

**TESTE OPERACIONAL DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO
DE DADOS AEROTRANSPORTADO - SADA
O EXPERIMENTO BARRA-BONITA**

CARLOS ALBERTO STEFFEN
FABIO FURLAN GAMA
EVLYN M. L. M. NOVO

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Laboratório de Radiometria - LARAD
Caixa Postal 515
12201.970 - São José dos Campos - SP - Brasil
email: steffen@tid.inpe.br

Abstract. The nature of the spectral interaction between radiant energy and the Earth's surface components is very important for the development of Remote Sensing techniques. One of the most effective ways to understand those interactions is through the measurement and analysis of the spectral reflectance of those components. The use of field ground reflectance data for the calibration of satellite imagery can be more accurate if the measurements are done using a radiometer whose field of view has similar dimensions to that of the satellite imaging system. Many modern spectral radiometers, based upon CCD technology, have made the field reflectance measurements easier owing to their portability, speed of data acquisition and reliability. To take advantage of these new capabilities and to fulfill the geometric and spectral requirements of the ground data, the Laboratory for Radiometry of the National Institute of Space Research (INPE/BRAZIL), developed the Airborne Data Acquisition System (SADA), that uses two SPECTRON SE-590 radiometers and an helicopter as its operational platform. The SADA system is able to collect ground reflectance spectra at high sampling rates and over extensive or unaccessible targets such as water bodies and forests. The first operational test of the system was carried out on the Barra Bonita reservoir at the São Paulo State. In this experiment the SADA was used for the measurement of the bidirectional spectral reflectance factors of the different water masses of the reservoir. The results of this test showed that the system has an excellent operational flight performance and is very effective for the quick collection of field reflectance data over this kind of target.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportado (SADA) foi empregado numa operação de radiometria espectral dos diferentes tipos de água que compoem o reservatório de Barra Bonita (22°29'S / 048°34'W) no estado de São Paulo. O reservatório é formado pelos rios Tietê e Piracicaba (Figura 1), cujas águas se caracterizam por propriedades limnológicas bastante diferenciadas (Calijuri, 1988). Durante a operação, foram também coletadas amostras d'água nas áreas de medição radiométrica, para que através de sua análise físico-química, fossem obtidos dados para a pesquisa de possíveis correlações entre os parâmetros limnológicos e as informações espectrais.

Considerando que a maior motivação para o estudo do comportamento espectral das águas do reservatório, está no desenvolvimento de técnicas que permitam o monitoramento da qualidade da água através de sen-

soriamiento remoto orbital, a operação foi programada de forma que o período de medição incluísse o horário de passagem do satélite LANDSAT 5. Neste caso, as geometrias de iluminação solar e de medição radiométrica são semelhantes às de aquisição das imagens multicanais do imageador TM (Thematic Mapper), cujos dados espectrais podem então ser analisados e comparados com os obtidos no nível de superfície. Uma operação preparatória permitiu que o sistema fosse testado e configurado para as condições da medição e no dia 13 de outubro de 1991, no período das 09h às 11h, foram realizadas as operações de sobrevôo da área do reservatório.

2. O SISTEMA RADIOMÉTRICO

O SADA é um sistema aerotransportado, aprovado para operação em helicópteros do tipo ESQUILO¹ e especialmente desenvolvido para a medida de espectros de

¹ helicóptero produzido pela HÉLIBRAS DO BRASIL

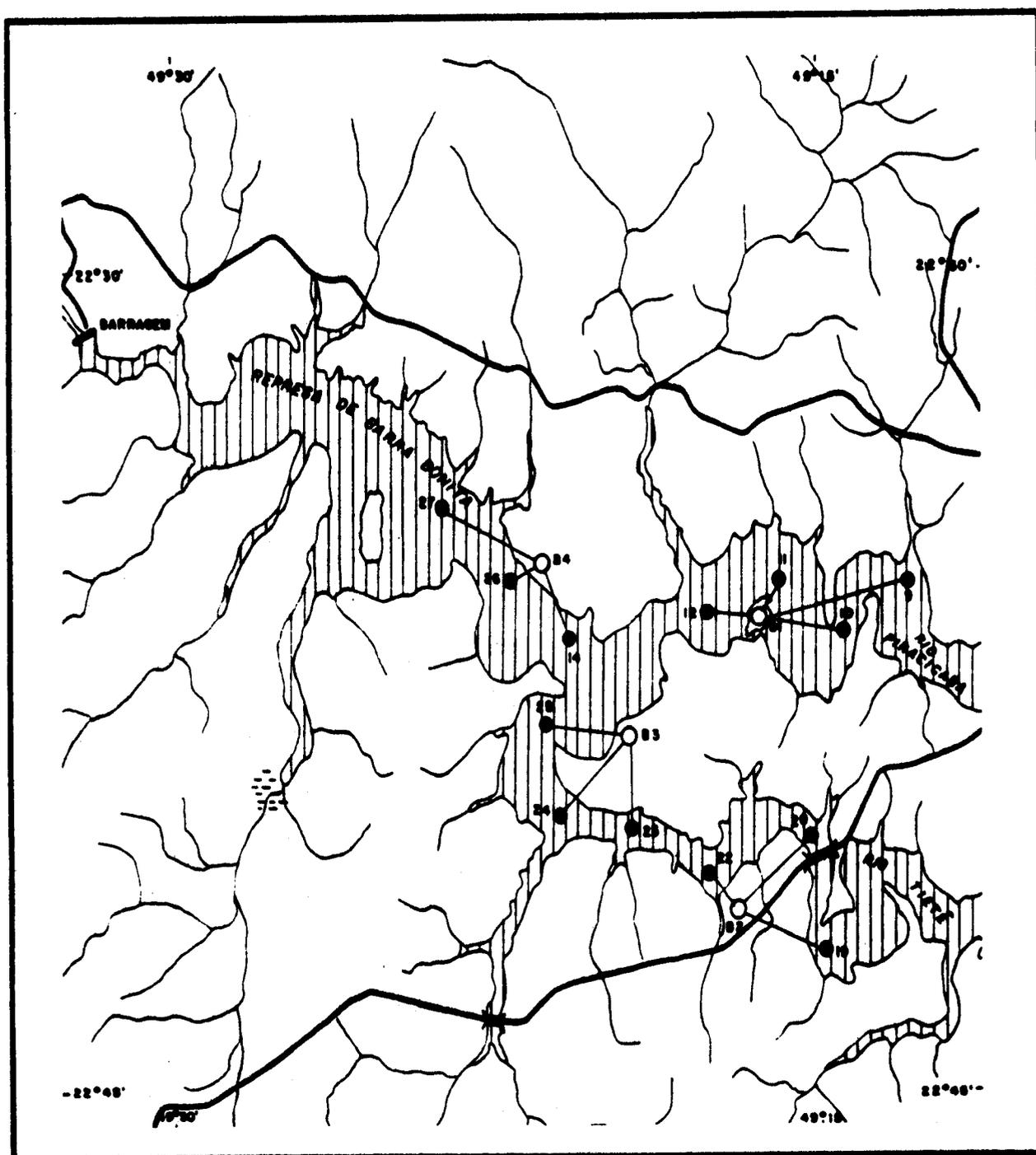


Figura 1. O reservatório de Barra Bonita

radiação refletidos ou emitidos por objetos cuja geometria ou localização inviabilizam o uso de métodos convencionais.

Como se pode observar nas Figuras 2 e 3, o SADA é composto de um módulo externo ou casulo que é instalado, através de uma interface metálica, no suporte de fixação de cargas do helicóptero ESQUILO. O casulo, contém em seu interior uma mesa de instrumentos, articulada no eixo transversal que permite compensar as variações de "pitch"² da aeronave e desta forma manter o apontamento vertical dos instrumentos. Para esta operação, a mesa foi equipada com a unidade detectora de um espectrorradiômetro SPECTRON SE-590³ e uma câmara fotográfica YASHICA/FX-D equi-

pada com "driver" elétrico. O módulo interno do SADA é constituído da unidade controladora do SE-590 e do subsistema de correção de "pitch", ambos alimentados por uma bateria central de 12V/6AH.

O Spectron SE-590 é um equipamento portátil (alimentado por uma bateria interna de NiCd) especialmente projetado para operações de medição radiométrica de campo e consta de duas partes: unidade controladora (data-logger/CE-500) e a unidade detectora (CE-390WB). Esta unidade, de construção baseada numa rede de difração e uma matriz linear de 256 detectores de silício (CCD) é capaz de permitir a medição de espectros na faixa de 350 à 1150nm com resolução espectral de 8 nm (FWHP)⁴. A unidade contro-

2 movimento de arfagem da aeronave

3 produzido pela SPECTRON ENG. - USA

4 FWHP = Full Width Half Peak

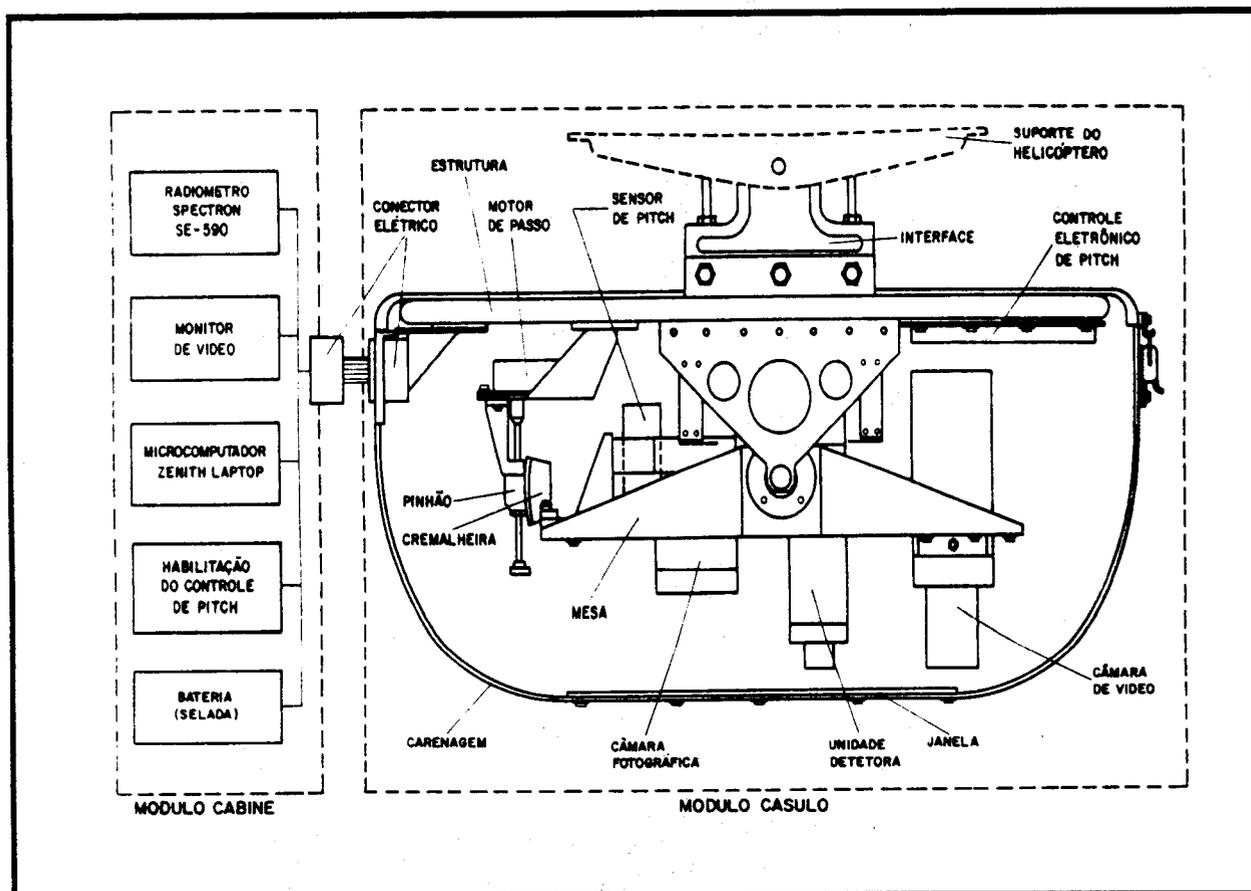


Figura 2. A configuração do SADA

ladora permite programar o modo de medição (média de varias medidas, tempo de integração, gravação automática) e armazenar os dados obtidos; para isto, um conversor A/D (de 12 bits) e um gravador digital permitem que os espectros sejam gravados, com seus dados auxiliares (data, hora, tempo de integração) em fita cassete que posteriormente pode ser lida na mesma unidade e seu conteúdo transferido para um computador, através da porta serial RS-232C. Outra característica bastante conveniente da unidade controladora é a sua capacidade de disparar a câmara fotografica em sincronismo com a medição.

3. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Como um dos objetivos científicos da missão era o de avaliar o potencial do SADA para a radiometria de massas d'água espectralmente distintas, foram selecionadas 13 estações amostrais distribuídas nos três compartimentos do Reservatório da Unidade Hidroelétrica de Barra Bonita. Trabalhos anteriores (Calijuri, 1988; Novo e Braga 1991a; Novo e Braga, 1991b) demonstraram que do ponto de vista limnológico e radiométrico, o reservatório de Barra Bonita possui três compartimentos, com massas de água bastante diferenciadas: o corpo central, o braço do rio Tietê e o braço

do rio Piracicaba. Como mostra a Figura 1, foram selecionadas 03 estações amostrais no corpo central (27,26, 14), 06 estações no braço do rio Tietê (19,20,22,23,24, 25) e 04 estações no braço do rio Piracicaba (9,10, 11,12).

A medição do fator de reflectância bidirecional espectral (FRBE) exige que o espectro de radiância do objeto seja comparado com o espectro de radiância de uma superfície de referência, de reflectância conhecida, medido nas mesmas condições de iluminação. Desta forma, cada espectro adquirido pelo SADA na operação aérea deve ser acompanhado de uma medida simultânea do espectro solar refletido por uma placa de referência, situada em um ponto próximo da área de amostragem (base). Para isto, ambos os radiômetros devem ter os seus relógios internos acertados no pré-vôo e acionados simultaneamente pelos operadores através de comunicação por rádio.

Considerando que o SE-590 adquire um espectro em cerca de 1 segundo e que, neste intervalo de tempo existem perturbações na superfície da água, provocadas pelo vento, bem como movimentos relativos entre o radiômetro e a amostra, o sistema foi programado para medir 4 espectros sucessivos de cada amostra, registrando apenas a média resultante desse conjunto.

Para minimizar o efeito da variação da trajetória atmosférica, as estações de amostragem, em número de 13, foram agrupadas em torno de 4 bases, como mostra a Figura 1; em cada uma dessas estações foram medidos os espectros de três amostras separadas aleatoriamente de cerca de 100m; portanto, no total foram obtidos 78 espectros (39 amostras e 39 referências). Desta forma, o FRBE de cada estação resultou da média de 13 espectros da água e igual número de espectros da placa de referência.

4) radiância da trajetória atmosférica entre o radiômetro e a amostra.

A primeira componente possui um espectro cuja configuração é característica das propriedades físico-químicas da água e é portanto a de maior interesse na medição radiométrica. A segunda componente tem um espectro de maior amplitude na faixa do azul que é adicionado na primeira componente. A terceira componente depende da altura solar e do estado de agitação da

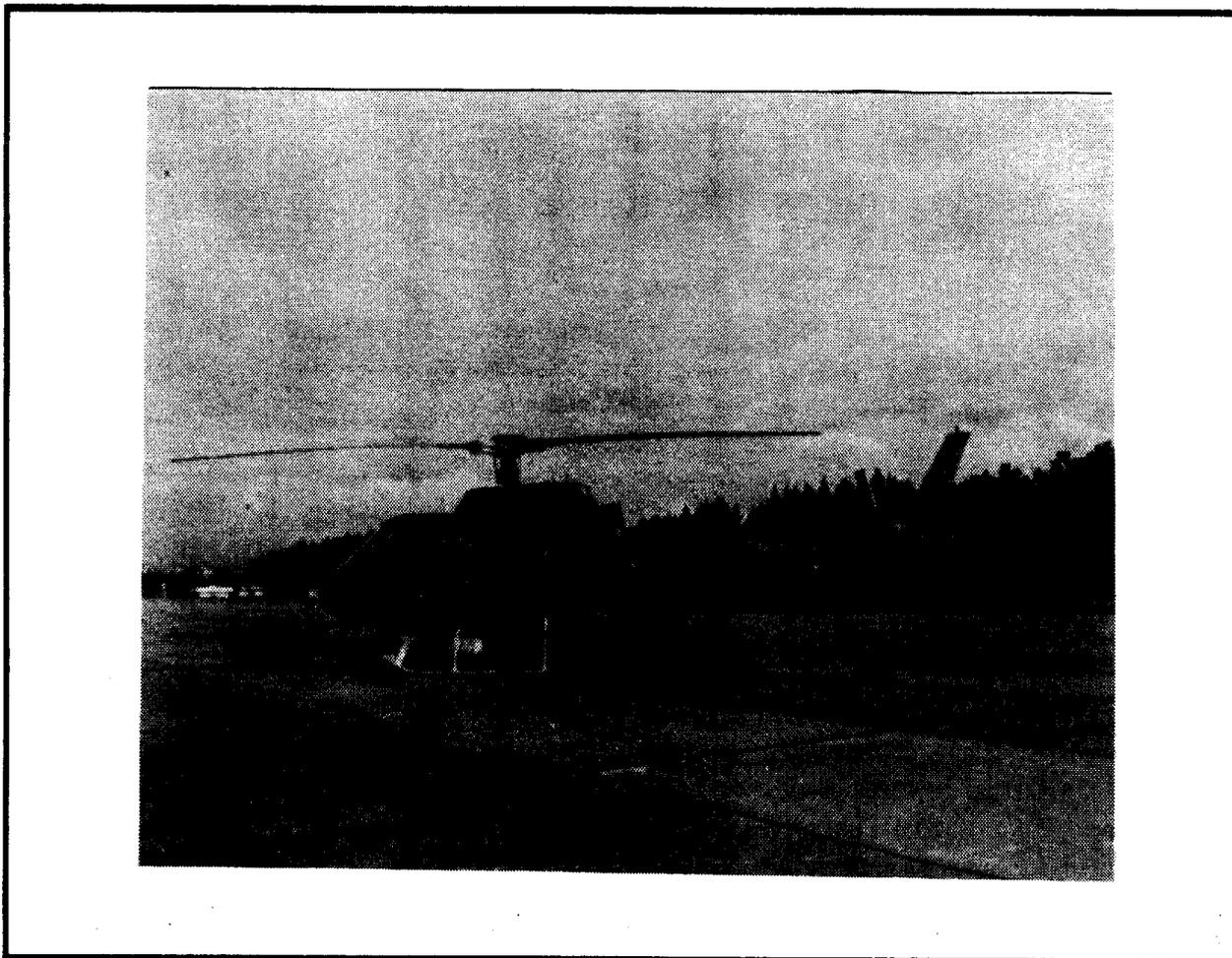


Figura 3. O Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportado

De modo geral, a radiância espectral de um corpo d'água, é constituída das seguintes componentes:

- 1) radiância emergente resultante dos processos de absorção e espalhamento da radiação solar no interior do corpo d'água.
- 2) radiância do céu especularmente refletida pela superfície da água dentro do campo de visada do radiômetro.
- 3) radiância solar direta especularmente refletida pela superfície da água dentro do campo de visada do radiômetro.

superfície no instante da medição; quando a superfície da água esta calma é suficiente definir o horário de vôo (HSL)⁵ de forma que o ângulo zenital solar não seja maior que o semi-ângulo de visada do radiômetro (Steffen, 1977); entretanto, a eficiência desta solução é limitada pela intensidade do vento que pode provocar a formação de um "glitter"⁶ na superfície da água, capaz de se estender até o interior da área amostral e neste caso, é inconveniente a realização da medição.

A magnitude da radiância e da atenuação da trajetória depende da altura de vôo e da qualidade da atmosfera; se necessário, o fator de correção desses efeitos pode ser determinado experimentalmente através do SADA. No caso da operação Barra Bonita a interfe-

5 HSL = Hora Solar Local

6 Reflexo solar múltiplo na superfície da água

rência da trajetória pode ser considerada desprezível, pois a atmosfera se apresentava bastante limpa e a altura de vôo ficou limitada ao nível em que a perturbação do ar provocada pelo rotor principal não foi sentida pela superfície da água.

Durante o experimento, um vento de leste constante e de média intensidade, resultou na formação de ondulações na superfície da água e com o objetivo de minimizar os efeitos decorrentes, foram tomadas as seguintes providências:

1) o período da medição foi escolhido de modo a incluir o horário da passagem do satélite LANDSAT-5 (09h40m/HSL); entretanto, seu início foi estabelecido de forma que a elevação solar fosse a mais baixa possível, para minimizar os efeitos do "glitter". Desta forma, o primeiro espectro foi adquirido às 09h36min quando a elevação solar atingia 52,2 graus e encerrada às 10h40min quando alcançava 65,6 graus.

2) testes preliminares permitiram verificar que a rede de difração da unidade detectora do SE-590 é capaz de atenuar aproximadamente 10% da radiação azul polarizada perpendicularmente a fenda de seu sistema óptico. Neste caso, a instalação transversal e a orientação "off-nadir" da unidade detectora permitiu capitalizar esta propriedade para diminuir a radiância do céu, levemente polarizada após a reflexão na superfície da água. Por essa razão, o controle de "pitch" da mesa de instrumentos foi desativado e esta inclinada de forma que os eixos ópticos dos instrumentos ficassem deslocados 10 graus da vertical na direção da cauda do helicóptero.

3) durante o vôo pairado sobre cada amostra, a proa da aeronave foi orientada para a direção do Sol, para evitar o apontamento dos instrumentos na direção do "glitter".

4) um pequeno teste permitiu calibrar o altímetro do helicóptero e ajustar em 200 pés (aproximadamente 70m) a altura de vôo, evitando assim a perturbação da superfície da água pelo efeito de vento produzido pelo rotor principal da aeronave.

5) as áreas amostrais foram agrupadas num raio máximo de 4km das respectivas bases (Figura 1), onde um radiômetro SE-590 estacionário, foi utilizado para medir os espectros de radiação solar refletidos pela placa de referência. Um equi-

pamento de rádio-comunicação garantiu que as medidas de solo e aéreas fossem quase simultâneas.

4. REDUÇÃO DOS DADOS

Na fase de pré-vôo, as unidades detectoras (solo e aérea) foram utilizadas para medir simultaneamente o espectro solar refletido pela placa de referência. Os espectros obtidos serviram para gerar a função espectral de intercalibração dos detectores. Essa placa de referência, a mesma utilizada nas bases, também foi calibrada com relação a um padrão de refletância conhecida disponível no LARAD.

Os espectros gravados em fita cassete foram lidos no gravador da unidade controladora e transferidos para um computador onde, através do programa ESPECTRO (Steffen et al., 1992), que foi desenvolvido para a redução de dados do SPECTRON SE-590. O arquivo obtido foi calibrado e transformado em outros arquivos contendo os fatores de reflectância bidirecional espectral (FRBE), os fatores de reflectância bidirecional nas bandas dos sensores HRV-SPOT; TM-LANDSAT e CZCS-NIMBUS, e a especificação colorimétrica das amostras d'água. Os principais passos dessa redução dos dados podem ser vistos no fluxograma da Figura 4, e foram os seguintes:

1. transferência dos espectros de intercalibração (BB00.LRD);
2. transferência dos espectros de calibração (BB01.LRD);
3. transferência dos espectros: amostras e referências, (BB02.LRD);
4. calibração relativa entre amostras e referências, (BB02R.LRD);
5. cálculo dos espectros médios de cada estação (BB02M.LRD);
6. anexação dos arquivos de calibração, (BB02M.LRD);
7. recalibração e geração dos FRBE das mostras, (BB02R.LRD);
8. tradução para o formato ASCII/matriz, (BB02G1.DAT);

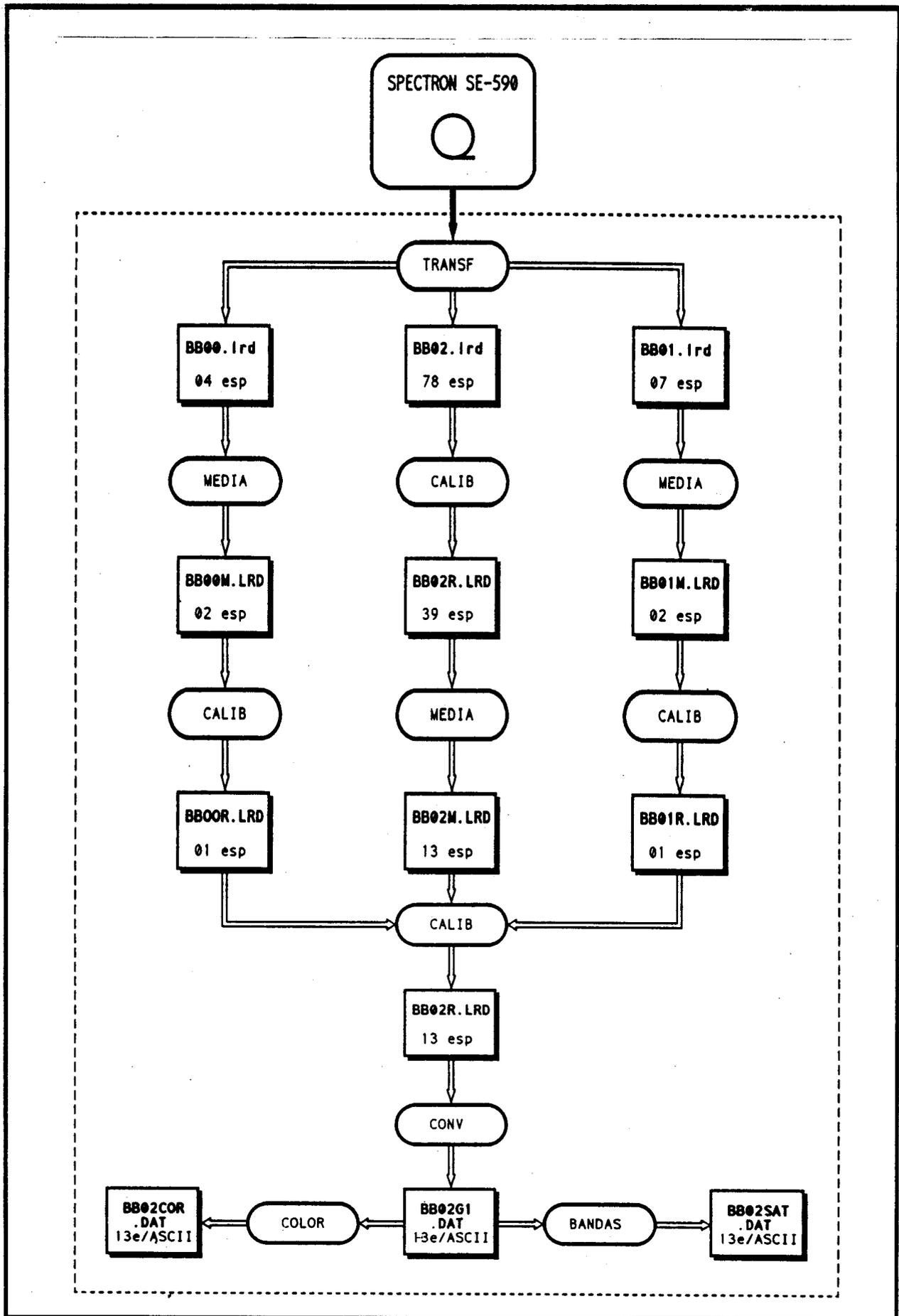


Figura 4. Redução dos dados Experimentais

9. classificação colorimétrica dos espectros, (BB02COR.DAT); e

10. cálculo dos FRB médios nas bandas dos sensores LANDSAT-TM, SPOT-HRV e NIMBUS-CZCS, (BB02SAT.DAT).

liminar desses espectros indica a existência de quatro tipos de corpos d'água radiometricamente distintos na área de amostragem.

A Figura 5a, referente à base 1, mostra os espectros do FRB das estações amostrais medidas no braço do rio Piracicaba, os quais se caracterizam por uma

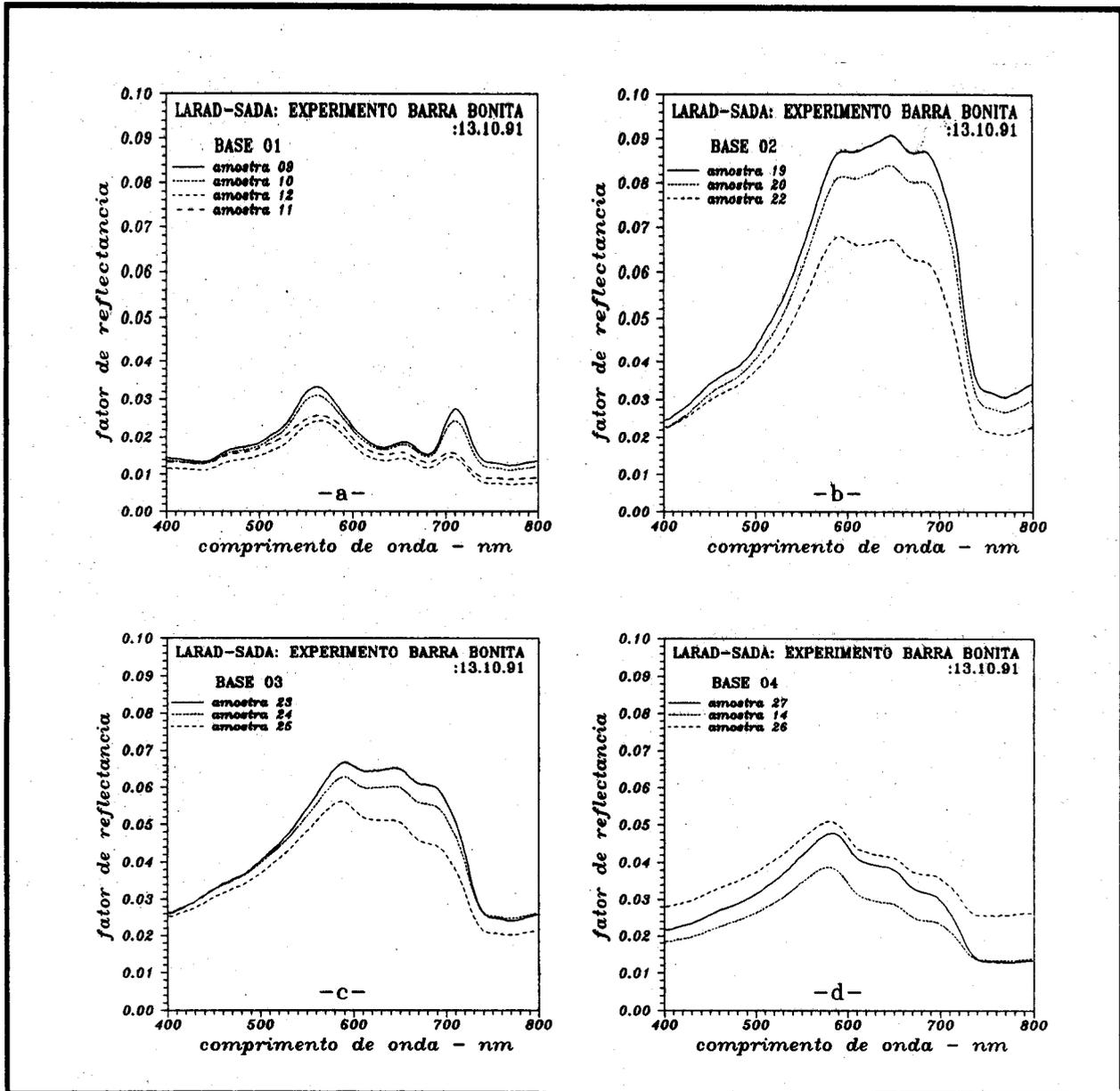


Figura 5. Fatores de reflectância das amostras

5. RESULTADOS PRELIMINARES

Através do "software" GRAPHER⁷, os fatores de reflectância bidirecional das amostras, contidos no arquivo BB02G1.DAT, foram plotados na Figura 5 fornecendo os conjuntos de espectros a, b, c e d (agrupados em relação as quatro estações amostrais). Uma análise pre-

baixa reflectância entre 400 e 800 nm (visível). Isto parece coerente com os valores relativamente altos determinados para a transparência dessa água através da profundidade Secchi⁸. O efeito da transparência da água sobre a baixa reflectância das amostras do rio Piracicaba é evidente na Figura 5a, onde os espectros das amostras 9 e 10 têm maior amplitude que os das amostras 11 e 12, o que mostra coerência com as

7 CENTRAL POINT SOFTWARE - USA

8 A profundidade Secchi indica a transparência da água

profundidades Secchi de 0,85cm e 1,70cm encontradas para esses pares de amostras, respectivamente. Outro aspecto notável nos espectros do braço do rio Piracicaba, é sua configuração; neles se observa uma diminuição do fator de reflectância na faixa do azul, com um pequeno traço de absorção em torno de 440nm correspondente a absorção da clorofila. A partir de 460nm o fator de reflectância aumenta até atingir um máximo em 560nm e um outro em torno de 720nm, regiões onde é também maior o coeficiente de espalhamento de algumas espécies de fitoplânctons (Yentsch, 1980). Neste braço do reservatório a concentração de clorofila variou de 31,03 ug/l na estação 11 a 88,50 ug/l na estação 10, indicando a provável influência das colônias de algas nos espectros obtidos pelo SADA.

A Figura 5b, referente à base 2, reúne os espectros do FRB das estações 19, 20 e 22, medidos no braço do rio Tietê. Pode-se observar que neste compartimento do reservatório, os fatores de reflectância espectral são mais elevados, o que pode ser explicado pela baixa transparência da água, como demonstram os valores obtidos para a profundidade Secchi (0,35cm a 0,45cm) dessas amostras. Os espectros obtidos no braço do rio Tietê mostram uma composição bastante diferente daquela apresentada pelo braço do rio Piracicaba. As amostras exibem um aumento do fator de reflectância espectral na faixa do vermelho, formando um patamar entre aproximadamente 580 nm e 700 nm. Esta configuração sugere a presença de elevadas concentrações de matéria inorgânica (MI) em suspensão (Novo et al. 1991), como foi confirmada pelos dados de campo. Para esta base, as concentrações de MI variaram de 10,84 mg/l na estação 19 a 7,46 mg/l na estação 22. Por outro lado, as baixas concentrações de clorofila encontradas nas amostras desta estação (2,52 ug/l a 4,49 ug/l) indicam que a matéria inorgânica tem um efeito dominante na composição do fator de reflectância espectral das amostras desta região.

A Figura 5c apresenta os fatores de reflectância bidirecional espectral das estações 23, 24 e 25 medidas ainda no braço do rio Tietê. A forma dos espectros é semelhante às da região anterior (base 2), entretanto os fatores de reflectância são em geral mais baixos devido ao aumento de transparência da água, cuja profundidade Secchi variou entre 45cm na estação 23 a 90cm na estação 25; este aumento de transparência é confirmado pela diminuição nas concentrações de matéria inorgânica cujos valores caem para 6,22 mg/l e 3,12 mg/l nessas estações.

A Figura 5d, apresenta os espectros dos fatores de reflectância bidirecional das estações amostrais 27, 26

e 14, situadas no corpo central do reservatório (base 4). É interessante notar que esses espectros apresentam características de transição entre os espectros das Figuras 5a a 5c. Em geral o fator de reflectância é baixo, o que pode ser atribuído à presença de maiores concentrações de clorofila, as quais variaram de 16,78 ug/l na estação 14 a 9,42 ug/l na estação 27. Esta maior concentração de clorofila explica também o máximo do fator de reflectância em torno de 570 nm e a sua redução na região do vermelho, que é devido à absorção dos pigmentos fotossintéticos.

6. CONCLUSÃO

O experimento Barra Bonita demonstrou que o Sistema de Aquisição de Dados Aerotransportado (SADA) tem um excelente desempenho operacional e pode ser utilizado com eficiência na medição radiométrica de alvos de interesse em Sensoriamento Remoto. O ajuste da altura de vôo, permite que as dimensões das áreas amostrais sejam ajustadas para a melhor compatibilidade com o campo de visada dos sistemas imageadores orbitais. Adicionalmente, o conjunto SADA/helicóptero apresentou uma elevada capacidade de amostragem, pois permitiu a aquisição de 39 espectros de reflectância dispersos na área do reservatório em pouco menos de 2 horas. Uma análise preliminar dos espectros obtidos com o SADA indica que, de modo geral, estes apresentam um aspecto coerente com o esperado para os tipos de água encontrados nas áreas de amostragem. Em alguns casos, as amplitudes espectrais parecem um pouco excessivas, provavelmente devido a inclusão de "glitter" no campo de visada do radiômetro, causado por instabilidades momentâneas do helicóptero; este fato parece ser confirmado quando se observa que os espectros de águas semelhantes apresentam o mesmo aspecto, embora deslocados em amplitude. Os processos de calibração e intercalibração não geraram nenhum tipo de distorção significativa nos espectros obtidos. Do ponto de vista operacional, o sistema SADA mostrou-se bastante eficiente, confiável e operacionalmente adequado para este tipo de operação radiométrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar a sua gratidão ao 11º Esquadrão da Base Aérea de Santos pela cessão do helicóptero UH-50/8767 e sua tripulação: Ten. Aviador Vanderlei A. Ribeiro, Ten. Aviador Alvaro L. Garotti e o Sgt. Mecânico Eldson de S. Tinoco, cuja dedicação e eficiência constituíram importante razão para o

sucesso da missão. Da mesma forma estendemos nossos agradecimentos pelo apoio recebido à CESP/UHE de Barra Bonita e ao Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo cujas equipes foram responsáveis pela coleta e análise dos parâmetros limnológicos das amostras de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Calijuri, M.C. Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização. (Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento). - Escola de Engenharia de São Carlos, Dez., 1988.

Novo, E.M.L.M.; Braga, C.Z.F. Relatório do Projeto "Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos". São José dos Campos, INPE, 1991a. (INPE-5271-PRP/159).

Novo, E.M.L.M.; Braga, C.Z.F. Use of TM data to estimate chlorophyll concentration and turbidity in Barra Bonita Reservoir. 24th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Rio de Janeiro, Maio, 1991b.

Novo, E.M.L.M.; Steffen, C.A.; Braga, C.Z.F. Results of a laboratory experiment on relating spectral reflectance to total suspended solids. Remote Sensing of Environment 36(1):67-72, Apr., 1991.

Steffen, C.A.; Nomogramas de altura solar. Revista Brasileira de Cartografia. (24):29-36, 1977. (INPE1083-PE/069-1977)

Steffen, C.A.; J.L.de Oliveira; F.F.Gama. O programa Espectro. São José dos Campos, INPE, 1992. (NT LARAD 01/92).

Yentsch, C.S; Light attenuation and phytoplankton photosynthesis. In: Morris, I. ed. The physiological Ecology of Phytoplankton. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1980.