecido do coral também reduz a produção de pigmentos o que pode ser representado pela perda do triplo pico, logo passando a expor a coloração do seu esqueleto. Com isso, a assinatura espectral fica condicionada à estrutura esquelética, que por ser branca eleva os valores de reflectância (MAZEL, 1995; HOLDEN e LEDREW, 1998; HEDLEY e MUMBY, 2002; ENRÍQUEZ et al., 2006).

Embora os corais estejam visivelmente branqueados é possível que ainda existam pigmentos carotenóides e/ou fotossintetizantes relacionados às zooxantelas ou à algas endolíticas presentes na estrutura do coral. As feições de absorção localizadas em 425nm e 675nm são identificadoras da presença desses pigmentos (HOCHBERG et al., 2004, TORRES-PEREZ et al., 2012, TORRES-PEREZ et al., 2015). Cruz et al. (2015) em seu estudo com *Montastrea cavernosa* encontrou Cla e perid retidos nos corais branqueados.

Com a saída dos simbiontes, alguns pigmentos do tecido do coral podem estar mais visíveis espectralmente podendo ser identificados na feição de absorção localizada próxima à 560nm, que segundo Durako e Chartrand (2008) está relacionada a absorção da radiação por pigmentos do coral.

3.2 Análise de derivada espectral

Diversos autores analisaram componentes recifais por meio de análise derivativa (HOLDEN e LEDREW, 1998; CLARK et al., 2000, HOCHBERG et al., 2003; KARPOUZLI et al., 2004; JOYCE e PHINN, 2013). Em sua maioria a análise era centrada em diferenciar tipos de fundos e diferentes estágios de saúde de coral (saudável, branqueado e morto). Possivelmente a presença/ausência ou diferenças na intensidade dos pigmentos existentes, em algumas das espécies, seja responsável pela separação entre elas.

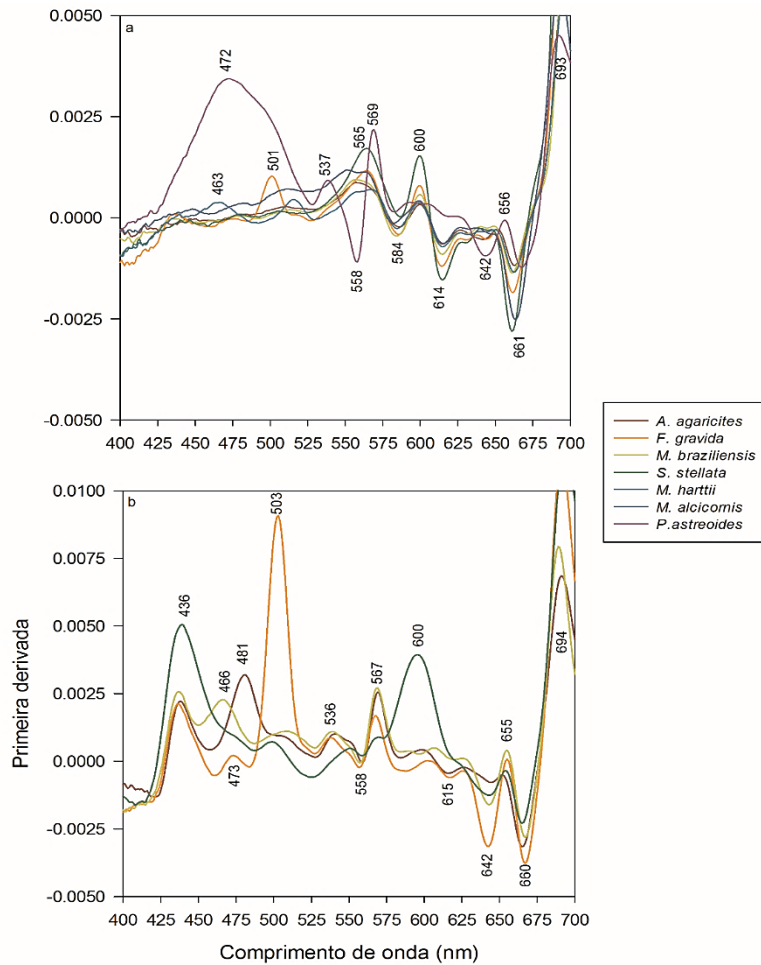
Os resultados da primeira derivada dos corais saudáveis mostram intervalos nos comprimentos de onda em que é possível distinguir algumas espécies, eles se encontram entre 430 e 510nm; 501, 515, 537, 558, 565, 569, 600, 614, 656 e 693nm. Entre esses comprimentos de ondas, o coral que mais se difere é o *P. astreoides* seguido das espécies *S. stellata*, *F. gravida* e do hidrocoral *M. alcicornis* (Figura 4).

A diferença observada entre a espécie *P. astreoides* e os outros corais está relacionada aos diferentes grupos nos quais eles foram identificados. *P. astreoides* foi o único coral classificado como azul enquanto as outras espécies se enquadraram como corais marrons.

A espécie *F. gravida* possui um pico em 501nm não observado para as outras espécies e que deve estar relacionado à presença de pigmentos fluorescentes ligados a GFP (pigmentos verdes fluorescentes) (ROTH et al., 2010).

Nos corais branqueados também se observam comprimentos de ondas que apresentaram divergências entre as assinaturas das espécies, estando próximos a: 436-441, 466, 481, 503, 536, 567 e 597-600nm. Algumas dessas feições ocorrem em apenas uma espécie, como os picos em 466 nm encontrados apenas em *M. braziliensis*; 481nm na *A. agaricites*; 503nm na *F. gravida* e, por fim 441 e 597nm na *S. stellata* (Figura 5).

Figura 5- Análise da primeira derivada de espécies de corais saudáveis e branqueadas coletados na América do Sul. a) primeira derivada de corais saudáveis das espécies *A. agaricites*, *F. gravida*, *M. braziliensis*, *M. harttii*, *M. alcornis*, *P. astreoides* e *S. stellata*; b) primeira derivada de corais branqueados das espécies *A. agaricites*, *F. gravida*, *M. braziliensis* e *S. stellata*. Note diferenças na escala do eixo Y. Diferentes cores representam diferentes espécies e números indicam comprimentos de ondas com picos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os comprimentos de ondas 558, 600nm e o intervalo entre 615 e 660nm não possuem o mesmo comportamento nos diferentes estágios de saúde. Enquanto nos corais saudáveis os dois primeiros possuem valores elevados e são observadas ondulações próximas a 625, 639 e 650nm. Nos corais branqueados eles apresentam baixos valores, uma diminuição em 640nm e um aumento em 656nm. Foi observado que a feição centrada em 436nm estava presente apenas nos corais branqueados.

Para Karpouzli et al. (2004) o melhor discriminador para corais saudáveis e branqueados, ao utilizar a primeira derivada, se encontra em 637nm, no qual apenas os corais saudáveis apresentaram valores positivos. No entanto esse discriminador não poderia ser utilizado nesta pesquisa visto que os dois estágios de saúde dos corais apresentaram derivadas negativas nesse comprimento de onda. Este estudo mostra que os comprimentos de ondas próximos a 430nm e 630nm seriam os que melhores separariam os corais saudáveis dos branqueados, visto que o pico localizado em 430nm é mais proeminente nos corais branqueados do que nos saudáveis, a feição localizada em 436nm esteve presente apenas nos corais branqueados e o pico encontrado perto de 630nm nos corais saudáveis, estava ausente nos corais branqueados, estando estes comprimentos de ondas relacionados com presença/ausência de clorofila (Torres-Perez et al. 2012).

Torres-Perez et al. (2012) e Torres-Perez et al. (2015) encontraram relação existente entre a análise de derivadas e os pigmentos identificados nos organismos estudados. Apesar deste estudo não ter coletado e identificado os pigmentos dos corais, buscou-se relacionar os picos e bandas de absorção encontradas nas derivadas com os pigmentos descritos na literatura (Tabela 2). Entretanto, vão existir diferenças nos comprimentos de ondas identificados. Esta alteração é decorrente da mudança hipocromática. Ela ocorre tipicamente nos comprimentos de onda que representam absorção máxima do pigmento quando são extraídos a partir de solventes orgânicos, gerando uma redução no comprimento de onda ao ser comparado com os dados de organismos in vivo. Como exemplo, pode-se ser observado os resultados para Cla, onde in vivo, se localiza próximo a 440 e 675nm e ao ser extraída por solventes orgânicos se encontra em 432 e 665nm.

Tabela 2. Pigmentos encontrados no holobionte coral

Pigmentos	Banda de absorção nos comprimentos de ondas (nm)	Referências	spp. saudáveis	spp. branqueadas
Clorofila <i>a</i> (Cl _a)	409, 432, 665	Jefrey, 1967; Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2012; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015	<i>F. gravida</i> , <i>S. stellata</i> , <i>M. alcicornis</i> , <i>A. agaricites</i> , <i>P. astreoides</i> , <i>M. harttii</i> , <i>M. Braziliensis</i>	<i>A. agaricites</i> , <i>S. stellata</i> , <i>M. braziliensis</i>
Clorofila <i>c2</i> (Cl _{c2})	448, 452, 456, 584, 634	Jefrey, 1967; Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2012; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015; Venn <i>et al.</i> 2006	<i>F. gravida</i> , <i>A. agaricites</i> , <i>M. braziliensis</i> , <i>M. Harttii</i>	<i>M. braziliensis</i> , <i>S. stellata</i>
Clorofila <i>b</i> (Cl _b)	458, 470, 652	Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> , 2015	<i>P. astreoides</i> , <i>M. braziliensis</i>	
Peridinina (Perid)	473, 475, 490, 540	Jefrey and Taxo, 1968; Kuhl <i>et al.</i> 1995; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2012; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015	<i>P. astreoides</i> , <i>F. gravida</i>	<i>A. agaricites</i> , <i>F. Gravida</i>
Feofitina (Feoftn)	409, 410, 665, 666	Jefrey, 1967; Jefrey <i>et al.</i> 1997; Venn <i>et al.</i> 2006	<i>F. gravida</i> , <i>S. stellata</i> , <i>M. alcicornis</i> , <i>P. astreoides</i> , <i>M. harttii</i> , <i>M. braziliensis</i>	<i>F. gravida</i> , <i>S. stellata</i>
β-caroteno (β-Car)	423, 448, 455, 473, 475, 476, 482	Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2012, Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015	<i>F. gravida</i> , <i>S. stellata</i> , <i>M. alcicornis</i> , <i>A. agaricites</i> , <i>P. astreoides</i> , <i>M. harttii</i> , <i>M. braziliensis</i>	
Dinoxantina (Dino)	418, 469, 473	Jefrey, 1967; Jefrey, 1997; Venn <i>et al.</i> 2006	<i>S. stellata</i> , <i>A. agaricites</i> , <i>M. harttii</i>	<i>A. agaricites</i> ,
Diadinocromo (Diadcr)	406, 430, 469,	Jefrey, 1967,; Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015; Venn <i>et al.</i> 2006	<i>S. stellata</i> , <i>M. harttii</i>	<i>A. agaricites</i> , <i>F. gravida</i>
Diatoxantina (Diat)	482	Jefrey <i>et al.</i> 1997	<i>S. stellata</i> , <i>P. astreoides</i> , <i>M.</i>	

			<i>harttii</i> , <i>M. braziliensis</i>	
Diadinoxantina (Diad)	448	Jefrey, 1967	<i>F. gravida</i> ,	
19'hexanoiloxi-xantina (19'Hex)	420, 444, 470, 471	Jefrey <i>et al.</i> 1997	<i>F. gravida</i> , <i>S. stellata</i> , <i>M. alcicornis</i> , <i>A. agaricites</i> , <i>P. astreoides</i> , <i>M. braziliensis</i>	<i>F. gravida</i> , <i>M. braziliensis</i>
Violaxantina (Viola)	416, 419, 440, 441, 442, 470, 471	Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2012	<i>F. gravida</i> , <i>M. alcicornis</i> , <i>A. agaricites</i> , <i>P. astreoides</i> , <i>M. harttii</i> , <i>M. braziliensis</i>	<i>F. gravida</i>
Zeaxantina (Zea)	428, 449, 475, 479	Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015	<i>S. stellata</i> , <i>P. astreoides</i> , <i>M. harttii</i> , <i>M. braziliensis</i>	<i>F. gravida</i>
Luteina (Lut)	445, 448, 470, 476	Jefrey <i>et al.</i> 1967; Jefrey <i>et al.</i> 1997, Torrez-Perez <i>et al.</i> 2012, Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015	<i>F. gravida</i> , <i>S. stellata</i> , <i>M. harttii</i> , <i>M. braziliensis</i>	
Fucoxantina (Fuco)	449, 468, 475	Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2012, Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015	<i>F. gravida</i> , <i>S. stellata</i> , <i>M. alcicornis</i> , <i>P. astreoides</i> , <i>M. harttii</i>	<i>F. gravida</i>
Sifonaxantina (Sifn)	449, 461, 466, 475	Jefrey <i>et al.</i> 1997; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2012; Torrez-Perez <i>et al.</i> 2015	<i>S. stellata</i> , <i>M. alcicornis</i> , <i>A. agaricites</i> , <i>M. harttii</i>	<i>F. gravida</i>

Fonte: elaborado pelo autor.

Com os dados da segunda derivada foi possível destacar diversos comprimentos de ondas que apresentaram picos e que, segundo os dados da literatura (JEFFREY e HAXO, 1968, 2014; JEFFREY *et al.*, 1997; TORRES-PEREZ *et al.*, 2012; TORRES-PEREZ *et al.*, 2015; VENN *et al.*, 2006), seriam causados pela absorção de determinados pigmentos, os quais estão discriminados na tabela 2 (Figura 6).

Neste estudo, foi observado que existem diferenças na quantidade de possíveis pigmentos encontrados entre as espécies saudáveis e branqueadas. Os corais branqueados apresentaram menos pigmentos que os corais saudáveis, é possível que esta redução esteja associada com a expulsão dos dinoflagelados durante o processo de branqueamento. Mais estudos serão necessários para afirmar se esta diferença está relacionada unicamente à variação de saúde.

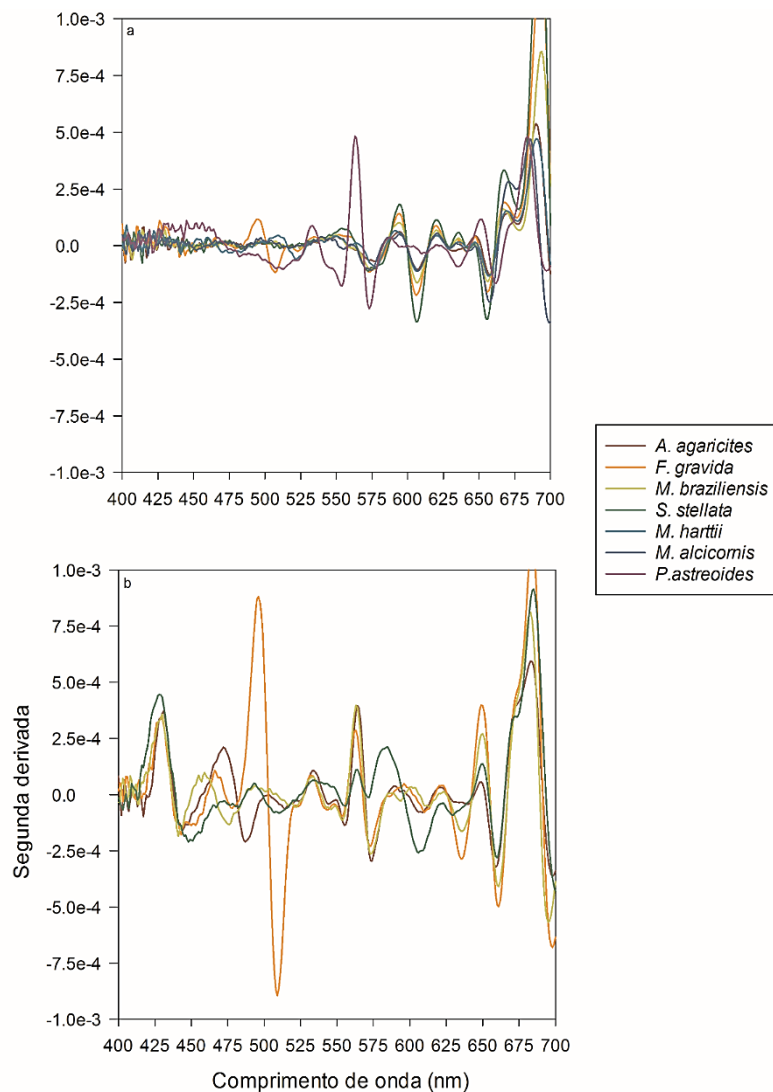
Não foi encontrado um padrão de ocorrência dos pigmentos nos corais branqueados, entretanto nos corais saudáveis os pigmentos Cla e β -Car estariam presentes em todas as espécies. Esses pigmentos são importantes. O primeiro juntamente com clorofila c2 (Clc2) e peridinina são responsáveis pela captura de luz para a realização da fotossíntese, enquanto que o segundo juntamente com diatoxantina (Diat), diadinoxantina (Diad), e dinoxantina (Dino) está relacionado ao mecanismo de fotoproteção dos organismos fotossintéticos (JEFFREY e HAXO, 1968).

Aparentemente à medida que os corais branqueiam eles perdem os pigmentos relacionados aos mecanismos de fotoproteção, visto que das espécies branqueadas, com exceção da *A. Agaricites* que apresentou feição correspondente ao pigmento Dino, nenhuma outra espécie branqueada aparenta possuir pigmentos relacionados a este mecanismo. Essa perda também pode estar relacionada à redução na intensidade da luz, aliado ou não com o aumento de profundidade (Eyal et al. 2015).

Os pigmentos das clorofilas se mantiveram nos corais branqueados nas espécies: *A. Agaricites*, *M. braziliensis* e *S. Stellata*. Eles podem estar relacionados à presença de outros organismos fotossinteticamente ativos, como feofíceas, algas castanhas, clorofíceas ou algas endolíticas, que podem estar presentes no coral holobionte influenciando o sinal espectral da colônia (TORRES-PEREZ et al., 2012). Alguns dos pigmentos presentes em organismos fotossinteticamente ativos e que podem estar presentes nos corais estudados foram identificados e classificados por Torres-Perez et al. (2015), alguns deles são: Cla, Clc2, peridinina, DC-I, DC-II, diadino e P-457 (presente

em corais), Fuco (feofíceas, algas castanhas ou algas pardas), Lut (clorofíceas) e Zea, Vio e Lut (algas endolíticas).

Figura 6- Análise da segunda derivada de espécies de corais saudáveis e branqueadas coletados na América do Sul. a) segunda derivada de corais saudáveis das espécies *A. agaricites*, *F. grvida*, *M. braziliensis*, *M. harttii*, *M. allicornis*, *P. astreoides* e *S. stellata*; b) segunda derivada de corais branqueados das espécies *A. agaricites*, *F. grvida*, *M. braziliensis* e *S. stellata*. As diferentes cores representam as diferentes espécies.



Fonte: elaborado pelo autor.

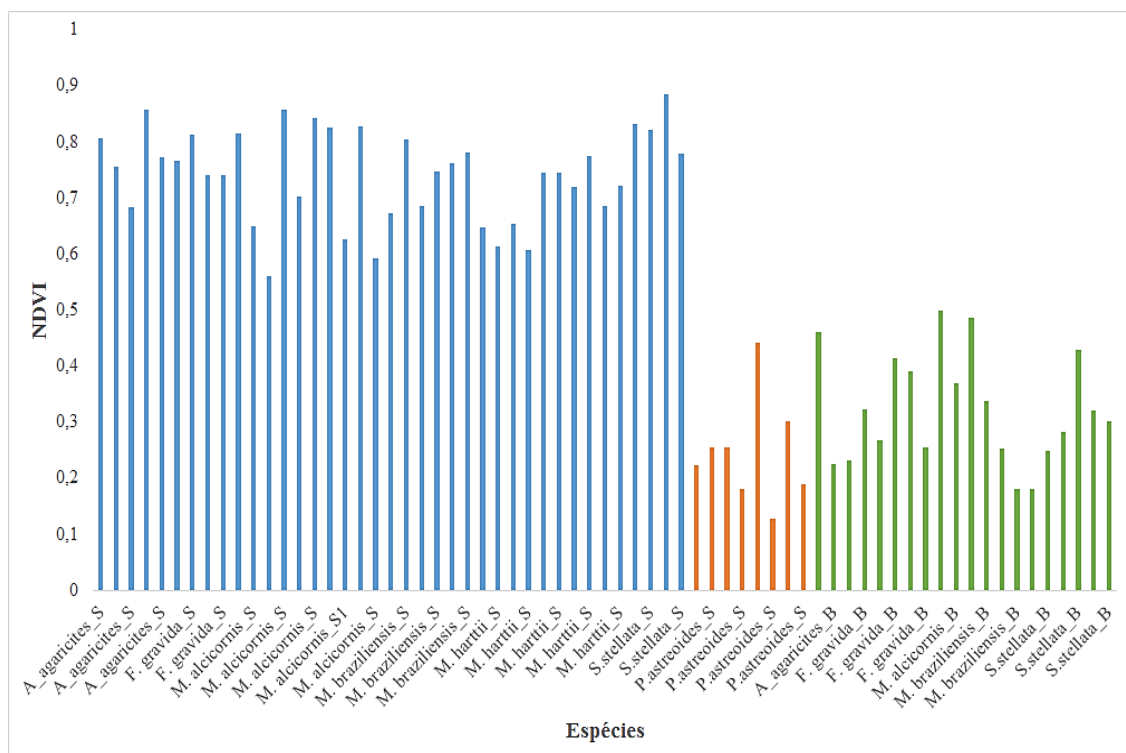
3.3 NDVI

Observou-se uma grande diferença nos valores de NDVI calculados para diferentes estágios de saúde dos corais (Figura 7). Nos corais saudáveis classificados como marrom, representado pela cor azul na Figura 7, os valores de NDVI se encontram entre 0.7 e 0.8, já nos branqueados, representados pela cor verde na mesma figura, estavam entre 0.18 e 0.3.

Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Tijssen et al. (2017) e Leal et al. (2015). Os primeiros encontraram valores acima de 0.6 para a espécie *Stylophora pistillata* saudável. Os segundos encontraram diferenças significativas entre os valores de NDVI entre os corais saudáveis e branqueados, sendo eles 0.656 ± 0.054 e 0.387 ± 0.053 , respectivamente.

Segundo Wijgerd et al. (2014) e Tijssen et al. (2017) os valores do NDVI estão estritamente ligados aos da Cla, isso explicaria os baixos valores encontrados nos corais branqueados e na espécie *P. astreoides*, em laranja na mesma figura. Como mencionado anteriormente, os corais classificados como azul sadios e os corais branqueados apresentam baixa quantidade de pigmentos fotossintetizantes.

Figura 7- Análise de NDVI de corais saudáveis e branqueados das espécies espécies *A. agaricites*, *F. gravida*, *M. braziliensis*, *M. harttii*, *M. alcornis*, *P. astreoides* e *S. stellata*. Em azul estam destacados os corais saudáveis classificados anteriormente como marrons, em laranja o coral saudável classificado como azul (espécies *P. astreoides*) e em verde os corais branqueados.



Fonte: elaborado pelo autor.

4 Conclusão

Os resultados apresentados neste trabalho aumentaram as informações espectrais dos corais coletados no Atlântico Sul, ampliando a base de conhecimento global da resposta espectral de corais.

A maioria dos corais coletados nos recifes brasileiros é pertencente ao grupo marrom, com exceção do coral *P. astreoides* que foi classificado como coral azul.

Foi possível observar diferenças nas assinaturas dos corais saudáveis e branqueados. Na análise de médias pela perda da feição denominada triplo pico, localizada perto dos comprimentos de onda 575, 600 e 650nm e aumento

nos valores de reflectância em todo o intervalo analisado. Nas derivadas, pela maior expressão da feição localizada perto de 430nm, presença da feição localizada em 436nm e perda do pico em 630nm nos corais branqueados e na análise de NDVI pelas diferenças de valores, onde os corais marrons saudáveis apresentaram maiores valores que os branqueados. Com isso, aceitamos a hipótese proposta de que é possível separar espectralmente os corais sul-americanos branqueados dos saudáveis.

Dos métodos analisados o menos efetivo foi o NDVI, já que os resultados dos corais saudáveis azuis foram similares aos branqueados. E, é importante destacar que a alta absorção pela água dos comprimentos de onda do infravermelho reduz a utilização desse método em estudos remotos. Entretanto ela pode ser útil na análise do proxy de Cla.

A análise de derivadas, especialmente a segunda, é bastante eficaz em estudos relacionados a pigmentos, já que os representam qualitativamente. Com ela pode-se observar as diferenças na saúde dos corais através da variação dos pigmentos. No entanto este método não se mostra facilmente aplicável ao mapeamento com imagens de sensores. A sua melhor utilização, dentro da ótica do sensoriamento remoto, se concentra na consolidação das diferenças entre os alvos estudados. Com isso os resultados mais efetivos e que podem ser utilizados para mapeamento por sensoriamento remoto, seriam as análises de médias utilizando os dados de reflectância, em especial na identificação de branqueamento de coral.

Por meio da análise espectral de médias não foram observadas grandes variações entre as assinaturas das espécies de corais, não sendo possível separá-las a nível de espécie, apenas nos dois grandes grupos: azul e marrom.

Já a técnica da primeira derivada permitiu destacar picos que podem representar possibilidade de separação espectral em algumas espécies, necessitando de mais estudos, com maior número amostral e com maior diversidade de espécies visando corroborar essa possibilidade. As análises utilizadas mostraram resultados satisfatórios, estando em conformidade com o que tem sido realizado em outros recifes de corais no mundo. Como os dados

espectrais estão estritamente relacionados aos pigmentos encontrados nos organismos, acredita-se que para uma análise em que se busque compreender estes dados, seria válido realizar estudos comparativos entre os dados espectrais dos corais sul-americanos e os pigmentos neles encontrados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de doutorado (processo 140801/2014-6). Ao Projeto Coral Vivo, por coletar os corais e disponibilizar o espaço para as medições. O Coral Vivo tem patrocínio da Petrobras, através do Programa Petrobras Ambiental, e do Arraial d’Ajuda Eco Parque. A Universidade Estadual de Feira de Santana, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente por emprestar o espectrorradiômetro usado nas medições. Ao Professor Waterloo Pereira-Filho da Universidade Federal de Santa Maria e ao Felipe Correa dos Santos por ajudar na análise dos dados.

Referências

- ALVARENGA, B. S.; ARCO, E.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A.R. O ensino de conceitos e práticas de espectrorradiometria laboratorial: estudo de caso com solos do estado de São Paulo. **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, INPE, 2003, pp. 739-747.
- ANDREFOUËT, S.; MULLER-KARGER, F.E.; HOCHBERG, E.J.; H.U, C.; CARDER, K.L. Change detection in shallow coral reef environments using Landsat 7 ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**. v.78, 2001, pp. 150-162.
- BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas**. Tese (Doutorado em

Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

- CHAUDHURY, R. N. Spectral Characteristics of Selected Hermatypic Corals From Gulf of Kachchh, India. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXIX-B8, n. September, 2012. pp. 333–338.
- CLARK, C. D.; MUMBY, P. J.; CHISHOLM, J. R. M.; JAUBERT, J.; ANDREFOUET, S. Spectral discrimination of coral mortality states following a severe bleaching event. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 11, 2000. pp. 2321–2327.
- COLLIN, A.; PLANES, S. Enhancing coral health detection using spectral diversity indices from worldview-2 imagery and machine learners. **Remote Sensing**, v. 4, n. 10, 2012. pp. 3244–3264.
- COSTA J.; GIMÉNEZ-CASALDUERO F.; MELO R.; JESUS B. Colour morphotypes of *Elysia timida* (Sacoglossa, Gastropoda) are determined by light acclimation in food algae. **Aquatic Biology**, v.17, 2012. pp. 81-89.
- CRUZ, I.C.S.; LEAL, M.C.; MENDES, C.R.; KIKUCHI, R.P.K; ROSA, R. SOARES, A.M.V.M. White but not bleached: photophysiological evidence from white *Montastraea cavernosa* reveals potential overestimation of coral bleaching. **Marine Biology**, v. 162, n. 4, 2015. pp. 889–899.
- DOVE, S. G.; TAKABAYASHI, M.; HOEGH-GULDBERG, O. Isolation and Partial Characterization of the Pink and Blue Pigments of Pocilloporid and Acroporid Corals. **The Biological Bulletin**, v. 189, n. 3, 1995. pp. 288–297.
- DURAKO, M. J.; CHARTRAND, K. M.; SCIENCE, M. **Changes in spectral reflectance in response to salinity variation in *Siderastrea radians* from Florida Bay**, Florida USA. Nova.Edu, n. 17, 2008. pp. 607–610.
- ENRÍQUEZ, S.; MÉNDEZ, E.R.; PRIETO, R.I. Multiple scattering on coral skeletons enhances light absorption by symbiotic algae. **Limnol. Oceanogr.** v. 50, 2005. pp. 1025–1032.
- GALVÃO, T. A.; NOLASCO, M. C.; BONFIM, T.; MELLO, F. Assinaturas Espectrorradiométricas de Espécies Construtoras: Uma Apósta Metodológica para Imagens de Sensores Remotos em Mares e Oceanos. **Anais do XIV Congresso Latino América no de Ciências do Mar**, 2011.

- GALVÃO, T. A.; SEOANE, J. C. S.; Nolasco, Marjorie Cseko. Bases para monitoramento recifal: diferenças espectrais entre os corais saudáveis e branqueados. **Anais do 48º Congresso Brasileiro de Oceanografia**, 2016. p. 7184.
- HEDLEY, J. D.; MUMBY, P. J. Biological and remote sensing perspectives of pigmentation in coral reef organisms. **Adv. Mar Biol.** 2002. pp. 277–317.
- HOCHBERG, E. J.; ATKINSON, M. J.; APPRILL, A.; ANDREFOUET, S. Spectral reflectance of coral. **Coral Reefs**, v. 23, n. 1, 2004. pp. 84–95.
- HOCHBERG, E. J.; ATKINSON, M. J. Spectral discrimination of coral reef benthic communities. **Coral Reefs**, v. 19, n. 2, 2000. pp. 164–171.
- HOCHBERG, E. J.; ATKINSON, M. J.; ANDRÉFOUËT, S. Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 85, n. 2, 2003. pp. 159–173.
- HOLDEN, H.; LEDREW, E. Spectral discrimination of healthy and non-healthy corals based on cluster analysis, principal components analysis, and derivative spectroscopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 2, 1998. pp. 217–224.
- JEFREY, S. W.; HAXO, F. T. Photosynthetic Pigments of Symbiotic Dinoflagellates (Zooxanthellae) **The Biological Bulletin**. v. 135, n. 1, 1968. pp. 149–165.
- JEFFREY, S. W.; MANTOURA, R. F. C.; WRIGHT, S. W. **Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern oceanography**. No Title. UNESCO Publishing, 1997.
- JONCK, C.C.A.C.; GALVÃO, T. A.; SANTORO, E. P.; VILLELA, H.; PEIXOTO, R. S.; BARBOSA, C. F.; RODRIGUES, S.V.; OLIVEIRA, E.N. Spectral reflectance of neotropical coral *Mussismilia hispida* (Verrill, 1902) submitted to thermal stress as an indicator of zooxanthella disbiosis. **Anais do XV Encontro Nacional De Microbiologia Ambiental - ENAMA**, 2017.
- JOYCE K.E.; PHINN S.R. Hyperspectral analysis of chlorophyll content and photosynthetic capacity of coral reef substrates. **Limnology Oceanography**, v. 48, 2003. pp. 489–496.
- KARPOUZLI, E.; MALTHUS, T. J.; PLACE, C. J. Hyperspectral discrimination of coral reef benthic communities in the western Caribbean. **Coral Reefs**, v. 23, n. 1, 2004. pp. 141–151.

- KUHL, M.; COHEN, Y.; DALSGAARD, T.; JORGENSEN, B.B.; REVSBECH, N.P. Microenvironmental and photosynthesis of zooxanthellae in scleractinian corals studied with microsensors for O₂, pH and light. **Marine Ecology Progress Series**, v. 117, 1995. pp. 159-172.
- KUTSER, T.; DEKKER, A. G.; SKIRVING, W. Modeling spectral discrimination of Great Barrier Reef benthic communities by remote sensing instruments. **Limnology and Oceanography**, v. 48, n. 1, part 2, 2003. pp. 497–510.
- KUTSER, T.; MILLER, I.; JUPP, D. L. B. Mapping coral reef benthic substrates using hyperspectral space-borne images and spectral libraries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 70, n. 3, 2006. pp. 449–460.
- LEAL, M.C.; JESUS, B.; EZEQUIEL, J.; CALADO, R.; ROCHA, R.J.M.; CARTAXANA, P.; SERÓDIO, J. Concurrent imaging of chlorophyll fluorescence, Chlorophyll a content and green fluorescent proteins-like proteins of symbiotic cnidarians. **Marine Ecology**, v. 36, n. 3, 2015. pp. 572–584.
- LEIPER, I. A.; SIEBECK, U.E.; MARSHALL, N.J; PHINN, S.R. Coral health monitoring: Linking coral colour and remote sensing techniques. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 3, 2009. pp. 276–286.
- LEIPER, I.; PHINN, S.; DEKKER, A. G. Spectral reflectance of coral reef benthos and substrate assemblages on Heron Reef, Australia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 12, 2012. pp. 3946–3965.
- LOUCHARD, E.; REID, R.; STEPHENS, C.; DAVIS, C.; LEATHERS, R.; DOWNES, T.; MAFFIONE, R. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments. **Optics Express**, v. 10, n. 26, 2002. pp. 1573.
- MAZEL, C. H. Spectral measurements of fluorescence emission in Caribbean cnidarians. **Marine Ecology Progress Series**, v. 120, n. 1–3, 1995. pp. 185–192.
- MAZEL, C.H. Coral fluorescence characteristics: excitation emission spectra, fluorescence efficiencies, and contribution to apparent reflectance. SPIE Volume 2963 - **Ocean Opt XIII**. v. 1, 1996. pp. 240–245.
- MAZEL, C.H.; FUCHS, E. Contribution of fluorescence to the spectral signature and perceived colour of corals. **Limnol Oceanogr**, v. 48, 2003. pp. 390–401.

- MEDEIROS, T.A; SEOANE, J. C. S.; NOLASCO, M.C. Spectral signatures of Brazilian coral reefs. **Proceedings of the 13th International Coral Reef Symposium**, 2016, Honolulu. Abstract Book, 2016.
- MELLENDEZ-PASTOR, I.; INAVARRO-PEDREÑO, J.; GÓMEZ, I.; KOCH, M. Identifying optimal spectral bands to assess soil properties with VNIR radiometry in semi-arid soils. **Geoderma**, v.147, 2008. pp. 126-132.
- MINGHELLI-ROMAN, CHISHOLM, J.R.M.; MARCHIORETTI, M. JAUBERT, J.M. Discrimination of coral reflectance spectra in the Red Sea. **Coral Reefs**, v. 21, n. 3, 2002. pp. 307–314.
- MORAES, E.C. **Fundamentos do sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE. 2002.
- MYERS, M.R.; HARDY, J.T.; MAZEL, C.H.; DUSTAN, P. Optical spectra and pigmentation of Caribbean reef corals and macroalgae. **Coral Reefs**, v. 18, n. 2, 1999. pp. 179–186.
- NUNES, F. L. D.; NORRIS, R. D.; KNOWLTON, N. Long distance dispersal and connectivity in Amphi-Atlantic corals at regional and basin scales. **PLoS ONE**, v. 6, n. 7, 2011.
- NURDIN, N.; KOMATSU, T.; YAMANO, H.; ARAFAT, G.; RANI, C.; AKBER, M. A. S. Spectral Clustering of Coral Reefs on the Small Islands, Spermonde Archipelago, Indonesia. **Physical Science International Journal**, v. 5, n. 1, 2015. pp. 1–11.
- PEÑUELAS J.; GAMON J.A.; GRIFFIN K.L.; FIELD C.B. Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 46, 1993. pp. 110–118.
- PERKINS R.; KROMKAMP J.; SERÓDIO J.; LAVAUD J.; JESUS B.; MOUGET J.; LEFEBVRE S.; FORSTER R. **The application of variable chlorophyll fluorescence to micrphytobenthic biofilms**. In: Suggett D., Prásil O., Borowitzka M. (Eds), *Chlorophyll a Fluorescence in Aquatic Sciences: Methods and Applications*. Springer, London, 2010. pp. 237– 275.
- PHINN, S. R.; ROELFSEMA, C. M.; MUMBY, P. J. Multi-scale, object-based image analysis for mapping geomorphic and ecological zones on coral reefs.

- International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 12, 2012. pp. 3768–3797.
- REICHSTETTER, M.; FEARNES, P.R.C.S; WEEKS, S.J.; MCKINNA, L.I.W.; ROELFSEMA, C.; FURNAS, M. Bottom Reflectance in Ocean Color Satellite Remote Sensing for Coral Reef Environments. **Remote Sensing**, v. 7, n. 12, 2015. pp. 16756–16777.
- ROCHA, R.J.M.; CALADO R.; CARTAXANA P.; FURTADO J.; SERÔDIO J. Photobiology and growth of leather coral Sarcophyton cf. glaucum fragments stocked under low light in a recirculated system. **Aquaculture**, v. 414–415, 2013a. pp. 235–242.
- ROCHA R.J.M.; PIMENTEL T.; SERÔDIO J.; ROSA R.; CALADO R. Comparative performance of light emitting plasma (LEP) and light emitting diode (LED) in ex situ aquaculture of scleractinian corals. **Aquaculture**, v. 402–403, 2013b. pp. 38–45.
- ROTH, M. S.; LATZ, M. I.; GOERICKE, R.; DEHEYN, D. D. Green fluorescent protein regulation in the coral *Acropora yongei* during photoacclimation. **Journal of Experimental Biology**, v. 213, n. 21, 2010. pp. 3644–3655.
- ROUSE, J. W.; HASS R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. **Remote Sensing**, 1973. pp. 309-317, 1973.
- RUNDQUIST, D. C.; HAN, L. H.; SCHALLES, J. F.; PEAKE, J. S. 1 Remote Measurement of Algal Chlorophyll in Surface Waters : The Case for the First Derivative of Reflectance Near 690 nm. **Photogrammetric Engineering e Remote Sensing**, v. 62, n. 2, 1996. pp. 195–200.
- RUNDQUIST, D.; GITELSON, A.; LAWSON, M.; KEYDAN, G.; LEAVITT, B.; PERK, R.; KECK, J.; MISHRA, D. R.; NARUMALANI, S. N. Proximal Sensing of Coral Features: Spectral Characterization of *Siderastrea siderea*. **GIScience e Remote Sensing**, v. 46, n. 2, 2009. pp. 139–160.
- RUSSELL, B. J.; DIERSSEN, H. M.; LAJEUNESSE, T. C.; HOADLEY, K. D.; WARNER, M. E.; KEMP, D. W.; BATEMAN, T. G. Spectral reflectance of palauan reef-building coral with different symbionts in response to elevated temperature. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, 2016. pp. 1–19.

- SALIH, A.; LARKUM, A.; COX, G.; KÜHL, M.; HOEGH-GULDBERG, O. Fluorescent pigments in corals are photoprotective. **Nature**, v. 408, n. 6814, 2000. pp. 850–853.
- SEOANE, J.C.S.; ARANTES, R.C.M.; CASTRO, C.B. Benthic habitat mapping Recife de Fora, Brazil: Imagery and GIS. **Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium**. July, 2012.
- SERÔDIO J.; CARTAXANA P.; COELHO H.; VIEIRA S. Effects of chlorophyll fluorescence on the estimation of microphytobenthos biomass using spectral reflectance indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 8, 2009. pp. 1760–1768.
- TIJSSEN J; WIJGERDE, T., LEAL, M.C.; OSINGA, R. Effects of zinc supplementation on growth and colouration of the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. **PeerJ Preprints** 5:e2858 v1, 2017.
- TORRES-PÉREZ, J. L.; GUILD, L. S.; ARMSTRONG, R. A.; CORREDOR, J.; ZULUAGA-MONTERO, A.; POLANCO, R. Relative pigment composition and remote sensing reflectance of Caribbean shallow-water corals. **PLoS ONE**, v. 10, n. 11, 2015.
- TORRES-PÉREZ, J. L.; GUILD, L. S.; ARMSTRONG, R. A. Hyperspectral distinction of two Caribbean shallow-water corals based on their pigments and corresponding reflectance. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, 2012. pp. 3813–3832.
- VENN, A. A.; WILSON, M. A.; TRAPIDO-ROSENTHAL, H. G.; KEELY, B. J.; DOUGLAS, A. E. The impact of coral bleaching on the pigment profile of the symbiotic alga, *Symbiodinium*. **Plant, cell e environment**, v. 29, n. 12, 2006. pp. 2133-2142.
- VERON, J. **Corals of the World**. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, Australia, 2000.
- WETTLE, M.; FERRIER, G.; LAWRENCE, A. J.; ANDERSON, K. Fourth derivative analysis of Red Sea coral reflectance spectra. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 19, 2003. pp. 3867–3872.
- WETTLE, M.; BRANDO, V. E. SAMBUCA: **Semi-analytical model for bathymetry, un-mixing and concentration assessment**. CSIRO Land and Water, 2006. pp. 1-20.

- WIJGERDE, T.; MELIS, A.V.; SILVA, C. I. F.; LEAL, M. C.; VOGELS, L.; MUTTER, C.; OSINGA, R. Red light represses the photophysiology of the scleractinian coral *Stylophora pistillata*. **PLoS ONE**, v. 9, n. 3, 2014. pp. 1–10.
- WILKINSON, L.; BLANK, G.; GRUNBER C. **Desktop analysis with Systat**. New Jersey: Prentice Hall; 1996.