

6 Discussão e Conclusões

Os resultados obtidos a partir dos espectros gerados pelo LIDAR-PUC demonstraram um conjunto de soluções aplicáveis ao monitoramento ambiental, suscitam uma nova gama de questionamentos em face dos novos dados (e às possibilidades de apresentação que a maneira com que foram adquiridos permitiram desenvolver) e sugerem novos experimentos para o desenvolvimento do equipamento e para diferentes abordagens sobre estas novas questões levantadas.

Em relação ao experimento correlacionando a banda do espalhamento Raman da água com a temperatura da água, verificou-se que é um indicador de uma possível utilização deste procedimento para a caracterização de águas do tipo ACAS na superfície da água. Experimentos mais abrangentes devem ser produzidos, controlando-se tanto a temperatura quanto a salinidade da água e também fazendo uso de água marinha natural em diversas concentrações, para se levar em conta a variação de outras contribuições ao espectro, testando a robustez do algoritmo adotado. Um número maior de medidas deve ser obtido na faixa de temperatura de interesse (entre 10 e 30 °C). Uma outra possibilidade será trabalhar na segunda ordem do monocromador, o que permitirá uma maior separação dos picos e, então, o ajuste de duas gaussianas. Neste caso, se o nível de ruído for diminuído, poderá ser interessante o emprego da desconvolução pelo método de Jansson, para melhor identificação dos picos.

A metodologia para cálculo da concentração relativa de clorofila a permitiu a calibração por medidas de concentração absoluta de clorofila a obtidas pelos métodos tradicionais sobre amostras testemunho. A relação entre essas grandezas se mostrou linear na faixa de interesse do estudo, isto é, na variação da população fitoplanctônica das águas marinhas costeiras ou de alto mar, inclusive em águas ricas em nutrientes, como em águas de ressurgência. Surpreendentemente, o experimento de campo onde medidas foram realizadas *in situ*, em um mesmo local, ao longo do tempo, apresentou relação linear para os dados do dia e da noite, apesar das variações climáticas reportadas para a ocasião. Há que se

ressaltar, igualmente, a associação da mudança da curva de calibração à variação da temperatura da água obtida em 5.3.4.

Por outro lado, os coeficientes angulares obtidos nos experimentos com águas naturais foram, muitas vezes, substancialmente diferentes daqueles obtidos nas culturas isoladas de algas. Esta variação pode ser causada pelas diferentes condições ambientais experimentadas pelas amostras naturais. É importante notar que a concentração absoluta de clorofila a foi obtida por meio de método tricromático no caso das culturas de algas e pelo método fluorimétrico nos demais casos. Na época destes experimentos não houve intercalibração dos instrumentos, mas se alguma variação existir, deve ser pequena, pois os laboratórios envolvidos nestas análises já participaram de campanhas de intercalibração onde ambos atingiram bom desempenho. Independente disto, há que se ressaltar que, mesmo utilizando-se o método tricromático para se obter a concentração absoluta de clorofila a , esta se encontra bem correlacionada com a obtida pelo processamento do espectro do LIDAR.

Em alguns casos, o coeficiente linear da curva ajustada é maior (mesocosmo, campanha do emissário de Cabiúnas, medidas temporais de águas coletadas) que qualquer um daqueles ajustados no experimento com culturas de algas (todos menores que 6,5). A análise desta discrepância não foi o alvo desses experimentos e sua razão não pode ser desvendada a partir dos experimentos até aqui realizados. Algumas hipóteses podem ser levantadas como a influência do meio ambiente na taxonomia da população fitoplanctônica e no nível de atividade fotossintética (nível de estresse), que afeta diretamente a eficiência da fluorescência da clorofila a . Contudo, talvez o fator determinante nos experimentos *in situ* pode estar associado ao perfil de distribuição da população fitoplanctônica analisado pelo pulso do laser com relação à posição de coleta sub-superficial (em torno de 1m de profundidade) das amostras de testemunho de onde foram obtidas as concentrações absolutas de clorofila a .

Em que pese todas estas possibilidades, o experimento realizado em Cabiúnas ao longo de 5 dias, com a embarcação estacionada em uma posição fixa, indica que, ao menos para águas costeiras, (lamina d'água de 15m), mesmo com a ocorrência de vários fatores físicos, tais como iluminação (dia - limpo, nublado ou chuvoso - e noite), entrada de frente fria além de mudança na taxonomia da população fitoplanctônica [Petrobras, 2001], não houve uma diminuição

significativa do fator de ajuste R^2 . Tal experimento não foi repetido para águas oceânicas, onde pequenas mudanças nesses parâmetros citados podem provocar mudanças mais significativas na taxonomia e atividade fotossintética da população do fitoplâncton.

De qualquer forma, a abordagem de buscar correlação entre os dados do LIDAR-PUC com a concentração absoluta de clorofila a na camada de 1 a 2m da superfície da água mostrou-se bastante correta. Esta opção, apesar do pulso do laser ser capaz de penetrar até 30m de profundidade, foi adotada porque levamos em consideração 3 aspectos: 1) a angulação de 45° de incidência do feixe sobre a água, levando a menor profundidade de penetração; 2) a maior perda de energia do feixe, causada pela reflexão não normal na interface ar-água e 3) o mesmo tipo de perda de energia para o sinal retroespalhado na interface água-ar.

Nos estudos comparativos entre as grandezas calculadas de concentração relativa de clorofila a e concentração relativa de MOD, as novas informações lançam novos questionamentos sobre a dinâmica das variáveis ambientais. A compreensão das causas desses novos dados, como a variação da correlação localizada entre as concentrações relativas de clorofila a e MOD deve ser objeto de estudo mais acurado.

É preciso levar em conta, entretanto, que a montagem experimental utilizada não objetivou a otimização do aparato para a medida quantitativa da concentração relativa de MOD. A fluorescência da MOD se espalha por uma área do espectro muito maior que a da clorofila a . Inclusive, a natureza da MOD é variável, podendo, de acordo com sua composição, variar a posição onde ocorre a fluorescência (ou mesmo não exibindo fluorescência quando excitada no comprimento de onda de excitação utilizado – 532nm). Além disso, a posição do espalhamento Raman da água é um tanto distante da maior contribuição da fluorescência da MOD, levando a maior discrepância entre os valores dos coeficientes de atenuação da radiação utilizados na equação do LIDAR (equação 12). Entretanto, esta análise permitiu identificar mudanças na dinâmica dos ecossistemas, seja por uma simples mudança de profundidade na disposição da população fitoplanctônica, seja pelo aumento da atividade bacteriana consumindo e degradando o fitoplâncton, ou mesmo pelo aporte de uma fonte extra de matéria orgânica. De qualquer maneira, a estabilidade do padrão de correlação é uma indicação de normalidade em relação à vizinhança analisada. Um exemplo

interessante de alteração não reportado neste trabalho, mas que se encontra em [Petrobras, 2001b] é a identificação de um aumento de fluorescência de clorofila a na borda de uma pluma na plataforma de Pampo, sem um aumento significativo da fluorescência da MOD. Por outro lado, ocorreu um aumento da fluorescência da MOD acompanhada pela diminuição da fluorescência da clorofila a no interior da pluma.

Outras fontes de fluorescência não consideradas no presente estudo foram os pigmentos acessórios, como a ficoeritrina, que fluoresce na região de 560 a 580nm e a ficocianina, que fluoresce na região de 620nm. Apesar de alguma variação de ficoeritrina ser visualmente observável em alguns espectros do LIDAR, não se realizaram esforços para sua quantificação. A pequena intensidade deste sinal quando comparada com o nível de ruído normalmente presente nas medidas fez com que não fosse dada prioridade na busca de um processamento consistente da concentração relativa de ficoeritrina. Esta busca introduziria custos na análise de pigmentos por métodos de HPLC com detectores de fluorescência para identificação e quantificação deste pigmento. Para caracterização deste pigmento com o LIDAR será recomendável, inclusive, a possibilidade do uso de outros comprimentos de onda de excitação.

Mesmo contornadas as limitações acima citadas, a análise da dinâmica da correlação entre as concentrações relativas de clorofila a e MOD não é trivial. Uma questão a ser colocada é saber se os *spots* são oriundos de fontes localizadas de matéria orgânica ou são flutuações naturais do meio ambiente. Esta análise exigirá não só uma sofisticação do LIDAR e do processamento dos dados, como cuidado adicional na logística do experimento, em virtude da necessidade de analisar não apenas a variação espacial dos valores medidos, mas também, concomitantemente, a variação ao longo do tempo.

Tal empreitada poderá indicar como se processam os efeitos sobre o ambiente marinho de fontes localizadas de MOD, sejam elas naturais ou antropogênicas. Esta informação poderá ser relevante tanto para áreas costeiras quanto para áreas de alto-mar, especialmente onde ocorre a exploração jazidas de petróleo.

A geração de mapas para visualização da distribuição de clorofila a ou MOD abre novos horizontes para a análise ambiental em mesoescala. Os satélites ambientais ou não tem a resolução necessária para a análise nesta escala ou

carecem de métodos ativos para identificar certas ocorrências. A combinação de análise em diferentes escalas mostrou-se promissora, como revelou a comparação entre o mapa gerado de concentração relativa de clorofila a e a imagem do satélite RADARSAT.

A análise das regiões à luz dos novos dados, empregando tanto os conjuntos isolados como realizando comparações entre eles levanta observações interessantes. A região no entorno da plataforma de Pargo apresenta uma elevação significativa da concentração relativa de clorofila a a jusante da plataforma. Esta ocorrência, não observada quando analisada pelas amostras testemunho [Petrobras, 2001b], sugerem entre outras possibilidades, o enriquecimento do ambiente pela dispersão da água de produção, aumentando a população fitoplanctônica. Esta hipótese é baseada na observação do ocorrido na plataforma de Pampo citado em [Petrobras, 2001b]. Apesar do pouco número de experimentos envolvendo a correlação entre MOD e clorofila a , há que se ressaltar como exemplo, que na campanha próxima à plataforma de Pargo é identificada uma anticorrelação nos pontos a jusante da plataforma e que, provavelmente, está na direção da dispersão da água de produção ali gerada. Inclusive, como se pode observar pelo gráfico dos *transects* abaixo, os valores de concentração relativa de clorofila a calculados a montante da plataforma de Pargo (*transect 2*, últimos pontos no gráfico da Figura 73) já apresentam valores superiores aos de referência para alto mar, ainda que inferiores aos valores típicos da costa (*transect 1*, primeira metade dos pontos). Já os valores calculados para a área de maior intensidade apresentam valores compatíveis com regiões costeiras, onde o há aporte natural de matéria orgânica. A confirmação desta hipótese poderá ser testada com o empreendimento de campanhas específicas, utilizando o LIDAR-PUC para, inclusive, identificar os locais mais adequados para a obtenção de amostras de testemunho.

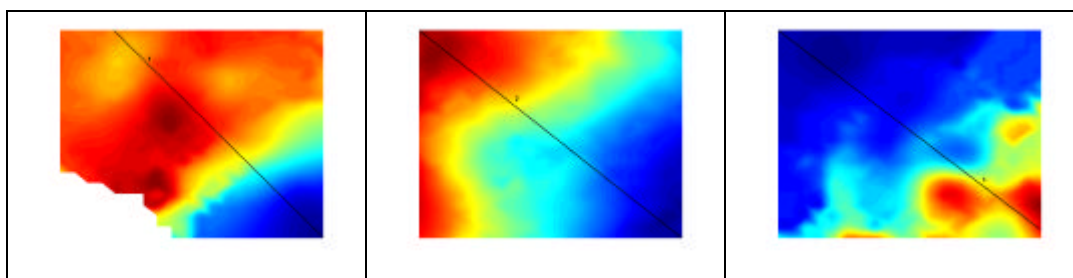


Figura 72 – *Transects* nos mapas gerados. 1º mapa: região de Cabiúnas, *transect 1*; 2º mapa: região da plataforma de Pargo, *transect 2*; 3º mapa: região de alto mar, *transect 3*.

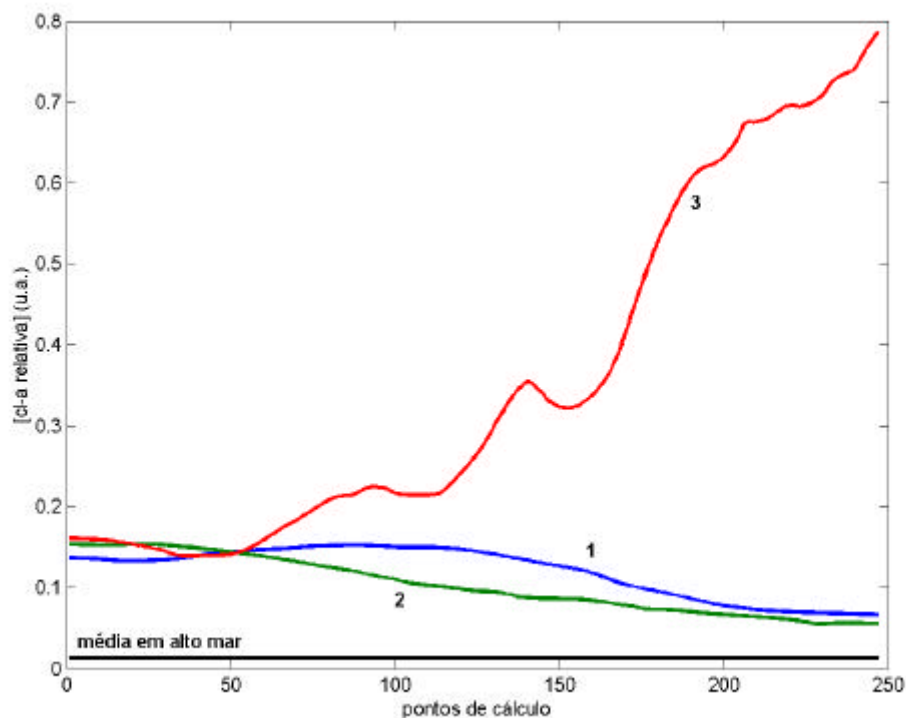


Figura 73 – Comparação dos valores calculados da concentração relativa de clorofila a nos *transects* apresentados na Figura 72. Os *transects* não estão em escala. O *transect* 1 tem 14,5km, o *transect* 2 tem 4,0km e o *transect* 3 tem 63,8km. Em relação aos mapas, os *transects* estão com seus pontos aqui alinhados da esquerda para a direita.

Não menos importante foi a observação de sinais altamente intensos na região de alto mar, na direção da foz do rio Paraíba do Sul. Como podemos observar pelo *transect* 3 da Figura 73, as medidas próximas à costa são compatíveis com os valores observados nos outros experimentos. Entretanto, ao se afastar da costa sinais extremamente altos foram observados. A comparação com a imagem de radar, com sua mancha escura acompanhando a faixa de maior intensidade do mapa de concentração relativa de clorofila a sugere a ocorrência de uma explosão de produção de algas na região, fato não excepcional, pois esta é justamente uma área de ressurgência. É interessante observar que os relatos sobre as condições do mar na ocasião da campanha descrevem o mar como límpido, “transparente”. Levantando-se a hipótese de que a mancha no radar foi gerada de fato pela presença do fitoplâncton na região, deve-se considerar algumas alternativas para explicar estes fatos. Como a presença de filme de óleo natural, não foi visualizado em nenhum momento pelo pessoal da expedição (lembrando que os picos de fluorescência de clorofila a foram obtidos durante o dia), será

necessário estudar se uma massa considerável de algas microscópicas na camada superficial da água, alterando a densidade do meio consegue transformar a tensão superficial a ponto de interferir nas imagens geradas por satélite.

É patente, também, neste caso, a correlação entre as concentrações relativa e absoluta de clorofila a . É interessante observar que a temperatura da superfície da água nos pontos amostrados teve média de 22,1°C, com DPR% de apenas 3,6%. Descartando, em princípio, esta grandeza como a responsável pela variação apresentada. As informações dos dados ambientais associados aos aqui levantados fornecem material substancial para a compreensão do fenômeno e deverá ser fonte para análise por parte dos especialistas na oceanografia e biologia da região.

Com a conclusão deste trabalho é possível afirmar que já existe no Brasil tecnologia e demanda para a aplicação de LIDAR no monitoramento de ecossistemas. Particularmente no que se refere ao monitoramento marinho, alguns experimentos adicionais se apresentam como recomendáveis e algumas adaptações construtivas no equipamento podem, com um custo relativamente baixo, agregar um conjunto muito maior de informações para uma melhor caracterização do ambiente marinho e seus ciclos biogeoquímicos.

Neste sentido, o uso dos cristais geradores do 3° e 4° harmônicos do laser de Nd-YAG (355 e 266nm) é um importante incremento. Para o emprego da excitação a 266nm será necessário a implantação de um novo intensificador de imagens, com resposta na região do azul. Com o 2° e 3° harmônicos, o equipamento poderá, inclusive, ser adaptado para o funcionamento concomitante das duas fontes de excitação com um único sistema sensor, permitindo a busca de uma maior compreensão das interferências relevantes dos diferentes parâmetros que atuam na correlação entre MOD e clorofila a e, talvez, com os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs).

Ainda outros experimentos adicionais podem ser realizados. Medidas com o pulso do laser incidindo normalmente à superfície do mar, com uma montagem adequada à minimização da radiação de fundo durante trabalhos diurnos, podem ser associadas em conjunto com medidas obtidas com um CTD, fluorímetro e radiômetro de imersão, permitindo esclarecer as condições em que se pode de forma confiável realizar análises de correlação entre MOD e clorofila a , além da possível produção de algoritmos para obtenção remota de informações sobre densidade, temperatura e salinidade da camada superficial da água.

Laseres compactos e com alta taxa de repetição emitindo no verde e no vermelho podem ser utilizados em conjunto para fornecer uma medida de profundidade de penetração das radiações de interesse, permitindo uma melhor compreensão do perfil de distribuição da biomassa e/ou até mesmo a mais fácil detecção de um filme superficial de óleo.

Outro aspecto a ser desenvolvido é a utilização do sinal de radiação passiva, utilizado para a obtenção do sinal da radiação retroespalhada, como indicador da condição natural de iluminação, já que é sabido que a quantidade de radiação fotossintetizante disponível influencia a eficiência quântica da fluorescência nos pigmentos antena.

Monitorar ambientes na escala que se necessita atualmente exige não apenas um cuidadoso preparo de calibração e controle em laboratório mas, principalmente, um efetivo apoio logístico para a caracterização e acompanhamento dos parâmetros relevantes para o equilíbrio ambiental. O monitoramento é dispendioso e pode ser ineficiente. A capacidade de realização de amostragem manual é limitada e cara. O emprego do LIDAR-PUC na caracterização do meio ambiente tem a virtude de poder produzir de maneira automática uma grande quantidade de informações distribuídas tanto espacial como temporalmente. O desenvolvimento desta ferramenta deve ser efetuado cobrindo-se quatro frentes de atuação: o melhoramento do equipamento, incorporando novos sensores, eletrônica de controle e software; a realização de um conjunto de experimentos controlados para avaliar as mudanças nos espectros com a variação de parâmetros ambientais controlados; a realização de campanhas em campo, com o devido suporte logístico para se conseguir acompanhar, em tempo hábil, ocorrências ambientais de interesse, como as ressurgências, entradas de frentes frias ou descargas de material antropogênicos; o aperfeiçoamento dos algoritmos de processamento dos dados coletados. Estas condições podem ser conseguidas com o apoio da comunidade científica e dos agentes sociais com responsabilidade e interesse nas regiões monitoradas, como o poder público e empresas. Desta forma, acredita-se que poderemos dispor de uma ferramenta efetiva e economicamente viável para auxiliar no monitoramento e compreensão da dinâmica dos ambientes marinhos.