

**ESTIMATIVA DOS PROCESSOS DE TROCA DE CO<sub>2</sub>, CALOR SENSÍVEL E VAPOR  
D'ÁGUA EM ESCALA REGIONAL ATRAVÉS DE AVIÃO.**

**REGIONAL SCALE ESTIMATES OF CO<sub>2</sub>, SENSIBLE HEAT, AND WATER  
VAPOR FLUXES THROUGH AIRCRAFT.**

Paulo Henrique Caramori<sup>1</sup>, Peter Huldrych Schuepp<sup>2</sup>, Raymond Louis Desjardins<sup>3</sup>, Ian MacPherson<sup>4</sup>

**RESUMO**

Um avião TWIN OTTER instrumentado foi utilizado para amostrar a camada limite atmosférica sobre diferentes ecossistemas, incluindo áreas cobertas por grama nativa (Projeto FIFE), áreas alagadas (Projeto WETLAND) e áreas agrícolas irrigadas intercaladas com áreas cobertas por vegetação morta ou solo nudo (Projeto CODE). Os fluxos de CO<sub>2</sub>, calor sensível e vapor d'água foram estimados através do método de correlação turbulenta e métodos de amostragem condicional foram utilizados para isolar “estruturas coerentes” de transporte. As análises dessas estruturas em geral mostraram que elas são semelhantes em termos de dimensão e intensidade sobre os três ecossistemas, sugerindo que as propriedades da camada limite estão exercendo um papel preponderante na organização do transporte. Baseado na hipótese de que sobre áreas úmidas com vegetação ativa deve haver maior quantidade de plumas de vapor d'água, e que sobre áreas secas e quentes, devem ocorrer mais plumas de calor sensível, a frequência dessas estruturas nos três ecossistemas foi correlacionada com a temperatura da superfície e índice de vegetação. Claras “assinaturas da superfície”, expressas por grupos de plumas, só foram observadas quando havia um pronunciado gradiente entre áreas secas sem vegetação e áreas úmidas com vegetação ativa. Os resultados obtidos ilustram os desafios existentes para o desenvolvimento de modelos que buscam a inversão de dados obtidos por sensoriamento remoto em informações com significado biofísico.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, método da correlação turbulenta, fluxo de CO<sub>2</sub>, fluxo de calor sensível, fluxo de vapor d'água.

---

<sup>1</sup> Eng. Agr., Ph.D., IAPAR, Caixa Postal 1331, Londrina - PR, CEP 86001-970.

<sup>2</sup> Físico, Ph.D., Professor of McGill University, Montreal, Canada.

<sup>3</sup> Físico, Ph.D., Agriculture Canada, Ottawa, Canada.

## SUMMARY

A TWIN OTTER instrumented aircraft has been used to probe the atmospheric boundary layer above different ecosystems, including grassland, wetland, and irrigated land interspersed with non-irrigated land. Fluxes of CO<sub>2</sub>, sensible heat and water vapor were estimated through the eddy correlation technique and conditional sampling methods were used to isolate the coherent structures that were carrying flux. The analyses of these coherent structures generally showed that they are similar in terms of their dimension and intensity above the different ecosystems, suggesting that the properties of the boundary layer are playing a major role on their organization. Based on the assumption that above moist, green areas should have higher frequencies of moisture plumes, and that above hot, dry areas more heat plumes should be detected, the frequencies of these structures were studied for the three ecosystems. Clear “surface signatures” of these plumes were only identified when there was a pronounced gradient between wet (green) and dry (bare soil or senescent vegetation) areas. The results illustrate the challenges in developing reliable models for inverting remote sensing data to meaningful biophysical information.

**Key words:** remote sensing, airborne fluxes, eddy correlation technique, CO<sub>2</sub> flux, sensible heat flux, water vapor flux.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem havido grande ênfase no estudo de modelos regionais ou globais para estimativa de balanços de massa e energia. Esta tendência se deu em parte devido à crescente preocupação com a emissão de gases que provocam o efeito estufa e seus efeitos como agentes de mudanças climáticas, e em parte devido à constatação da necessidade de um melhor entendimento da ligação entre a atmosfera e a biosfera em modelos de circulação global (GCM). Em particular, as condições de contorno para energia e massa na interface superfície-atmosfera para uso nos GCMs precisa ser melhor definida.

Diversas tentativas foram feitas nos últimos anos para avaliar estimativas de fluxos em escala regional, utilizando informações obtidas através de aviões ou satélites (SOER, 1980; PRICE, 1982; NIEUWENHUIS et al. 1985; TACONET et al. 1987; SCHUEPP et al. 1987; DESJARDINS et al. 1988; MACK et al. 1990; CIHLAR et al. 1992). Pode-se afirmar que os satélites são vistos como uma ferramenta importante para o monitoramento das características ambientais em larga escala, enquanto que aeronaves instrumentadas são consideradas as plataformas mais adequadas para a coleta de informação para verificação de modelos

---

<sup>4</sup> Eng. Mec., Ph.D., Institute for Aerospace Research, Ottawa, Canada.

baseados em dados de satélite.

Aviões instrumentados têm a vantagem de possibilitar a amostragem da atmosfera numa larga faixa de escalas, desde a local (da ordem de km) até regional (até algumas centenas de km), proporcionando informações sobre a variação espacial das estimativas de fluxos. Embora a disponibilidade de sensores acurados e de rápida resposta torne possível a realização de medidas confiáveis, a sua interpretação e a conexão com as características da superfície ainda carecem de um melhor entendimento. Dentro dessa preocupação, no presente trabalho, buscou-se estudar a relação entre fluxos medidos na camada limite atmosférica em diferentes ecossistemas e sua ligação com propriedades da superfície terrestre.

## MATERIAL E MÉTODOS

Os dados analisados neste trabalho fazem parte de três experimentos internacionais realizados em épocas distintas: FIFE (SELLERS et al., 1988), durante a campanha intensiva realizada no verão de 1989; Canadian Northern Wetland Study (WETLAND), durante o verão de 1990; e Califórnia Ozone Deposition Study (CODE), durante o verão de 1991. A cobertura do solo sobre os três locais era composta de: a) FIFE - grama nativa de porte alto; b) WETLAND - áreas alagadas, intercalando-se lagos com vegetação de floresta temperada; c) CODE - área de deserto, intercalando-se áreas agrícolas irrigadas com áreas de vegetação morta ou solo nú.

A plataforma utilizada para a coleta dos dados foi um avião Twin Otter pertencente ao National Research Council do Canadá. Esta aeronave está equipada para medir diversos parâmetros na camada limite atmosférica, dentre os quais os seguintes, utilizados no presente estudo:

a) Velocidade do vento - Os componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  do vento são medidos através de um mastro instalado no nariz do avião, que amostra o ar a uma distância de 3,5m à frente do corpo da aeronave.

b) Temperatura do ar - É medida através de um sensor Rosemount instalado no nariz do avião.

b) Temperatura de superfície - É medida através de um termo-radiômetro PRT-5 instalado na parte externa do bojo do avião, voltado para a superfície terrestre.

c) Índice de vegetação - É estimado através de um sensor que também é instalado na parte externa do bojo do avião, o qual fornece a razão entre as quantidades de energia refletidas pela superfície terrestre nas faixas do infravermelho próximo e vermelho.

d) Concentração de  $\text{CO}_2$  e vapor d'água - São medidas através de um analisador de infravermelho de rápida resposta instalado no interior do avião.

Informações detalhadas sobre a aeronave, instrumental de medidas e processamento dos dados são fornecidas em MACPHERSON (1988 e 1992).

Os vôos foram realizados a uma velocidade constante de  $60 \text{ m.s}^{-1}$ . As alturas de vôo variaram para cada

local, sendo de 30, 60 e 100 m no projeto CODE, 100, 200, 450 e 800 m no projeto FIFE, e 40, 100, 240 e 780 m no projeto WETLAND. Os dados foram digitalizados em um computador de bordo a uma frequência de 16 Hz, fornecendo uma resolução espacial de 3.7 m por cada ponto de observação. As condições de estabilidade variaram de moderadamente instável a instável, com valores de  $z/L$  ( $z$  = altura de vôo,  $L$  = comprimento de Obukhov) oscilando entre -0,04 e -6,72 (CARAMORI, 1992).

Cada seqüência de vôo de aproximadamente 15 km de comprimento constituiu uma série temporal individual para fins de análise. Após eliminar a tendência linear de cada série temporal, os fluxos ( $F$ ) foram estimados através do método da correlação turbulenta, em que:

$$F = \overline{w'q'}$$

onde:  $w'$  é a flutuação da componente vertical do vento em relação à média de cada série temporal, e  $q'$ , a flutuação da propriedade analisada ( $CO_2$ , temperatura ou vapor d'água). A barra horizontal representa a média das flutuações ao longo de cada vôo.

Através da análise de quadrantes (ANTONIA, 1981; SHAW, 1985; GRANT et al., 1986) cada ponto de medida  $w'q'$  foi alocado em um dos quatro possíveis quadrantes de transporte: 1)  $w^{(+)}q^{(+)}$  = excesso para cima; 2)  $w^{(-)}q^{(+)}$  = excesso para baixo; 3)  $w^{(-)}q^{(-)}$  = déficit para baixo; 4)  $w^{(+)}q^{(-)}$  = déficit para cima.

As seqüências de pelo menos 8 pontos  $w'q'$  consecutivos alocados em um mesmo quadrante, correspondendo a estruturas com diâmetro mínimo de 30 m, foram denominadas “estruturas coerentes” de transporte. Analisou-se o diâmetro médio destas estruturas sobre os diferentes ecossistemas e a sua evolução com a altura. As ocorrências de estruturas coerentes do quadrante **excesso para cima**, que representam as plumas emergentes de calor sensível e vapor d'água, foram plotadas ao longo de cada segmento de vôo juntamente com os registros de temperatura de superfície e índice de vegetação, com o objetivo de detectar as áreas geradoras destas estruturas ao nível da superfície.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 ilustra a aplicação do método de correlação turbulenta ao longo de um segmento de vôo. Pode-se observar que quando existe uma boa correlação entre o movimento vertical do vento e a propriedade analisada, o resultado do produto destas covariâncias é expresso através de uma contribuição significativa para o fluxo. Por outro lado, se uma incursão vertical positiva do vento não é acompanhada de excesso da propriedade, ou se um movimento descendente não traz consigo déficit da propriedade, a contribuição para o fluxo é pequena.

Na Figura 2 são apresentados dados referentes a um segmento de vôo, ilustrando a ocorrência dos quatro quadrantes de transporte para CO<sub>2</sub> e vapor d'água. Com relação ao vapor d'água, verifica-se que existe a predominância dos quadrantes **excesso para cima** e **déficit para baixo**, uma vez que durante o dia, sob condições de instabilidade, a superfície terrestre constitui uma fonte de vapor d'água. Assim, quando ocorre o deslocamento vertical de uma parcela de ar úmido (**excesso para cima**), esta é substituída por ar mais frio e seco proveniente das camadas mais elevadas da atmosfera terrestre (**déficit para baixo**). Este dois módulos representam contribuições positivas para o fluxo, enquanto que as modalidades **excesso para baixo** e **déficit para cima** representam transporte de vapor d'água contra o gradiente, através de incursões momentâneas de menor intensidade verificadas durante a ocorrência de eventos turbulentos. Situação semelhante ocorre para o transporte de calor sensível, uma vez que a superfície é também uma fonte de calor durante o dia.

No caso do CO<sub>2</sub> verifica-se exatamente o contrário, porque durante o dia a superfície é um sumidouro de gás carbônico, utilizado no processo de fotossíntese. Assim, predominam os quadrantes **déficit para cima** e **excesso para baixo**, enquanto que os quadrantes **excesso para cima** e **déficit para baixo** representam o transporte contra o gradiente. No caso do vapor d'água observa-se a assimetria do quadrante **excesso para cima** enquanto que para CO<sub>2</sub> destaca-se o quadrante **déficit para cima**, mostrando que os eventos mais extremos ocorrem nestes quadrantes.

As contribuições percentuais dos quatro quadrantes de transporte para o fluxo total de CO<sub>2</sub>, calor sensível e vapor d'água, sobre o projeto FIFE, são apresentadas na Tabela 1. Estes dados mostram que, em média, durante o processo turbulento, o quadrante **excesso para cima** responde por cerca de 50% do transporte de calor sensível e 40% de vapor d'água, enquanto que o quadrante **déficit para baixo** responde por cerca de 30% em ambos os casos. Já para o CO<sub>2</sub> predomina o quadrante **déficit para cima** com cerca de 50%, seguido de **excesso para baixo** com cerca de 30%.

**Tabela 1 - Contribuição percentual dos quatro quadrantes de transporte para o fluxo total. Projeto FIFE, campanha intensiva realizada no verão de 1989. (\*)**

QUADRANTE	CO <sub>2</sub>	CALOR SENSÍVEL	VAPOR D'ÁGUA
Excesso para cima	8,4 (2,2)	51,2 (6,5)	40,9 (3,7)
Excesso para baixo	31,0 (1,9)	9,7 (4,7)	13,4 (2,3)
Déficit para baixo	6,7 (1,5)	31,5 (2,5)	32,7 (2,3)
Déficit para cima	53,9 (4,2)	7,6 (1,9)	13,0 (2,4)

(\*) Os dados foram obtidos a partir da contabilização de 10 vôos realizados sobre a área do projeto FIFE, a uma altura média de 100 m. Os valores entre parênteses representam os respectivos desvios padrão.

Foram detectadas estruturas turbulentas individuais com diâmetro variando desde 30 m até 800 m. Os diâmetros médios dessas estruturas em função da altura, sobre as áreas dos projetos FIFE e WETLAND, são apresentados na Figura 3. Observou-se uma taxa de incremento mais acentuada nos primeiros 300 m de altura, com tendência de estabilização e decréscimo, devido ao processo de desorganização das estruturas em maiores altitudes (estas informações não foram apresentadas para o projeto CODE devido à inexistência de dados acima de 100 m de altitude). Conforme se pode observar na Figura 4, o número de estruturas decresceu rapidamente com a altura, devido à reorganização que ocorreu, onde algumas se juntaram e outras se dissiparam. Tais resultados evidenciam que para se ter melhor informação sobre o local de origem destas estruturas junto à superfície, é necessário realizar medições preferencialmente dentro da camada limite superficial. Observou-se ainda que apesar das condições de superfície serem radicalmente diferentes nos três casos, as estruturas encontradas apresentam grande semelhança, sugerindo que as propriedades da camada limite atmosférica exercem um importante papel na organização do transporte.

Análises de correspondência entre os valores de índice de vegetação, temperatura de superfície e ocorrência de plumas de calor sensível e vapor d'água, sobre áreas cobertas por grama (Projeto FIFE) e áreas irrigadas intercaladas com áreas não irrigadas (Projeto CODE), são ilustradas nas Figuras 5 e 6.

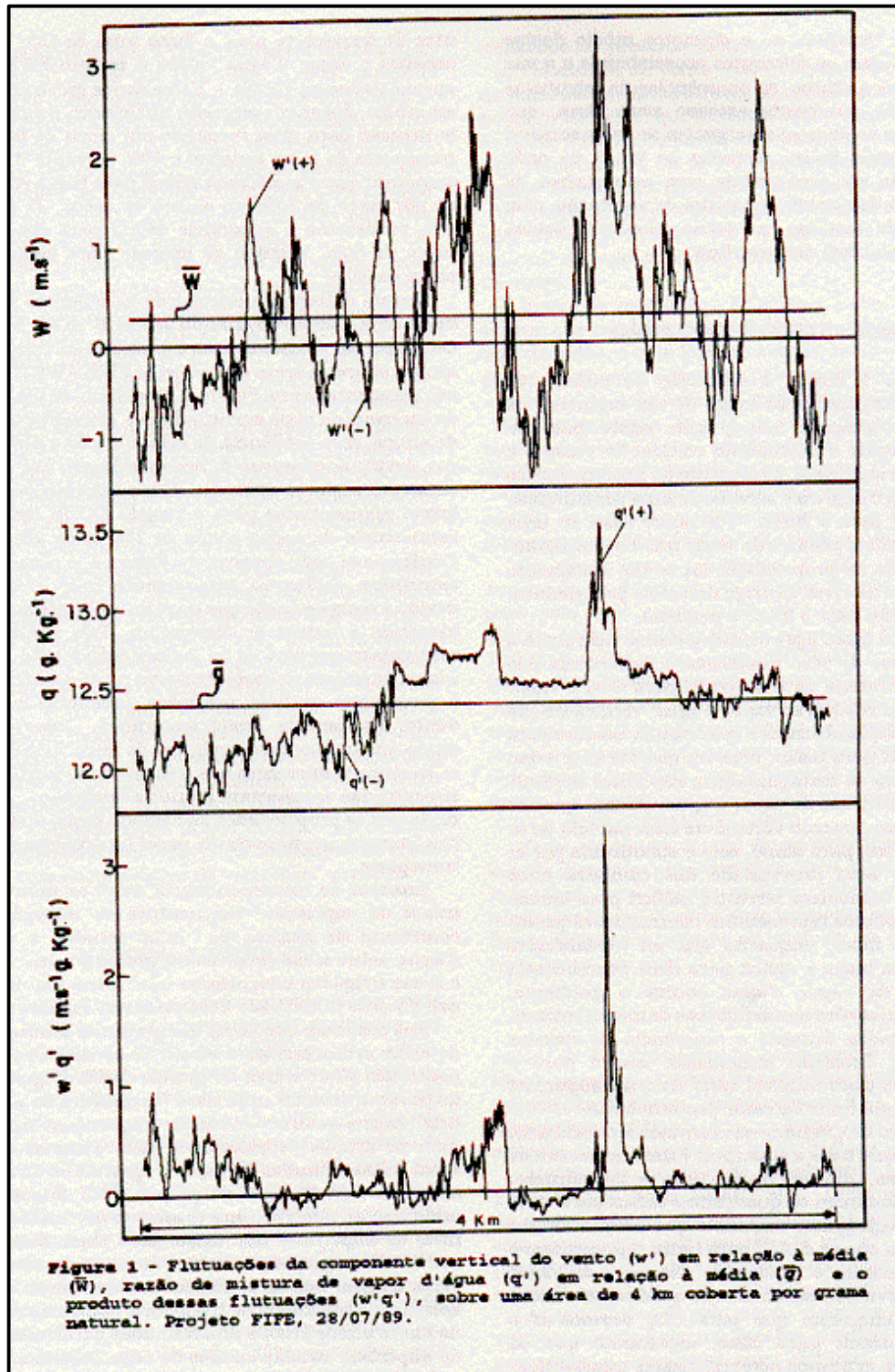
Nos casos em que havia um gradiente pronunciado entre áreas úmidas e secas, como nas medições realizadas sobre a área do projeto CODE (Figura 5), foi possível detectar uma clara “assinatura da superfície”, expressa através de maior frequência e intensidade de grupos de plumas de calor sensível sobre áreas secas e plumas de vapor d'água sobre as áreas irrigadas. Já no caso do projeto FIFE (Figura 6), onde não se observou um gradiente pronunciado a nível de superfície, não existe uma clara definição acerca da origem das plumas de calor sensível ou vapor d'água. Sob tal condição, torna-se muito difícil associar os processos de transporte dentro da camada limite atmosférica a determinadas características da superfície obtidas através de sensoriamento remoto.

A intermitência dos processos de transferência na interface superfície-atmosfera é uma característica que dificulta a associação de fluxos medidos na camada limite com a fonte geradora localizada na superfície. Em geral, observa-se que eventos que ocorrem cerca de 20% do tempo chegam a contribuir com até 80% do fluxo (DUNCAN et al., 1989). CIHLAR et al. (1992), tentando associar medidas de fluxo de CO<sub>2</sub> obtidas por avião com índice de vegetação, observaram um considerável espalhamento dos dados, o qual foi atribuído principalmente ao problema da intermitência de transporte. Para se ter uma amostragem estatisticamente representativa do transporte ocorrido a partir da superfície, AUSTIN et al. (1987) concluíram que são necessários pelo menos 8 vôos consecutivos sobre a mesma área. Além disso, existe ainda o problema do “fooprint” ou “fetch”, ou seja, a detecção da área de origem de uma determi-

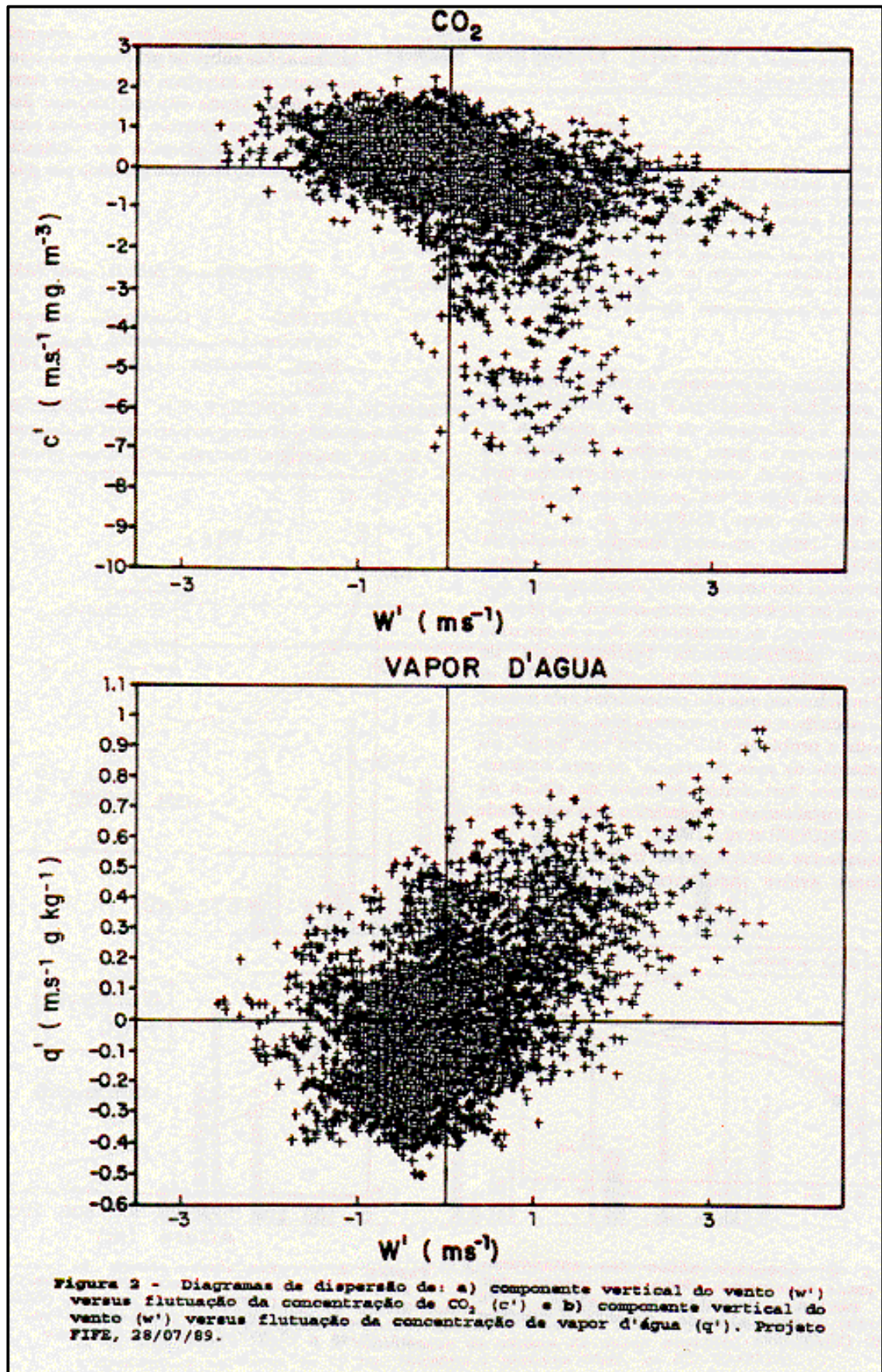


nada estrutura turbulenta depende da altura de medição, da estabilidade atmosférica e da velocidade do vento (SCHUEPP et al., 1992).

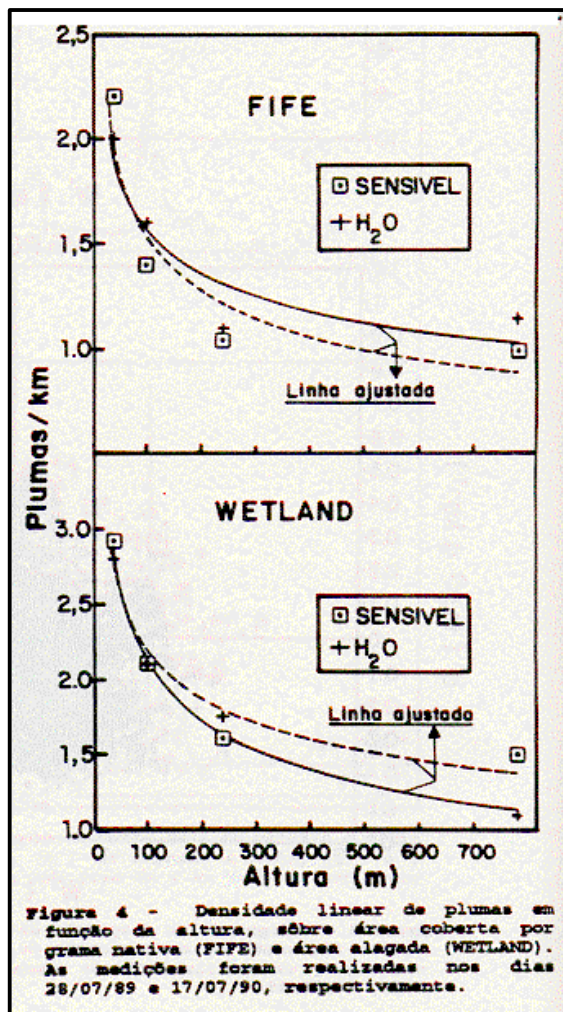
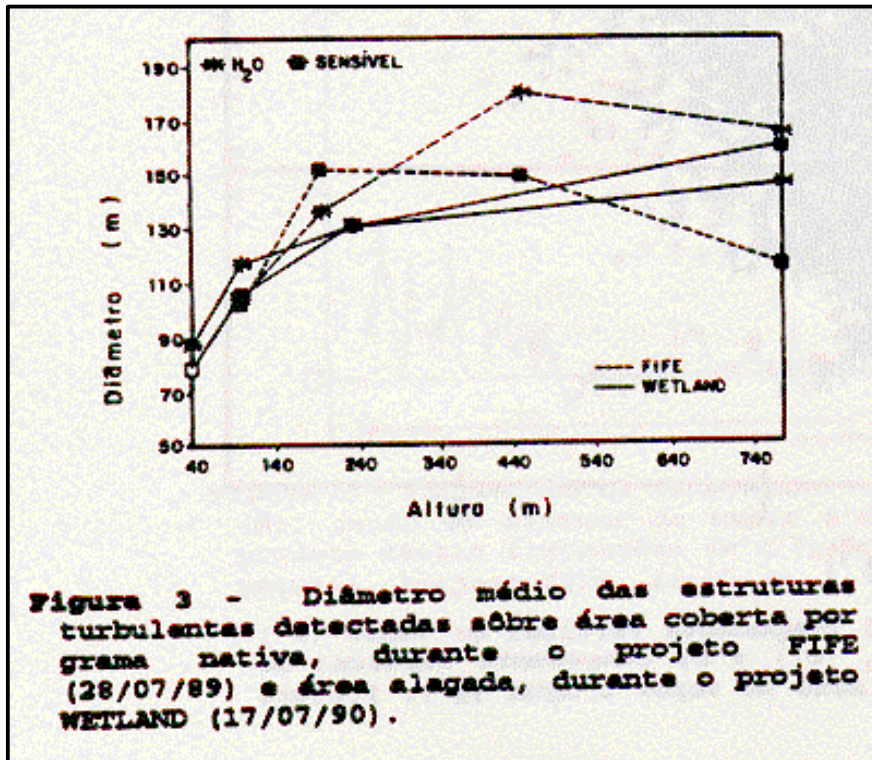
Os resultados obtidos neste trabalho mostram que embora aviões instrumentados sejam uma ferramenta poderosa para a obtenção de informações sobre os processos de troca que ocorrem na interface superfície terrestre-atmosfera, ainda existem muitos desafios metodológicos a serem superados para que as informações possam ser utilizadas na verificação de modelos gerados por dados de satélites.



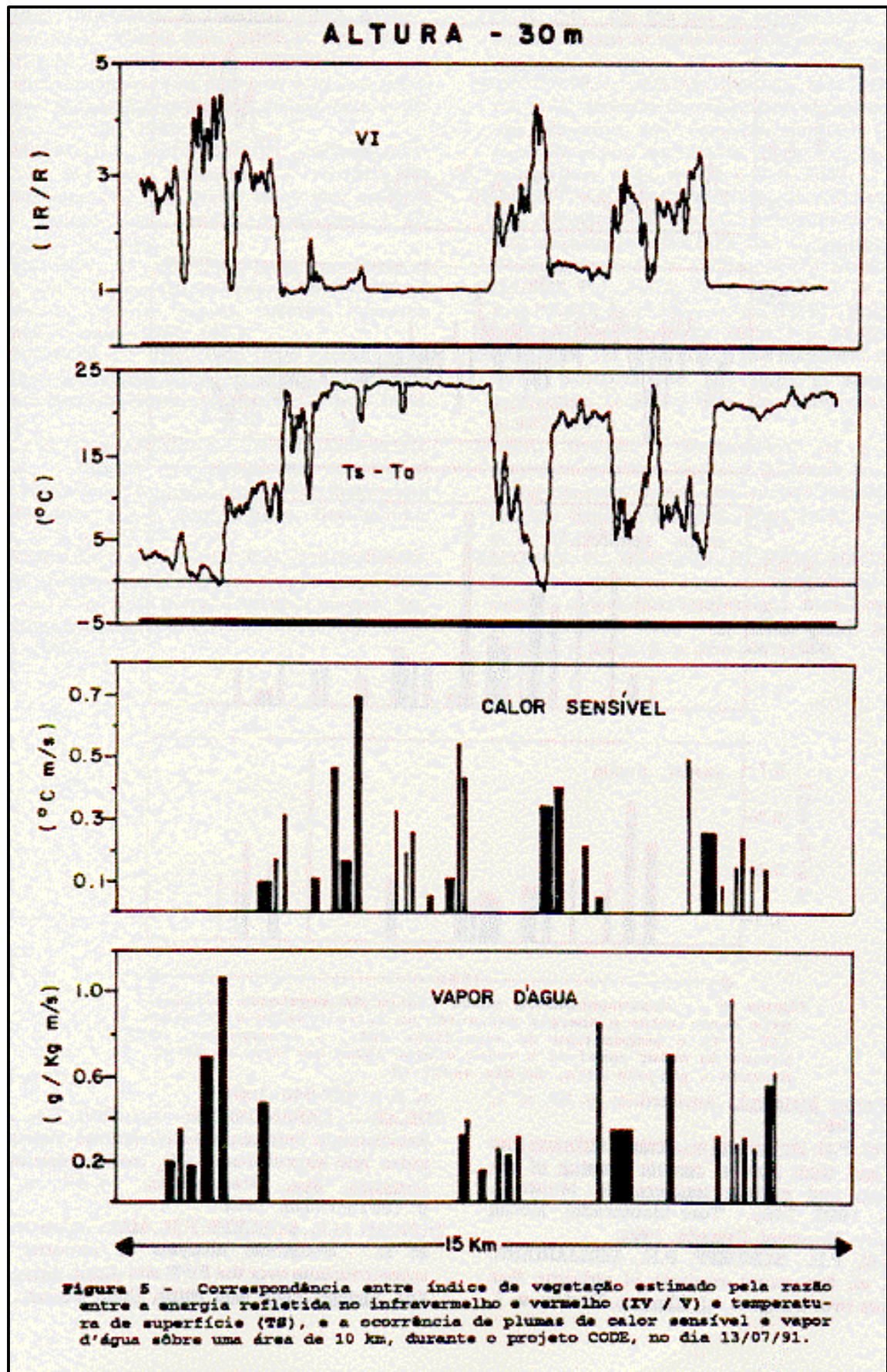




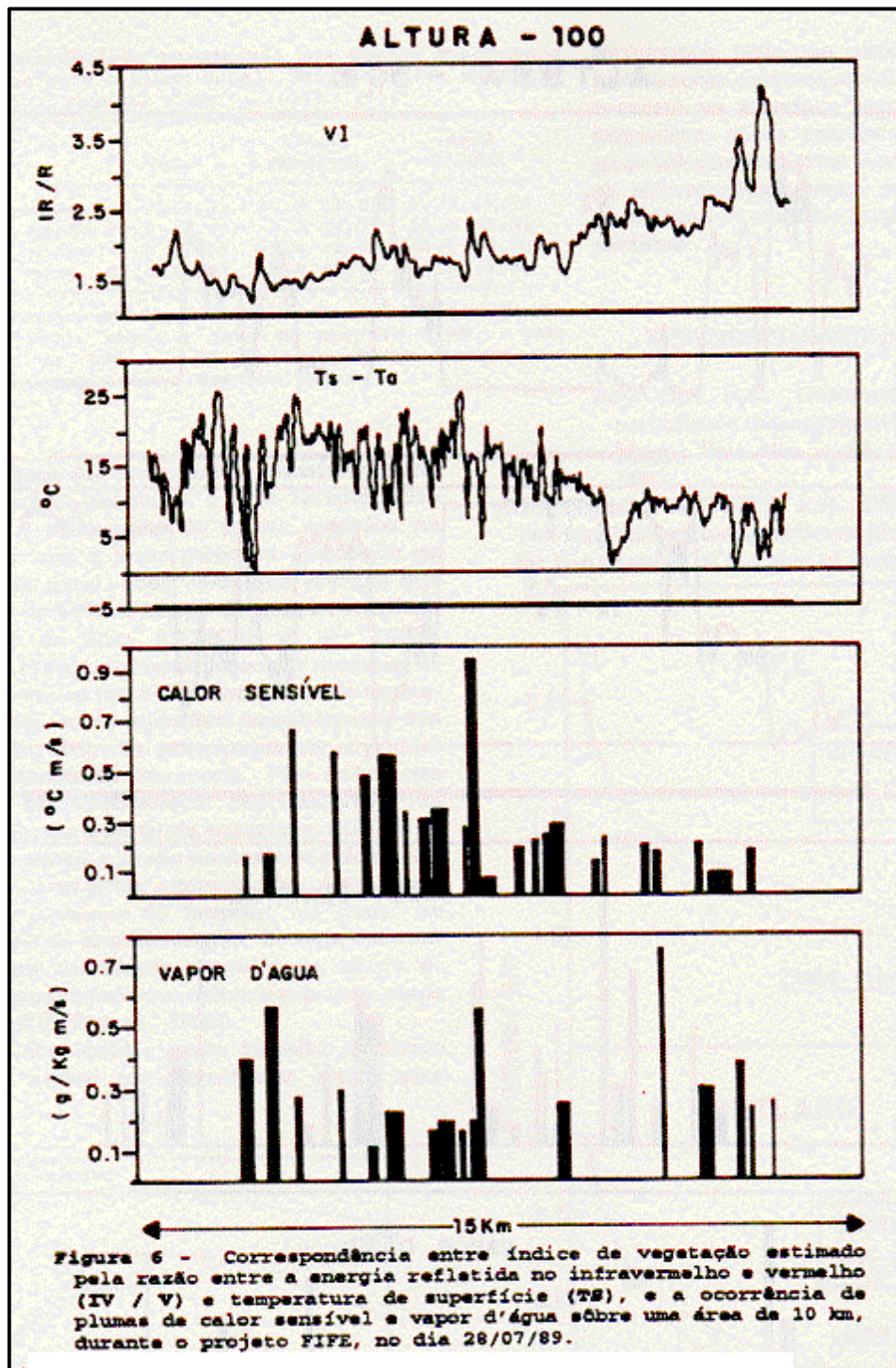












## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONIA, R.A. Conditional sampling in turbulence measurement. *Ann. Rev. Flui. Mech.*, Palo Alto, v. 13, n. 1, p. 131-156, 1981.
- AUSTIN, L.B., SCHUEPP, P.H., DESJARDINS, R.L. The feasibility of using airborne flux measurements for the imaging of the rate of biomass production.

Agric. Forest Meteorol., Amsterdam, v. 39, n. 1, p. 13-23, 1987.

CARAMORI, P.H. **Structural analysis of airborne flux traces and their link to remote sensing of the vegetation and surface temperature**. Montreal, Canada, 1992, 149p. Tese (doutorado), McGill University, Montreal, Canada, 1992.

CARAMORI, P.H., SCHUEPP, P.H., DESJARDINS, R.L. et al. Structural analysis of airborne flux estimates over a region. J. Climate, Boston, v. 7, n. 5, p. 627-640, 1994.

CIHLAR, J., CARAMORI, P.H., SCHUEPP, P.H. et al. Relationship between satellite-derived vegetation index and aircraft-based CO<sub>2</sub> measurements. J. Geophys. Res., Washington, v. 97, n. d17, p. 18515-18522, 1992.

DUNCAN, M.R., SCHUEPP, P.H., MACPHERSON, J.I. et al. Statistical analysis of airborne flux measurements over the FIFE site. Conf. Agric. and For. Meteor., 19th, and Ninth Conf. Biomet. and Aerobiol., Charleston, S. Carolina, 1989. Anais..., Boston: Amer. Meteor. Soc., 1989. P. 129-130.

GRANT, R.H., BERTOLIN, G.E., HERRINGTON, L.P. The intermittent vertical flux over a spruce forest canopy. Bound.-Layer Meteor., Amsterdam, v. 35, n. 2, p. 317-330, 1986.

DESJARDINS, R.L., MACPHERSON, J.I., SCHUEPP, P.H. et al. An evaluation of aircraft flux measurements of CO<sub>2</sub>, water vapor and sensible heat. Bound.-Layer Meteor., Amsterdam, v. 47, n. 1, p. 55-70, 1988.

MACPHERSON, J.I. NAE Twin Otter operations in FIFE. Ottawa: National Aeronautic Establishment Laboratory Technical Report, National Research Council, Canada, 1988. 148 p.

MACPHERSON, J.I. NRC Twin Otter operations in the 1991 California Ozone Deposition Experiment. Ottawa: National Research Council, Canada, 1992. 213 p.

MACK, A.R., DESJARDINS, R.L., MACPHERSON, J.I. et al. Relative photosynthetic activity of agricultural lands from airborne carbon dioxide and satellite data. Int. J. Remote Sens., Basingstoke, v. 11, n. 2, p. 237-251, 1990.

NIUWENHUIS, G.J.A., SMIDT, E.H., THUNNISSEN, H.A.M. Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images. Int. J. Remote Sensing, Basingstoke, v. 6, n. 8, p. 1319-1344, 1985.

PRICE, J.C. On the use of satellite data to infer surface fluxes at meteorological scales. J. Appl. Meteorol., Boston, v. 21, n. 8, p. 1111-1122, 1982.

SCHUEPP, P.H., DESJARDINS, R.L., MACPHERSON, J.I. et al. Airborne determination of regional water use efficiency and evapotranspiration: present capabilities and initial tests. Agric. For. Meteorol., Amsterdam, v. 41, n. 1-2, p. 1-9, 1987.

SCHUEPP, P.H., MACPHERSON, J.I., DESJARDINS, R.L. Adjustment of footprint correction for airborne flux mapping over the FIFE site. J. Geophys. Res., Washington, v. 97, n. D17, p. 18455-18466,



1992.

SELLERS, P.J., HALL, F.G., ASRAR, G. et al. The first ISLSCP Field Experiment (FIFE). Bull. Amer. Meteorol. Soc., Boston, v. 69, n. 1, p. 22-27, 1988.

SHAW, R.H. On the diffusive and dispersive fluxes in forest canopies. **In:** The forest - atmosphere interaction, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 1985. p. 407-419.

SOER, G.J.R. Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. Remote Sensing Environ., New York, v. 9, n. 1, p. 27-45, 1980.

TACONET, O., BERNARD, R., VIDAL-MADJAR, D. Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA/AVHRR data. J. Clim. Appl. Meteor., Boston, v. 25, n. 2, p. 284-307, 1986.