

USO DE SENSOR HIPERESPECTRAL AEROTRANSPORTADO NO MONITORAMENTO DA PLUMA TERMAL OCEÂNICA DECORRENTE DA DESCARGA DE REFRIGERAÇÃO DA CENTRAL NUCLEAR DE ANGRA DOS REIS

Using airborne hyperspectral scanner to monitoring the oceanic thermal plume produced by the surface discharge of the cooling water from Angra dos Reis nuclear power plant

Eduardo Viegas Dalle Lucca^{1,2}
Jefferson Vianna Bandeira³
João Antônio Lorenzetti²
Romero da Costa Moreira^{1,2}
Ruy Morgado de Castro¹
Lécio Hannas Salim³
Orlando Demétrio Zaloti Júnior¹
Enio Salvatore Carmine Esposito¹

¹ **Centro Técnico Aeroespacial/Instituto de Estudos Avançados - CTA/IEAv**

Caixa Postal 6044 – 12231-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{lucca, moreira, rmcastro, zaloti, enio}@ieav.cta.br

² **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
loren@dsr.inpe.br

³ **Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear- CDTN/CNEN**

Caixa Postal 941 - 30123-970 – Belo Horizonte - MG, Brasil
(jvb, salimlh)@cdtn.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta os primeiros resultados obtidos utilizando o sensor HSS e medidas de temperatura superficial da água do mar para mapear as variações de temperatura associadas com a descarga de água aquecida (pluma termal) nas adjacências da Central Nuclear em Angra dos Reis. A metodologia adotada baseia-se no sobrevôo e imageamento da área de estudo com o sensor HSS, na coleta de temperatura da superfície da água do mar simultaneamente ao imageamento e na análise estatística dos dados coletados em vôo e em campo. Nesta etapa, as relações entre os dados de temperatura coletados em campo e os dados da imagem são estabelecidas para identificar o melhor canal do sensor HSS (8 a 12 μ m) para fazer esta caracterização e também para gerar coeficientes que permitam criar uma imagem deste canal com os valores de temperatura corrigidos para os efeitos causados pela atmosfera interveniente entre o alvo e o sensor. Os valores absolutos de temperatura da superfície da água do mar obtidos a partir das imagens após aplicação dos coeficientes obtidos na análise estatística concordaram em média com os medidos em campo com uma incerteza de 0,8°C.

Palavras chaves: sensoriamento remoto, sensor hiperspectral, temperatura superficial da água do mar, processamento de imagens, pluma termal.

ABSTRACT

This paper describes the first results obtained using a hyperspectral scanner system (HSS) and field measurements of the sea surface temperature to map a heated liquid effluent jet (plume) produced by the surface discharge of the cooling water from two nuclear power plants into a rather closed bay in southeastern Brazil. The adopted methodology is based on the flight and imaging of study area using the HSS sensor, collecting temperature data from the sea surface and acquiring the imagery at the same time and finally, the statistical analysis of data collected in the field and those ones from the imageries. At this phase, beyond the identification of the best suited IVT channel for the characterization of temperature variations of the thermal plume, coefficients were also generated to create an image of this channel with corrected temperature values for the effects caused by atmosphere acting in data collected by the sensor. Results obtained show that this sensor and the used methodology of data acquisition and processing are well suitable for the study and the monitoring of local thermal plumes. The absolute temperature values from the sea surface obtained from the images after the use of coefficients obtained from statistical analysis agree in average with the measured values from the field with an uncertainty of 0,8°C.

Keywords: remote sensing, hyperspectral scanner, sea surface temperature, thermal image processing, thermal plume

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores interesses no sensoriamento remoto na faixa espectral do infravermelho consiste no mapeamento de feições termais, em especial aquelas que ocorrem nos oceanos e zonas costeiras. Processos termais que ocorrem nos oceanos, como os vórtices, as ressurgências, dentre outros, têm sido estudados de modo operacional com dados gerados pelo sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) dos satélites da série NOAA, o qual possui dois canais no IVT (Infravermelho Termal) com resolução espacial de 1,1km (nadir) que permitem determinar a temperatura superficial da água do mar com incerteza de 0,5°C (BARTON, 1995). Nesta mesma categoria de sensor podemos citar o MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) e o ATSR (Along-Track Scanning Radiometer). Embora possuam excelentes características radiométrica (10 a 12 bits) e temporal (diária), a resolução espacial (250m a 1km) destes sensores não é adequada para estudo de fenômenos que ocorrem em escalas locais como, por exemplo, as plumas térmicas decorrentes de poluição, despejo de água de rios na região costeira e descarga de água aquecida proveniente do processo de refrigeração de usinas termelétricas no ambiente marinho.

Sensores orbitais que podem ser empregados para este propósito incluem o TM (Thematic Mapper), o ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) e o ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Os dois primeiros estão a bordo dos satélites da série Landsat e possuem uma única banda no IVT com resolução espacial de 120m e 60m, respectivamente. O outro está a bordo da plataforma TERRA e possui 5 canais no IVT com resolução espacial de 90m, além de um sofisticado sistema de calibração dos detectores que lhe permite determinar a temperatura superficial dos alvos com incerteza de 0,5°C (GILLESPIE et al., 1998). Embora tenham resolução espacial mais adequada para detectar e caracterizar feições de menor escala, estes sensores têm

como desvantagem a baixa resolução temporal (16 dias), deficiência que pode ser agravada em casos de condições atmosféricas impróprias para o imageamento.

O estudo de fenômenos termais locais, devido à dinâmica e à reduzida área onde ocorrem, necessita, tanto quanto possível, de sistemas com resoluções espacial e temporal mais apropriadas. Neste caso, o emprego de sensores aerotransportados que abrangem regiões espectrais propícias para o estudo em pauta é vantajoso uma vez que podem proporcionar uma visão abrangente do fenômeno com relativa frequência e rapidez. O potencial e a aplicabilidade desta abordagem têm sido demonstrados por SCARPACE et al. (1975), SCHOTT (1975), BYRNES e SCHOTT (1986) e SCHOTT (1979).

No Brasil, foi iniciado em outubro de 2003, um trabalho de pesquisa similar para o monitoramento da pluma termal que ocorre nas adjacências da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, em Angra dos Reis, RJ, a partir de imagens obtidas com o sensor aerotransportado HSS (*Hyperspectral Scanner System*). Desde meados de 1980, época em que a usina entrou em operação, esta tarefa vem sendo realizada com metodologias convencionais empregando-se embarcações e medições pontuais de temperatura *in situ*, procedimento tão mais lento e oneroso quanto maior for a amostragem realizada.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é discutir a utilização do sensor HSS para caracterizar as variações de temperatura associadas com a descarga de água aquecida (pluma termal) nas adjacências da Central Nuclear em Angra dos Reis. As relações entre os dados de temperatura coletados em campo e dados da imagem foram estabelecidas para identificar o melhor canal do sensor HSS (8 a 12µm) para fazer esta caracterização. A caracterização deste fenômeno através de sensores aerotransportados pode ser importante para efeitos de planejamento estratégico, elaboração de planos de contingência, estudos de impacto ambiental e suporte na seleção de áreas propícias para construção de

novas usinas nucleares ou obras que produzam impactos térmicos no meio ambiente costeiro ou fluvial.

2. ÁREA DE ESTUDO

Na costa sudeste do Brasil, na cidade de Angra dos Reis, a cerca de 100 km a oeste da cidade do Rio de Janeiro, existem atualmente duas usinas nucleares em funcionamento: Angra I (600MW) e Angra II (1300MW). Instaladas próximo ao mar, as usinas captam água em uma enseada semifechada para utilizá-la como fluido refrigerador de seus reatores. Em condições normais, a água aquecida proveniente do resfriamento dos reatores (com fluxo de 40 e 80 metros cúbicos por segundo, respectivamente) é escoada através de um túnel (400m de comprimento) na Baía de Piraquara de Fora, situada em lado oposto à área de captação, separada por uma península. A descarga de água aquecida (pluma termal) constitui-se numa anomalia local, a qual pode alcançar alguns quilômetros quadrados. Sua porção mais quente chega a atingir 8°C acima da temperatura da água do ambiente marinho adjacente (BANDEIRA et al., 2003).

Além desse aspecto, em ocorrências eventuais, o vento e as correntes marinhas podem deslocar a pluma de descarga em direção ao lado da enseada onde ocorre a captação. A detecção e a caracterização deste fenômeno trazem, portanto, informações importantes para a adequada tomada de decisões.

3. METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1. Aquisição e processamento dos dados HSS

O sensor HSS (*HyperSpectral Scanner System*), adquirido para o SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia), possui 50 canais, dos quais sete estão posicionados na faixa espectral de 3 a 5µm e seis na faixa de 8 a 12µm (**Tabela 1**).

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DOS CANAIS TERMAIS DO SENSOR HSS

Canal	Centro de Banda (µm)	Limites de Bandas (µm)	
38	3,24	3,03	3,37
39	3,53	3,36	3,71
40	3,91	3,77	4,13
41	4,17	4,06	4,50
42	4,63	4,44	4,83
43	4,98	4,80	5,15
44	5,31	5,15	5,44
45	8,18	7,90	8,41
46	8,63	8,44	8,86
47	9,10	8,93	9,33
48	9,67	9,49	10,26
49	10,54	10,31	11,26
50	11,50	11,29	12,43

O sensor possui quantização do sinal em 12 bits (discriminação radiométrica de 4096 níveis digitais), uma óptica que permite obter imagens com

resoluções espaciais entre 4 e 10 m (variável com a altura de vôo), e é equipado com corpos negros de referência que possibilitam, após o processamento radiométrico, determinar a temperatura de brilho dos alvos imageados. Essas e outras características do HSS possibilitam o ajuste de diversos parâmetros que influenciam a característica da imagem obtida pelo mesmo e, por conseguinte, exigem cuidadoso planejamento. Maiores informações sobre este sensor podem ser obtidas em MOREIRA et al. (2005).

Para planejar a campanha de aquisição em Angra dos Reis com o HSS, foi necessário definir as seguintes variáveis: o campo de visada instantâneo (IFOV), as alturas de vôo, a velocidade da plataforma, a frequência de varredura do espelho além das temperaturas máxima e mínima dos corpos negros internos. A partir destas variáveis são definidas a resolução espacial nominal (GIFOV), a largura da faixa imageada (GFOV), a velocidade (no solo) da plataforma adequada para a perfeita composição da imagem e ainda as NETDs (Noise Equivalent Temperature Difference) dos canais do infravermelho termal, as quais variam em função da frequência de rotação do espelho e do IFOV selecionados.

Como as NETDs dos canais termais devem ser as menores possíveis para permitir a discriminação dos gradientes horizontais de temperatura da pluma, optou-se pelo IFOV de 2,5mrad e frequência de rotação do espelho de varredura igual a 12,5Hz, o que permitiu obter valores médios de NETD de 0,27°C para os canais da faixa espectral de 8 a 14µm (SENSYTECH, 2002a). Esta configuração possibilitou o imageamento em diversas alturas dentro do envelope operacional da aeronave e foi mantida constante durante toda a fase de coleta de dados.

Estipulou-se o sobrevôo da área de estudo nas seguintes alturas: 3048, 2743, 2438, 2134, 1981 e 1829m. A primeira é o limite superior de operação da aeronave e a última é o limite inferior imposto pela relação de IFOV e frequência de rotação do espelho selecionados. A direção de imageamento foi definida no rumo magnético 073° em função da geografia local. Todas as faixas de vôo foram executadas na mesma direção para se preservar as condições de imageamento (vento, iluminação solar, etc.). As temperaturas máxima e mínima dos corpos negros de referência foram definidas como 37°C e 15°C, respectivamente.

Um aspecto importante do imageamento feito em múltiplas alturas é a obtenção de imagens com resoluções espaciais distintas, variando da visão sinóptica até a resolução espacial mais fina, com intenção de se estudar os gradientes horizontais de temperatura internos da pluma. Além disto, é possível explorar as diferentes influências da atmosfera nestas alturas para quantificar seus efeitos e, desta forma, ser capaz de derivar grandezas físicas (temperatura) a partir dos dados gerados. Aplicações desta técnica são descritas em SCHOTT (1997).

O sobrevôo da área foi feito no período da manhã (linhas de vôo executadas entre 09:00 e 11:00h)

para coincidir com as passagens de alguns dos principais satélites de sensoriamento remoto (Landsat-7 e Terra) e no período da tarde (linhas de vôo executadas entre 15:00 e 16:00h). O sobrevôo da tarde tinha por objetivo o monitoramento de um experimento de dispersão com Rodamina WT, uma substância líquida (traçador fluorescente) de cor avermelhada. Após ser lançada na água, esta substância permite, através do monitoramento temporal de sua forma, concentração e deslocamento, normalmente efetuado com uma embarcação dotada de fluorímetro, avaliar a advecção e as características de dispersão superficial do meio líquido.

Durante a obtenção das imagens (09/10/2003), somente o reator de Angra II estava em operação. As condições atmosféricas na hora e local dos sobrevôos sobre a área de estudo estavam plenamente satisfatórias, sem nuvens, visibilidade acima de 25km e o vento de sudoeste com velocidades inferiores a 2m/s.

Os dados obtidos foram processados através de programa de importação e processamento de dados do próprio fabricante do sensor, o qual permite gerar, como produto final, imagens dos diversos canais registradas entre si, corrigidas geometricamente para efeitos de varredura e de visada e ainda expressas em valores de radiância (canais no visível) ou temperatura (para os canais termais). Cabe ressaltar que a temperatura do alvo obtida após o processamento é uma temperatura de brilho que, portanto, deve ser corrigida pela emissividade (nem sempre conhecida a priori) para representar a temperatura termodinâmica do alvo imageado. Outro aspecto é que o cômputo da temperatura de brilho não leva em conta os efeitos causados pela atmosfera presente entre o alvo e o sensor.

Outra etapa do processamento foi a geração de composições coloridas utilizando-se as imagens dos diferentes canais. Através desta técnica foi possível explorar a capacidade espectral do sensor para caracterizar a pluma termal obtendo-se, em uma única imagem, as informações de interesse contidas em diferentes porções do espectro eletromagnético (visível e infravermelho). As composições coloridas utilizando-se imagens do infravermelho termal foram feitas empregando-se a primeira componente obtida da análise por componentes principais (ACP) das imagens dos seis canais do IVT. A primeira componente foi empregada porque contém a informação que é comum a todos os dados de entrada e que, neste caso, está relacionada com valores de temperatura da superfície.

3.2. Coleta de dados de temperatura de campo

Simultaneamente ao sobrevôo da aeronave foram obtidas medições de temperatura superficial da água do mar na região da pluma térmica originada das usinas. Os equipamentos utilizados foram dois Termocondutivímetros WTW com acurácia de 0,1°C e um Thermopoint 20EM, operando entre 8 e 14µm e acurácia de 1°C. Os primeiros foram utilizados para

medir os valores da temperatura a profundidades de 5 e 10cm. O outro, operado manualmente a partir do barco, obteve medidas da camada superficial. Foram amostrados 24 pontos distribuídos espacialmente (para verificação dos gradientes internos de temperatura) em radiais partindo da posição mais próxima do ponto de descarga da água quente proveniente dos reatores até uma distância total de aproximadamente 5km do local de lançamento.

A grade de coleta dos dados de temperatura *in situ* usada foi a mesma utilizada em experimentos anteriores (BANDEIRA et al., 2003), cujos resultados poderiam servir como referência. A localização dos pontos durante a coleta foi feita empregando-se dois receptores GPS, um fixo e um móvel a bordo do barco, aplicando-se assim a técnica diferencial (DGPS) para aumento da precisão, obtendo-se um erro de posicionamento inferior a 8,8m.

3.3. Análise estatística dos dados

Embora para muitas aplicações a forma, extensão e a distribuição espacial da temperatura sejam as informações de interesse, foi possível gerar também um mapa com os valores absolutos de temperatura seguindo uma das abordagens para correção dos efeitos causados pela atmosfera descrita em SCHOTT (1997), a qual consiste na correlação direta entre os valores de temperatura obtidos nos canais termais com aqueles obtidos em campo. Tomou-se por base a imagem obtida a 3080m (caso mais crítico), a qual foi georeferenciada com erro médio de 1,38 pixels e reamostrada por vizinho mais próximo. Nesse caso, o erro de localização de um ponto na imagem é de aproximadamente 11m.

Os pontos de controle utilizados foram obtidos em levantamento de campo usando-se receptores GPS geodésicos e também coordenadas extraídas de cartas cadastrais da região. O processo de georeferenciamento foi feito devido à falha do GPS interno do sensor HSS, cabendo frisar que este possui acurácia de posicionamento de aproximadamente 15m.

O passo seguinte foi localizar na imagem os pontos onde foram coletados dados de temperatura *in situ* e computar os valores de temperatura obtidos em cada um dos canais termais.

Através da regressão linear entre os valores de temperatura medidos em campo e os obtidos na imagem, para cada canal, foi possível identificar o canal mais adequado para a caracterização das variações de temperatura da pluma termal.

Os coeficientes da reta de regressão foram então utilizados para gerar a imagem deste canal com os valores de temperatura corrigidos para os efeitos da atmosfera.

A regressão foi feita com 09 pontos de amostra, os quais representavam todo campo de variação de temperatura da cena e o teste do resultado obtido foi feito com os demais pontos não usados na derivação da reta.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização da pluma termal

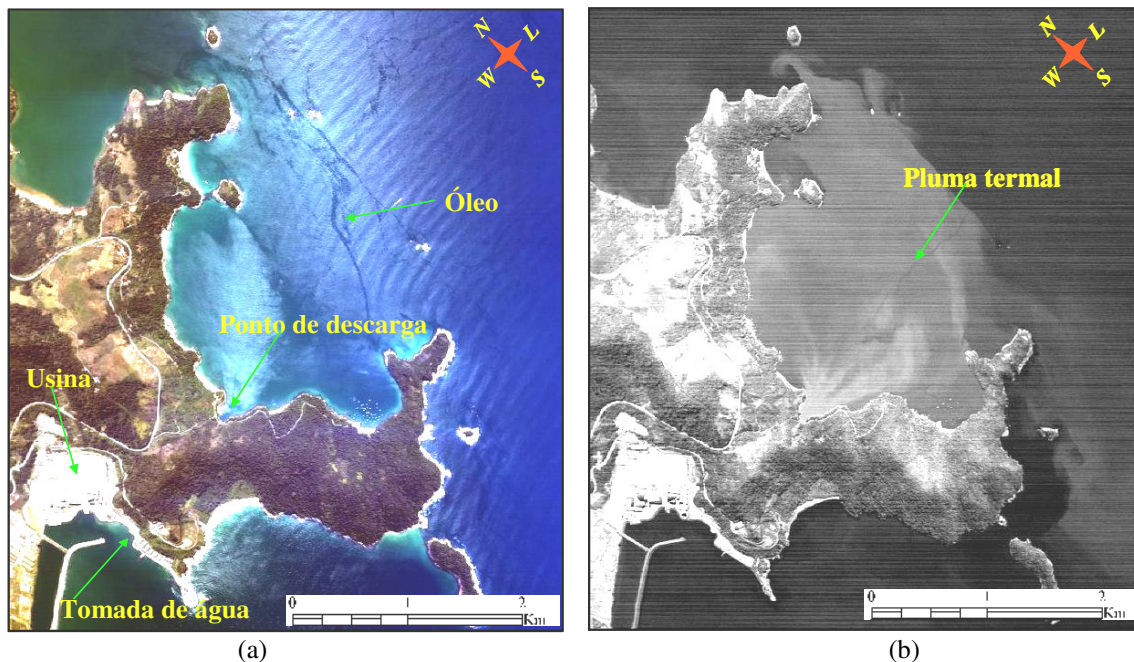


Fig. 1 – (a) Composição colorida com os canais 7 ($0,628\mu\text{m}$), 4 ($0,541\mu\text{m}$) e 1 ($0,456\mu\text{m}$) do sensor HSS em vermelho, verde e azul, respectivamente. (b) Imagem do canal 48 ($9,80\mu\text{m}$). O imageamento foi feito a 3080m de altura no dia 09/10/2003 às 09:30h (hora local). A escala aproximada das imagens é de 1:58.000.

A Figura 1 apresenta duas imagens obtidas pelo sensor HSS no sobrevôo sobre a área feito a 3080 metros de altura no período da manhã. A Figura 1a é uma composição colorida RGB utilizando os canais 7 ($0,628\mu\text{m}$), 4 ($0,541\mu\text{m}$) e 1 ($0,456\mu\text{m}$) em vermelho, verde e azul, respectivamente. A Figura 1b é uma imagem do canal 48 ($9,80\mu\text{m}$). Neste exemplo, as imagens possuem resolução espacial nominal de $7,62\text{m}$ e a largura da faixa imageada é de aproximadamente 5700m . Vê-se que, na imagem obtida a esta altura, é possível se ter uma visão sinóptica de toda a área de estudo. Na Figura 1a, as condições de iluminação favorecem a visualização do padrão de propagação de ondas e de algumas ocorrências de derrame de óleo. A Figura 1b mostra claramente a área ocupada pela pluma termal com gradientes internos de temperatura. A pluma está quase totalmente contida dentro da baía, ocupando uma área aproximada de $3,7\text{km}^2$. O efeito da descarga estende-se, a partir do ponto de lançamento, por aproximadamente $2,2\text{km}$ na direção do eixo de descarga (leste) e pouco mais (3km) na direção nordeste. A conformação da topografia da costa a leste do ponto de descarga resultou num aprisionamento de grande parte da pluma termal no interior da baía. Entretanto, é possível observar que parte da pluma escapa deste confinamento e se estende para sudeste. Algumas imagens orbitais adquiridas em datas anteriores, quando os dois reatores estavam em operação normal, também indicaram padrão semelhante de dispersão da pluma. Também é possível verificar que as porções mais

quentes da pluma ocupam uma área pequena situada nas proximidades do ponto de descarga. Segundo BANDEIRA et al. (2003), a descarga é feita através de um túnel de seção retangular (10m de altura x $14,25\text{m}$ de largura), posicionado na linha de costa, de -1m a -11m abaixo do nível do mar. Logo a leste das imediações do ponto de descarga, sendo o fundo rochoso, as profundidades são menores que aquela onde é descarregada a água proveniente dos reatores e estes fatos contribuem para que haja um fluxo ascendente da água aquecida nesta região. A Figura 2 refere-se ao imageamento realizado no período da tarde. A Figura 2a mostra uma composição colorida com os canais 7 ($0,628\mu\text{m}$), 4 ($0,541\mu\text{m}$) e 1 ($0,456\mu\text{m}$) do sensor HSS em vermelho, verde e azul, respectivamente. A Figura 2b apresenta a imagem da primeira componente resultante da análise por componentes principais (ACP) aplicada sobre os seis canais posicionados na faixa de $8-12\mu\text{m}$.

A Figura 2c ilustra uma composição colorida menos usual, obtida com a imagem CP1 (vermelho) e com os canais 7 (verde) e 4 (azul). Segundo CROSTA (1993) e SCHOWENGERDT (1997), a CP1 contém a informação que é comum a todos os dados de entrada e que, neste caso, está correlacionada com os valores de temperatura. A cena foi imageada a 2134m de altura, no período da tarde e quarenta minutos após o lançamento da Rodamina. A resolução espacial da imagem é de 6m . A composição colorida da Figura 2c permite integrar informações obtidas nas diferentes porções do espectro eletromagnético.

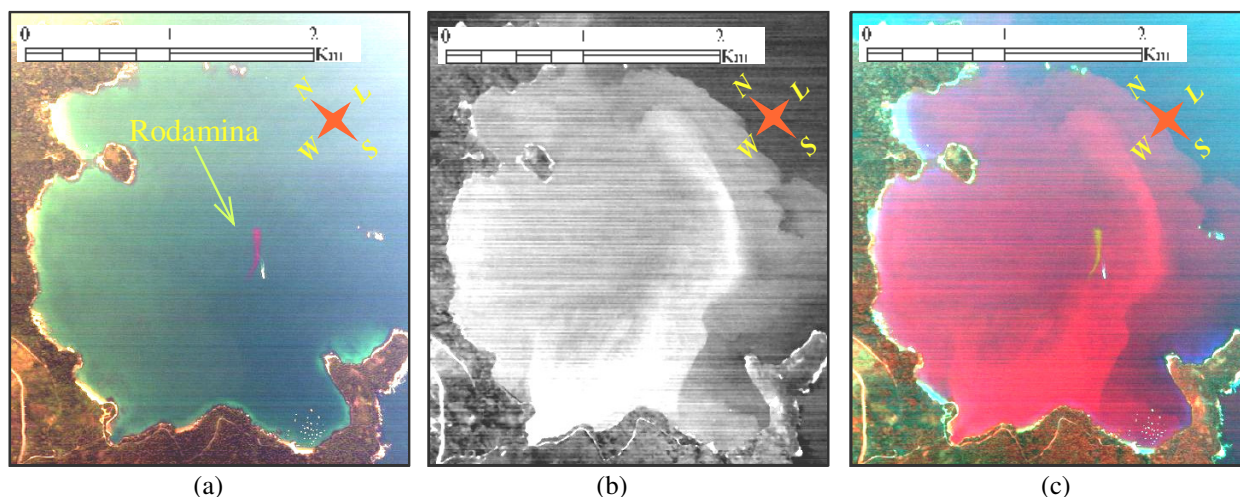


Fig. 2 – (a) Composição colorida com os canais 7 (0,628 μ m), 4 (0,541 μ m) e 1 (0,456 μ m) do sensor HSS em vermelho, verde e azul, respectivamente. (b) Imagem da primeira componente principal (CPI) dos seis canais do IVT. (c) Composição colorida utilizando-se a imagem CPI (vermelho) e os canais 7 (verde) e 4 (azul), respectivamente. A cena foi imageada em 09/10/2003 às 15:55h e a 2134 metros de altura, simultaneamente ao experimento de lançamento de Rodamina. A escala aproximada das imagens é de 1:48.000.

No caso, a identificação da dispersão da Rodamina obtida nos canais do visível (Figura 2a) pode ser combinada com aquelas obtidas no infravermelho termal (Figura 2b), reunindo em uma única imagem as informações de interesse e permitindo uma rápida interpretação do fenômeno através da identificação da forma, extensão, características de dispersão e gradientes internos de temperatura. Observando-se a Figura 2c é possível notar também que porções mais quentes da pluma (tonalidade mais avermelhada) apresentam padrão de dispersão coincidente com o marcado pela Rodamina (parte central da imagem).

4.2. Relação entre dados medidos em campo e dados obtido pelo sensor HSS

Observando-se os dados coletados em campo (tomando por referência as medidas coletadas a profundidade de 5cm) verificou-se que o maior valor de temperatura medido foi de 32,5°C nas imediações do ponto de descarga, enquanto que os menores valores, em torno de 25,5°C, foram medidos em pontos afastados 3 a 4km do ponto de descarga e nas imediações do ponto de tomada de água. Deste modo, pode-se inferir que a variabilidade total de temperatura da pluma durante a campanha era da ordem de 7°C. Aqui cabe ressaltar que alguma variação em relação a estes valores deve ser esperada para outras datas em função do caráter dinâmico do sistema, da interação da pluma com os forçantes oceanográficos (correntes, maré, agitação marinha) e meteorológicos (vento de superfície, temperatura do ar, estabilidade, turbulência, etc.) e também do regime de operação dos reatores. Como indicado anteriormente, a situação da pluma observada nesse experimento é resultante da operação de apenas um dos reatores (Angra II).

Como esperado, observa-se a tendência da diminuição da temperatura com a distância do ponto de descarga. Também foram feitas três medidas no ponto mais próximo a descarga, uma às 09:41h (32,4°C), outra às 11:06h (32,6°C) e outra às 14:50h (33,0°C), indicando uma ligeira tendência de aquecimento da superfície ao longo do período.

A Tabela 2 apresenta os coeficientes de correlação obtidos para cada um dos seis canais (8-12 μ m) a partir da regressão linear entre os valores de temperatura medidos em campo e os obtidos na imagem.

TABELA 2 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO OBTIDOS PELOS CANAIS SITUADOS ENTRE 8 E 12 μ m

Canal	Coefficiente de correlação
45	0,7644
46	0,8545
47	0,987
48	0,9396
49	0,8335
50	0,8975

O canal 47 foi o mais adequado para a caracterização das variações de temperatura da pluma termal. Os coeficientes da reta de regressão foram então utilizados para gerar a imagem deste canal com os valores de temperatura corrigidos para os efeitos da atmosfera. A Figura 3 apresenta o diagrama de espalhamento de pontos (reta de ajuste e equação de regressão) para o canal 47.

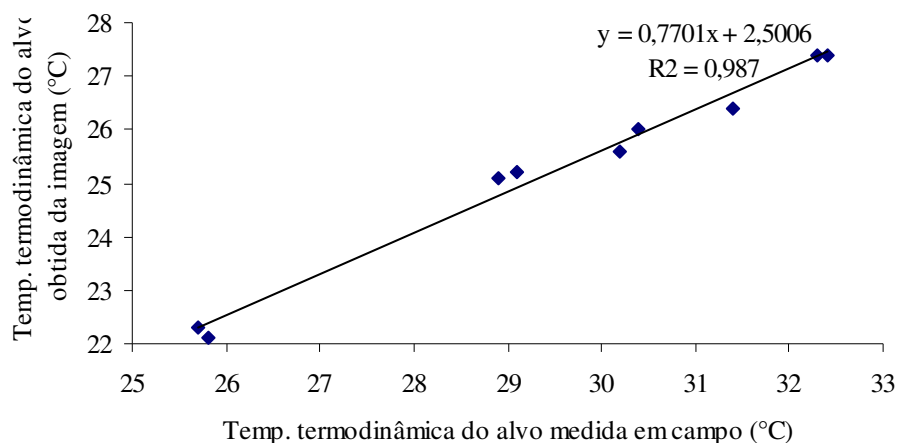


Fig. 3 – Diagrama de espalhamento de pontos (reta de ajuste e equação de regressão) para o canal 47.

Os resultados indicaram que os valores de temperatura obtidos na imagem, após aplicação dos coeficientes da regressão (resultados não apresentados), concordaram em média com os medidos em campo com uma incerteza de 0,8°C. Para emprego desta metodologia considerou-se que os coeficientes da regressão são aplicáveis igualmente para toda a cena, isto é, a atmosfera é horizontalmente uniforme. Outro aspecto importante é que o fenômeno termal, em análise na faixa espectral de interesse (8-12µm), ocorre em uma superfície de característica Lambertiana (emissão isotrópica) de emissividade conhecida (~0,986) a priori.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que o uso de sensor aerotransportado com as características do HSS aliado a metodologia de aquisição dos dados proposta é bastante adequado para detectar e caracterizar feições termais em ambientes aquáticos como a pluma termal nas adjacências da Central Nuclear de Angra dos Reis. Além do mais, esta abordagem poderia ser facilmente adaptada para utilização em outras aplicações tais como, detecção de derrame de óleo no mar, poluição, dispersão de sedimentos, monitoramento de ressurgências e frentes oceânicas, dentre outras.

Além das características espacial e radiométrica apropriadas para mapear o fenômeno de interesse, podem ser citadas, ainda, outras vantagens do emprego deste sensor, tais como a possibilidade de gerar imagens a qualquer hora do dia (restrito apenas pelas condições atmosféricas), flexibilidade de operação, liberdade para definir a área de imageamento e alturas de vôo e rapidez de aquisição, uma vez disponível uma aeronave para a missão. Essas características são particularmente importantes para estudos de impacto da ação antrópica sobre o ambiente, como no caso apresentado, principalmente em áreas sujeitas a freqüentes coberturas de nuvens e onde os processos possuam caráter dinâmico.

Os resultados da análise estatística mostraram que é possível, através da correlação entre medidas de campo e medidas obtidas pelo sensor, derivar o valor absoluto da temperatura com uma incerteza aceitável para o experimento em questão.

Alguns aspectos que precisam ser melhor estudados para o uso eficaz do HSS na caracterização das plumas termais dizem respeito à necessidade do uso de técnicas para corrigir os efeitos causados pela atmosfera nos valores medidos pelo sensor (e assim poder derivar o valor absoluto da temperatura), da solução de problemas geométricos na imagem decorrentes das variações da plataforma durante o imageamento e da necessidade de precisa e contínua calibração dos detectores.

O futuro aponta para uma crescente disponibilidade de sensores aerotransportáveis com as características semelhantes às do HSS. Assim, o adequado entendimento de suas potencialidades e limitações para aplicação em estudos do meio ambiente deve ser buscado por meio de ensaios tais como os apresentados neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem a colaboração do COMGAR, CTA/IEAv, III FAE, 2º/6ºGav, INPE, ELETRONUCLEAR e CDTN/CNEN.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANDEIRA, J.V., BARRETO, A.A., BOMTEMPO V.L., MOREIRA R.M., AND SALIM, L.H. The performance of a surface jet on a closed bay: The reality compared with the theory .6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries. **Proceedings...**Colombo, Sri Lanka: COPEDEC, 2003. 1 CD-ROM.

- BARTON, I.J. Satellite-derived sea surface temperatures: Current status. **Journal of Geophysical Research**, 100(5): 8777-8790, May, 1995.
- BYRNES, A. E.; SCHOTT, J. R. **Correction of Thermal imagery for atmospheric effects using aircraft measurement and atmospheric modeling techniques. Applied Optics**. Vol 25, n 15, 2563-2570, 1986.
- CRÓSTA, A. PENTEADO. **Processamento digital de imagens de Sensoriamento Remoto**, edição revisada, Campinas-SP, IG/UNICAMP, 170p, 1993.
- GILLESPIE, A., COTHERN, J.S., ROKUGAWA, S., MATSUNAGA, T., HOOK, S.J. AND KAHLE, A.B. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 36(4): 1113-1126, 1998.
- MOREIRA, R. C.; CASTRO, R. M.; ESPOSITO, E. S. C.; LUCCA, E. V. D. Sensor hiperespectral HSS: sumário das características técnicas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. (SBSR), 16-21 abr. 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8.
- SCARPACE, F.L.; MADDING, R.P.; GREEN, T. Scanning thermal plumes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Vol.41, No. 10, 12233-1231, 1975.
- SCHOTT, J. R. **Remote sensing: the image chain approach**. Oxford University Press. New York, 1997. 394p.
- SCHOTT, J. R., TOURIN, R .H. A completely airborne calibration of aerial infrared water temperature measurements. **Proceedings: 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment**. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, pp 477-484, 1975.
- SCHOTT, J. R. Temperature measurement of cooling water discharged from power plants. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Vol.45, No. 6, pp753-761, 1979.
- SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. San Diego: Academic Press, 522p, 1997.
- SENSYTECH INC. AA5201 **Airborne hyperspectral scanner system: operator manual**. Ann Arbor, Nov 2002a. v. 1. (Sensytech MN52011A Rev.1).
- SENSYTECH INC. AA5201 **Airborne hyperspectral scanner system: maintenance manual**. Ann Arbor, Nov 2002b. v. 2. (Sensytech MN52012A Rev.1).
- SENSYTECH. **AHS – Airborne Hyperspectral Scanner**. [on line]. <<http://www.sensytech.com/Imaging/ahs.html>>. Apr 22, 2003.