

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

**FLUXOS TURBULENTOS DE CO₂ EM UMA
ÁREA DE ARROZ IRRIGADO NO RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Janaína Viário Carneiro

**Santa Maria, RS, Brasil
2007**

FLUXOS TURBULENTOS DE CO₂ EM UMA ÁREA DE ARROZ IRRIGADO NO RS

por

Janaína Viário Carneiro

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Física, Áreas Clássicas da Fenomenologia e suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Física.**

Orientador: Prof. Osvaldo Luiz Leal de Moraes, Dr.

Santa Maria, RS, Brasil

2007

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-Graduação em Física**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a dissertação de Mestrado

**FLUXOS TURBULENTOS DE CO₂ EM UMA
ÁREA DE ARROZ IRRIGADO NO RS**

elaborada por
Janáina Viário Carneiro

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes
(Presidente/Orientador)**

Prof^a. Dr^a. Denise Cybis Fontana (UFRGS)

Prof. Dr. Gervásio Annes Degrazia (UFSM)

Santa Maria, 28 de novembro de 2007.

*Aprender é a única coisa
de que a mente nunca se cansa,
nunca tem medo
e nunca se arrepende.”
(Leonardo da Vinci)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial, ao Prof. Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes, pela orientação, pela oportunidade de compartilhar da sua experiência profissional e também pela amizade.

Ao Prof. Otávio Costa Acevedo, pelo auxílio em muitos momentos do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Hans, Roberto e Cláudio, pela amizade, pela atenção despendida e pelos ensinamentos.

Aos colegas do Lumet, pelo companheirismo e pela amizade.

À minha amiga, Jaqueline, que muitas vezes ouvia-me e aconselhava-me.

Aos meus queridos pais e irmãos, pelas palavras de incentivo, pela dedicação e pelo amor, "Jamais esqueçam que levarei para sempre um pedaço de vocês dentro do meu ser!"

Ao meu amor, Robinson, por acreditar e torcer pelo meu sucesso, mesmo nos momentos em que de alguma maneira estive ausente.

Aos meus amigos e àquelas pessoas que estiveram presentes em minha vida de alguma maneira, não presentes nesta lista, muito obrigada!

Aos funcionários do PPGFIS pelo apoio e disponibilidade. E a todos os professores que auxiliaram na minha formação.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

A Deus.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Física
Universidade Federal de Santa Maria

FLUXOS TURBULENTOS DE CO₂ EM UMA ÁREA DE ARROZ IRRIGADO NO RS

Autora: Janaína Viário Carneiro

Orientador: Osvaldo Luiz Leal de Moraes

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 28 de novembro de 2007.

Este trabalho quantifica a troca líquida de CO₂ (NEE) em uma área de cultivo de arroz irrigado no RS, como parte do projeto CT-HIDRO, projeto este que tem como finalidade descrever condições de superfície para diferentes ecossistemas do país. Os dados utilizados foram coletados durante o período de cultivo, entre outubro de 2003 e março de 2004. Neste período a temperatura média do ar e a radiação incidente são adequadas para o desenvolvimento da cultura nesta região. Os fluxos turbulentos, calculados pelo método de covariância de vórtices (*eddy covariance*), superestimaram o valor da NEE, provavelmente devido, a subestimativa da taxa de respiração, pois em alguns períodos noturnos os sensores registraram pouca turbulência. Além disso, outro fator que pode interferir no resultado dos fluxos, como por exemplo, o intervalo em que os fluxos são calculados. Foi aplicada a correção de Webb na curva de NEE e encontrou-se um valor menor que 1%, fato este que não modificou significativamente o resultado encontrado. O comportamento do fluxo de CO₂ durante todo o período analisado, mostrou um pico de $-0,47\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, em janeiro de 2004, o que demonstra a maior captura de CO₂ da atmosfera pela planta durante o dia e uma menor liberação à noite, devido a fase de desenvolvimento em que a planta se encontra. Neste caso, a correção de Webb também foi pouco acentuada, não interferindo no resultado obtido. As curvas que demonstram as três fases de desenvolvimento do arroz mostraram claramente uma maior absorção de CO₂ durante a fase reprodutiva. O comportamento do fluxo de CO₂ mostra um fluxo negativo durante à dia, quando a planta absorve CO₂ da atmosfera e um fluxo positivo durante à noite quando ocorre o processo inverso, o que era esperado. O fluxo de calor latente apresentou maiores valores médios diários entre os meses de janeiro e fevereiro, apresentando sempre valores positivos, consequência da irrigação do campo de arroz. Obtivemos dois dias com valores elevados de fluxo de calor latente, o que fez com que analisássemos o balanço de energia. O fechamento do balanço de energia não foi alcançado em ambos os dias. Uma possível razão para isto pode ser o devido à subestimativa dos fluxos quando aplicado o método de covariância de vórtices.

Palavras-chave: covariância de vórtices; fluxos turbulentos, fotossíntese.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Física
Universidade Federal de Santa Maria

TURBULENT FLOWS OF CO₂ IN A RICE CROP IRRIGATED IN RS (BRAZIL)

Author: Janaína Viário Carneiro

Adviser: Osvaldo Luiz Leal de Moraes

Place and Date of Defense: Santa Maria, November 28th, 2007

This thesis quantifies the net change of CO₂ (NEE) in an irrigated rice crop cultivation in RS (Brazil). The research is part of the project CT-HIDRO, which presents as main purpose the description of surface conditions for different ecosystems in the country. Data were gathered during the cultivation period, from October 2003 to March 2004. During this time, the average air temperature and the incident radiation were suitable for the development of the culture in such an area. The turbulent flows, calculated by the eddy covariance method, overestimated the NEE value, probably due to the low estimate of breathing tax, because, during some night-times, sensor registered little turbulence. Moreover, other factor could have interfered in the result of the flows, for instance, the time in which the flows are calculated. The Webb correction was applied in the curve of NEE, and a value smaller than 1% was found. Such result didn't modify the previous result significantly. The behavior of CO₂ flow during the whole analyzed period showed a maximum of $-0,47\text{mgCO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ in January 2004, what demonstrates the largest absorption of CO₂ from the atmosphere by the plant during the day and a smaller liberation at night, due to the development phase in which the plant is. In this case, the Webb correction was also little emphasized, not interfering in the obtained result. The curves that demonstrate the three phases of development of the rice presented a larger absorption of CO₂ during the reproductive phase. The behavior of the flow of CO₂ showed a negative flow during the day, when the plant absorbs CO₂ from the atmosphere, and a positive flow during the night, when the inverse process occurs, what was waited for. The latent heat flow presented larger diary average values from January to February, always with positive values, consequence of the rice crop irrigation. Two days with high values of flow of latent heat were obtained, what motivated the analysis of the energy balance. The closing of the energy balance was not reached in both days. A possible reason for that could be the low estimate of flows when the eddy covariance method was applied.

Keywords: Eddy covariance method, turbulent flows, photosynthesis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de fotossíntese (Fonte: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada - CEPA/USP).....	16
Figura 2 - Localização de áreas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. A Região do Litoral e da Zona Sul não aparecem destacadas no mapa (Fonte: Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia CEPSRM/UFRGS).....	24
Figura 3 - Localização do município de Paraíso do Sul.....	26
Figura 4 - Torre de observação utilizada nas medidas na cultura de arroz em Paraíso do Sul.....	26
Figura 5 - Sistema de covariância de vórtices (eddy covariance): anemômetro sônico e analisador de gás de caminho aberto.....	27
Figura 6 - Médias diárias do período de cultivo do arroz que compreende outubro de 2003 a março de 2004. (a) temperatura do ar, (b) radiação solar incidente	34
Figura 7 - Curva acumulativa da troca líquida no ecossistema durante o período de cultivo do arroz.....	36
Figura 8 - Médias diárias do fluxo de CO ₂ durante o período de cultivo do arroz. Os triângulos (vermelho) representam o fluxo de CO ₂ e os círculos (preto) os fluxos de CO ₂ com a correção de Webb	38
Figura 9 - Variações diárias do fluxo de CO ₂ sem correção de Webb (triângulos pretos) e com correção de Webb (círculos vermelhos) (a) e da temperatura (b) em diferentes fases do cultivo do arroz	39
Figura 10 – Variações diárias do fluxo de CO ₂ sem correção de Webb (triângulos pretos) e com correção de Webb (círculos vermelhos) (c) e da temperatura (d) na fase reprodutiva da cultura do arroz.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 11 – Variações diárias do fluxo de CO ₂ sem correção de Webb (triângulos pretos) e com correção de Webb (círculos vermelhos) (e) e da temperatura (f) na fase de maturação da cultura do arroz.....	40
Figura 12 – Comportamento do fluxo de CO ₂ e da velocidade de fricção (u^*) para o dia DJ323_2003(a).....	42
Figura 13 – Comportamento do fluxo de CO ₂ e da velocidade de fricção (u^*) para o dia DJ 326_2003(b).....	43
Figura 14 - Médias diárias dos fluxos de calor sensível (a) e calor latente (b) para o período analisado.	44
Figura15 - Fluxos de energia para DJ28_2004. a) componentes do balanço de energia, b) fechamento do balanço de energia	47
Figura 16 - Fluxos de energia para DJ49_2004. a) componentes do balanço de energia, b) fechamento do balanço de energia	48
Figura 17 – Ilustração dos sensores no presente estudo (a) e para estudos futuros (b).....	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 Dióxido de carbono.....	13
2.2 Fotossíntese-respiração.....	14
2.3 Efeito estufa.....	16
2.4 Camada limite.....	19
2.5 Avaliação do método de covariância de vórtices.....	21
2.6 A planta de arroz.....	22
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 Descrição do sítio experimental e coleta de dados.....	25
3.2 Análise dos dados experimentais.....	27
3.3 Cálculo dos fluxos turbulentos.....	29
3.4 Troca líquida de CO ₂ no ecossistema.....	31
3.5 Correção de Webb.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 Elementos meteorológicos	33
4.2 Fluxos de dióxido de carbono.....	35
4.2.1 Troca líquida no ecossistema (NEE).....	35
4.2.2 Fluxos de CO ₂	37
4.2.3 Fluxos diários de CO ₂	38
4.2.4 Fluxos de CO ₂ e u*.....	41
4.3 Balanço de energia.....	43
5 CONCLUSÕES.....	49
6 TRABALHOS FUTUROS.....	51
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O arroz é uma importante mercadoria na economia dos países latino americanos e contribui com cerca de US\$ 5 bilhões anualmente para a economia agrícola da região sul do Brasil. A produção desse cereal no país é originária, principalmente, das lavouras irrigadas do Rio Grande do Sul (RS) e de Santa Catarina (SC) que, em conjunto, respondem por quase 60% da produção nacional, sendo que somente o RS contribui com cerca de 50%. A produtividade de arroz irrigado nas últimas décadas tem trajetória ascendente no RS. O arroz ocupa 1/3 da safra mundial de cereais e fornece 30-60% das calorias consumidas por quase três bilhões de pessoas (Guerra et al., 1998). A área total de arroz irrigado no estado do RS é aproximadamente 980 mil ha, correspondendo às regiões da Campanha, Depressão Central, Fronteira Oeste, Litoral e Zona Sul. Assim como as florestas, os campos agrícolas contribuem para as trocas globais de CO_2 , podendo ser um grande fornecedor de vapor d'água (fluxo de calor latente) para a atmosfera ou atuando como importante "seqüestrador" de gás carbônico atmosférico.

Saito et al. (2005) observaram que o campo de arroz (Japão) atuou como uma fonte líquida de CO_2 durante as três primeiras semanas após ser plantado. Além disso, este campo fixou $400gCm^{-2}$ durante os primeiros 140 dias e liberou $60gCm^{-2}$ durante o período de brotação (30 dias). As plantas jovens precisam fixar um grande volume de carbono para sintetizar as moléculas que são a matéria-prima de seu crescimento, já para as plantas maduras o consumo de oxigênio na respiração tende a igualar o total produzido de CO_2 na fotossíntese (Rios, 2002).

Além disso, o CO_2 , o vapor de água, o metano e o ozônio, tem uma função importante no aquecimento da atmosfera, pois atuam como gases de efeito estufa.

O efeito estufa natural proporciona a temperatura necessária para o suporte da atividade humana na Terra. Porém, nas últimas décadas tem sido observado o rápido aumento nas concentrações atmosféricas desses gases, principalmente o CO_2 , providos essencialmente do consumo de combustíveis fósseis como o petróleo, o carvão mineral e das mudanças do uso da terra (Malhi & Grace, 2000). O ciclo do

carbono tem recebido maior atenção, pois 60% do aquecimento global é devido ao aumento da concentração de CO_2 (Grace, 2004). Davidson & Hirsch (2001) afirmaram que níveis elevados de CO_2 podem fazer com que as plantas se desenvolvam melhor. Entretanto, as respostas para ecossistemas submetidos a elevadas concentrações de CO_2 não estão ainda bem entendidas. Porém, notáveis mudanças climáticas já podem ser observadas com o aumento da concentração de CO_2 , como a elevação dos níveis dos oceanos, o aumento global da temperatura e a alteração no ciclo hidrológico que regula o regime de chuvas (Artaxo, 2004).

Para estimar fluxos de superfície, o método de covariância de vórtices turbulentos é uma técnica que mede as trocas totais de CO_2 , H_2O e calor sensível no ecossistema. Esse método causa mínimos distúrbios para o micro ambiente dos ecossistemas que estão sendo estudados permitindo medidas contínuas (Baldocchi et al. 1988).

O método de covariância de vórtices é mais exato quando a vegetação subjacente é homogênea e situada em terreno plano e de grande extensão. Quando o método é aplicado sobre paisagens naturais e complexas, ou em condições atmosféricas que variam com o tempo a quantificação da troca de CO_2 entre biosfera-atmosfera deve incluir medidas do armazenamento atmosférico (Baldocchi, 2003).

No período de aquisição de dados, é inevitável não existir lacunas ao construir registros de dados durante longos intervalos de tempo. Por outro lado, os erros de medidas de fluxo podem ser influenciados na noite em que os ventos são fracos e intermitentes (pouca turbulência). Por isso, muitas vezes tendem a produzir redução na medida de respiração do ecossistema.

As medidas de covariância de vórtices também podem testar a exatidão das medidas de fluxos que representam o balanço de energia na superfície. A energia disponível ($R_n - G$), medida pelo radiômetro e por instrumentos de solo, deve igualar $H + LE$ medidas por covariância de vórtices.

O cálculo dos fluxos turbulentos de dióxido de carbono é um dos mais importantes componentes dos esquemas de parametrizações a serem usados em modelos climáticos. Portanto, o conhecimento dos fluxos turbulentos de CO_2 na

camada limite atmosférica (CLA) é um parâmetro essencial na modelização físico-química da atmosfera, assim como uma ferramenta de estudo da fotossíntese-respiração na cultura do arroz.

Neste trabalho estuda-se o balanço de CO_2 , em uma área de cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. O período de estudo compreende o ciclo completo do cultivo, entre outubro de 2003 e março de 2004. Quantifica-se a troca líquida de CO_2 no ecossistema (NEE) e se discute as possíveis limitações dos resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dióxido de carbono

O gás carbônico é um dos componentes do ar atmosférico e é um dos principais componentes para as plantas realizarem fotossíntese, processo pelo qual transformam a energia solar em energia química. O CO_2 desempenha, na atmosfera, importante função em relação ao crescimento vegetal, pois através da fotossíntese é assimilado pela planta, liberando o oxigênio.

O carbono é um elemento indispensável para a vida no planeta. É estocado na atmosfera, nos oceanos, solos, rochas sedimentares e está presente nos combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral.

Organismos nos ecossistemas terrestres e nos oceanos, absorvem o carbono da atmosfera na forma de dióxido de carbono (CO_2), esta absorção é realizada através da fotossíntese. Entretanto, as plantas liberam o CO_2 para a atmosfera mediante o processo de respiração.

Juntamente com o vapor d'água, metano, ozônio, entre outros, o CO_2 na atmosfera é transparente à radiação de onda curta, vinda do Sol, porém absorve e emite radiação de onda longa, emitida pela superfície terrestre. Esses gases também são responsáveis pela manutenção da temperatura adequada à vida em nosso planeta.

Com a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, a liberação de dióxido de carbono vem alterando os estoques naturais de carbono e conseqüentemente acarretando mudanças no clima do planeta. Nas últimas décadas, a quantidade de gás carbônico na atmosfera aumentou, 3/4 das emissões antropogênicas de dióxido de carbono são devido a queima de combustíveis fósseis e o restante vem da mudança do uso da terra, especificamente das queimadas (IPCC, 2001), o que contribui para o aquecimento do planeta.

2.2 Fotossíntese-respiração

As plantas verdes necessitam continuamente de dióxido de carbono para sintetizarem a glicose (açúcares), em presença de luz solar, e com participação de água, em um processo chamado de fotossíntese (Santos, 1999).

Como subproduto da fotossíntese há um desprendimento de O_2 , proveniente da água, em quantidades equivalentes ao CO_2 utilizado, ou seja, para cada molécula de CO_2 fixada, há liberação de uma molécula de O_2 (Santos, 1999).

O crescimento da planta está intimamente relacionado à quantidade total de radiação solar e dióxido de carbono através de processos de fotossíntese e respiração (Santos, 1999).

- Fotossíntese:



As plantas utilizam energia luminosa (captada pelos cloroplastos – organelas localizadas na folha) para transformar quimicamente o CO_2 da atmosfera (captado pelos estômatos) em substâncias ricas em energia, os açúcares. Esses açúcares são vitais ao metabolismo alimentar e conseqüentemente ao crescimento da planta. Como subproduto da fotossíntese há um desprendimento de oxigênio proveniente da água, em quantidade equivalente ao CO_2 (figura 1). Este processo ocorre na presença de luz e em plantas clorofiladas.

A respiração é o inverso da fotossíntese, embora as reações químicas dos dois processos sejam diferentes, pois a clorofila não está envolvida na respiração (Fan et al., 1990). No processo de respiração, o oxigênio é tomado da atmosfera para que os açúcares (glicose) sejam convertidos em energia, essenciais ao desenvolvimento e manutenção de todo ser vivo.

- Respiração:

glicose + oxigênio → dióxido de carbono + água + energia

De maneira sintetizada, o processo de fotossíntese depende essencialmente da energia solar, na qual as plantas retiram CO_2 da atmosfera durante o dia, e liberam CO_2 para a atmosfera durante a noite, em um processo inverso, denominado respiração. É importante salientar que as plantas, na presença de luz, não deixam de respirar, apesar de estarem realizando a fotossíntese (Scarpinella, 2002), pois a atividade fotossintética é maior que a respiratória. Segundo Hall e Rao (1980), a taxa fotossintética nas partes verdes das plantas supera em 30 vezes a taxa de respiração nos mesmos tecidos.

O grau de desenvolvimento vegetal depende notadamente da luminosidade, da temperatura e da umidade. Isto é bem caracterizado nas estações do ano, ou seja, primavera e verão (climas mais quentes) são mais favoráveis à produção vegetal (maior absorção de CO_2). Em resumo, a fotossíntese e a respiração dos vegetais, são os processos pelos quais passam os fluxos de carbono entre atmosfera e biosfera.



Figura 1 – Processo de fotossíntese (Fonte: Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada – CEPA/USP)

2.3 Efeito Estufa

Certo número de moléculas presentes no ar que representam uma pequena parte dos componentes da atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), o vapor d'água, o metano (CH_4), o ozônio (O_3) entre outros, têm a propriedade de serem “opacos” aos raios infravermelhos da superfície quando dissipados para o espaço e com isso aquecem as baixas camadas da atmosfera. Conseqüentemente, a temperatura do ar que nos envolve é favorável às formas de vida existentes, este processo natural é chamado de “efeito estufa”. Por analogia, as instalações que protegem culturas vegetais frágeis ao frio por meio de vidros que deixam passar a radiação solar, impedem a fuga dos raios infravermelhos, resultando em uma significativa elevação da temperatura.

A base para a teoria de efeito estufa foi colocada em 1896 por Svante Arrhenius, que relacionou os efeitos de mudanças climáticas com o CO_2 atmosférico, como

também foi ele o primeiro a quantificar a influência de mudanças na concentração de CO_2 na atmosfera sobre a temperatura da superfície da Terra (Rodhe et al, 1997).

Os gases de efeito estufa, resultam de fenômenos naturais e juntos representam menos de 1% dos gases da atmosfera. Esses gases mantêm o planeta cerca de 20°C mais quente do que seria na ausência, portanto, essenciais para a vida, como já foi dito. Segundo Goldemberg (1998), os gases estufa, em proporções ideais, evitam que ocorra grandes oscilações de temperatura e também fazem com que parte da radiação solar fique retida na superfície do planeta. Também, estão modificando a maneira pela qual a atmosfera absorve energia, ou seja, o clima deve adaptar-se ao aumento das concentrações desses gases para manter o equilíbrio do “balanço energético global”.

Os gases de efeito estufa controlam os fluxos de energia na atmosfera através da absorção dos raios infravermelhos emitidos pela superfície terrestre. Esses gases estão presentes naturalmente na atmosfera há milhões de anos, mas o homem está afetando-os quando introduz novas fontes (processos que geram os gases) ou interfere nos sumidouros naturais (processos que destroem ou removem os gases) (Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002).

O vapor d'água é o componente atmosférico que tem maior contribuição para o efeito estufa natural e não é diretamente afetado pela atividade humana. Este elemento é de grande importância para a mudança do clima, pois o ar quente pode conter mais umidade e os modelos prevêem que um pequeno aquecimento global poderia levar a um aumento dos níveis globais de vapor d'água, o que agravaria o efeito estufa.

Mudanças do clima já podem ser evidenciadas, pois observações já mostram que o mundo está ficando mais quente, ou seja, já ocorreram variações de temperatura nas últimas décadas. Além disso, observa-se alterações nos regimes de chuvas, perturbações nas correntes marinhas, retração das geleiras e a elevação do nível dos oceanos (Cadernos NAE, 2005).

O nível dos gases de efeito estufa está aumentando como resultado direto da atividade humana, devido a um significativo aumento em consequência da queima de combustíveis fósseis, fruto da industrialização em grande escala, expansão de áreas urbanas, desmatamentos e queimadas de grandes volumes de biomassa (cadernos NAE, 2005).

Atualmente, o CO₂ é responsável por mais de 60% da intensificação do efeito estufa. Além de estar presente naturalmente na atmosfera, outros fatores contribuem para seu aumento progressivo, como a queima de carvão, petróleo e o desflorestamento (Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002).

A concentração de CO₂ na atmosfera era de 280ppm (partes por milhão) na era pré-industrial, hoje já atinge 380ppm. Alguns pesquisadores prevêem que daqui a 50 anos alcançará o índice de 540ppm de CO₂ na atmosfera (Mudança do Clima, 2005). Cabe a pergunta, esse aumento de CO₂ na atmosfera favorecerá a produtividade agrícola, como nesse caso, a produção do arroz?

Estudos da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) relacionados a diferentes culturas agrícolas, como feijão, soja e arroz, em estufas com atmosfera de 540ppm mostram que as plantas se desenvolvem melhor, pois maiores níveis de CO₂ poderiam estimular mais a fotossíntese, mas em consequência disso, as “pragas” (doenças na planta) também tem grande aumento nessas culturas. Segundo pesquisadores da EMBRAPA, esse estudo pode avaliar os benefícios e os malefícios do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, buscando justamente a adaptação da cultura para que a produção agrícola mantenha-se em constante crescimento.

A agricultura enfrentará dificuldades nas próximas décadas devido ao aquecimento global. Algumas áreas agrícolas serão beneficiadas enquanto outras serão ameaçadas. Segundo estudos já realizados sobre mudanças no clima, as zonas tropicais e subtropicais, poderão reduzir seus rendimentos em mais de 1/3 devido a um “stress” térmico, pois as plantas já estão no limite de tolerância térmica, enquanto que nas regiões temperadas poderão aumentar seus rendimentos devido ao aumento das chuvas e estações de cultura mais longas (Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002).

Temperaturas mais elevadas poderão beneficiar o crescimento das plantas devido à diminuição do frio e das geadas, mas algumas poderão ser prejudicadas se combinadas com a escassez de água. Elevadas concentrações de CO₂ resultam no aumento das taxas de fotossíntese o que favorece o desenvolvimento da planta, contribuindo assim para a produtividade agrícola (Fórum Brasileiro de Mudanças

Climáticas, 2002). Especificamente o cultivo de arroz irrigado também contribui para as emissões de gases de efeito estufa, pois bactérias e outros microorganismos no solo decompõem o material orgânico produzindo o metano.

A preocupação com os danos à atmosfera ganhou consistência a partir da década de 70, quando a comunidade internacional foi alertada pelos estudiosos à respeito da destruição da camada de ozônio que protege a planta da ação da radiação ultravioleta.

Desde esse período, a preocupação com os gases de efeito estufa, também se tornou mais eficaz. Em 1997, na Conferência da Convenção do Clima, realizado no Japão, assinou-se o chamado Protocolo de Quioto, que foi posto efetivamente, em vigor somente a partir de 2005. Esse tratado diz que o aquecimento global causado pelos gases bloqueadores da radiação de onda longa (CO_2 , O_3 , CH_4 e outros), seria controlado mediante o compromisso de gradativa redução do lançamento desses gases na atmosfera (Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002).

O que se sabe hoje é que houve um aumento significativo, no último século, da concentração atmosférica desses gases causadores do efeito estufa, mas quais serão as conseqüências disso?

Entender as conseqüências das atividades que alteram o ciclo do carbono será decisivo para a formulação de políticas de segurança (Falkowski et al., 2000) e também será decisivo para desenvolver futuras políticas sociais para o uso da energia (Baldocchi et al., 1996). Reduzir as emissões de gases de efeito estufa requer tanto formulações políticas quanto consciência da população em geral, pois medidas não-prejudiciais ao clima dependem dos investidores e dos consumidores de energia.

2.4 Camada Limite Atmosférica

Na atmosfera encontram-se determinadas camadas que se subdividem de acordo com o efeito que a superfície terrestre provoca no movimento do ar. A primeira região da atmosfera, denominada de Camada Limite Atmosférica (CLA), próxima à superfície terrestre, que é diretamente influenciada pela superfície, e a segunda região,

a atmosfera livre, mais acima, que não sofre a influência direta da superfície terrestre (Varejão, 2001).

A porção mais rasa da atmosfera é determinada, principalmente pelas trocas de massa e energia com a superfície. Esta porção, denominada de Camada Limite Atmosférica (CLA) caracteriza processos de emissão ou absorção que acontecem na superfície (Moraes et al., 2007).

Segundo Stull (1988), a CLA é a região da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície terrestre e responde a ação combinada de forçantes mecânicos e térmicos.

Uma das principais características da CLA é a sua natureza turbulenta. A turbulência nesta camada é gerada pela convecção térmica (Sol) e mecânica (vento). Durante o dia, com o aquecimento da superfície e com os movimentos convectivos, a profundidade da CLA aumenta entre 1 a 2 Km. À noite, devido o resfriamento radiativo da superfície, o que resulta na redução da turbulência ou até mesmo quase cessando, a altura nesta camada se torna bem mais rasa.

Próximo à superfície, a camada nas primeiras dezenas de metros (20-60m, dependendo das características da superfície e da estratificação) é conhecida como Camada Limite Superficial (CLS). Esta camada é caracterizada pelo fato dos fluxos turbulentos serem aproximadamente constante com a altura. É a camada de maior interesse em micrometeorologia, pois o movimento do ar é normalmente irregular e é caracterizada por flutuações, vórtices ou turbilhões. Mesmo assim, às vezes o fluxo de ar nesta camada pode não ser irregular, mas o comportamento das propriedades médias tais como velocidade do vento, umidade, temperatura do ar e concentração de CO_2 , pode ser examinado estatisticamente. O comportamento dos fluxos turbulentos nesta camada, contribui para o conhecimento da influência das propriedades médias sobre as atividades produtivas na agricultura e na contribuição da floresta Amazônica no ciclo global do carbono. Normalmente, são considerados períodos adequados para a análise estatística de aproximadamente 30 minutos a 1 hora, mas hoje já existe discussões sobre qual período seria o mais adequado para essa análise em cada ecossistema.

Na camada superficial, as condições estáveis são características do período noturno (Camada Limite Estável). Durante o dia, a atmosfera é em geral instável (Camada Limite Convectiva), quando predominam os processos convectivos. A condição neutra é geralmente nos períodos de transição, nas primeiras horas do dia ou da noite (Pinto, 2003).

Durante a noite, quando geralmente não há convecção, o principal mecanismo gerador de turbulência é o vento. Entretanto, este mecanismo também se estabelece durante o dia, de tal forma que há uma contribuição na produção mecânica, na geração dos vórtices turbulentos (Pinto, 2003).

Não há um consenso de como determinar a altura da Camada Limite Noturna (CLN) ou Camada Limite Estável (CLE), mas segundo Stull (1988), o critério mais usado é a altura onde o gradiente de temperatura potencial virtual (θ_v) é nulo, ou a altura onde cessa a turbulência.

Segundo Fisch (1995), a evolução da Camada Limite Atmosférica, Camada Limite Superficial e a Camada Limite Noturna estão diretamente ligadas a quantidade de energia disponível na superfície.

2.5 Avaliação do método de covariância de vórtices

A utilização do método de covariância de vórtices (*eddy covariance*) tem mostrado que as trocas líquidas de CO₂ no ecossistema são subestimadas, um dos motivos é que as condições noturnas frequentemente não são condizentes com a teoria de transporte turbulento utilizado pelo método de covariância de vórtices.

Normalmente os valores dos fluxos são calculados em intervalos de 30 min. Alguns autores sugerem períodos de integração maiores que 30 min para não subestimar os fluxos (Sakai et al., 2001). Porém, outros, na tentativa de minimizar a perda nas medidas de CO₂, efetuam uma correção nos dados da troca líquida de CO₂ do ecossistema (NEE) usando como indicador a velocidade de fricção (u_*) (Araújo et al., 2002). Avaliam se há uma redução dos valores em condições de pouca turbulência

mecânica (u_*), principalmente à noite, e se necessário substituem por alguma forma de preenchimento desses dados (Goulden et al., 1996).

Segundo Baldocchi (2003) o valor da velocidade de fricção que produz fluxos noturnos de CO_2 “adequados” não é universal. Massman e Lee (2002) encontraram u_* variando entre 0 e 0,6m/s em diferentes tipos de florestas. Miller et al. (2004), usaram filtro para substituir NEE em noites com $u_* < 0,2\text{m/s}$, em trabalho realizado no leste da Amazônia.

2.6 A planta de arroz

Alguns historiadores relatam que a origem do arroz foi na Ásia. Mas, bem antes de qualquer evidência histórica, o arroz foi, provavelmente, o principal alimento e a primeira planta cultivada no continente asiático, especificamente na China. No continente americano, alguns autores apontam o Brasil como o primeiro país a cultivar esse cereal.

Essa cultura é antiga e desde esse período é cultivada em solos irrigados, como é o caso do RS e SC. Os solos apropriados para o cultivo do arroz irrigado caracterizam-se pela topografia plana, pois assim facilitam a manutenção da lâmina d'água sobre a superfície do solo e dificultam a lixiviação de nutrientes. Segundo EMBRAPA o arroz é cultivado em regime de irrigação para aumentar a disponibilidade de nutrientes para a planta, aumentar a fotossíntese nas folhas mais baixas (devido o reflexo da luz na água), possibilitar maior controle da temperatura no solo, entre outros.

No RS, o cultivo de grandes áreas de arroz, é caracterizado pelo sistema de cultivo com taipas em nível, ou seja, a água de irrigação é retida sobre a superfície do solo através das taipas. Como vantagens deste sistema tem-se o menor movimento de terra, a melhor drenagem superficial e o menor custo inicial, e como desvantagens a não uniformidade da lâmina d'água e o aumento do volume de água utilizada, dificultando o controle de plantas daninhas e o manejo de insumos agrícolas (Arroz Irrigado: recomendações técnicas,2005).

A quantidade de água necessária para o cultivo do arroz depende, principalmente, das condições meteorológicas, da duração do ciclo de cultivo do arroz, das características físicas do solo, entre outros.

O maior consumo de água na cultura do arroz é devido à evapotranspiração da planta. A evapotranspiração compreende a água transpirada pela planta mais a água evaporada da lâmina superficial, isso ocorre devido à diferença de pressão de vapor entre a superfície e a atmosfera. A radiação solar e a temperatura do ar favorecem a evaporação. A velocidade dos ventos incrementa a evaporação. A transpiração varia com a fase de crescimento e desenvolvimento das plantas.

A planta de arroz completa seu ciclo geralmente entre três e seis meses, dependendo da cultivar e das condições ambientais (Vergara, 1980; Yoshida, 1981). A cultura de arroz é muito sensível às condições climáticas, mas apresenta boa adaptação, por isso é cultivada em diversos países do mundo.

Os principais fatores que influenciam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade do arroz, são a temperatura, a radiação solar e a precipitação (Guimarães et al., 2002). A cultura do arroz requer temperatura em torno de 24 a 30°C e radiação solar elevada. Como no RS a planta é cultivada em solo inundado, a água não é fator limitante (EMBRAPA). Desde a fase inicial até o início da fase reprodutiva, o desenvolvimento da planta de arroz é mais afetado pela temperatura da água do que do ar, pois a planta encontra-se praticamente sob a água. Nas seguintes fases, ambas as temperaturas afetam o desenvolvimento.

O ciclo de desenvolvimento do arroz compreende três fases: vegetativa (65 a 70 dias), reprodutiva (35 dias) e a maturação (30 a 40 dias) (Guimarães et al., 2002). Mas a duração de cada fase do cultivo do arroz depende da região de cultivo, da fertilidade do solo e da época de semeadura. Além disso, o grão da planta após o período de maturação, passa ainda por um processo físico de perda de umidade, o que leva mais algumas semanas até ser colhido (EMBRAPA).

Economicamente, o arroz é considerado o produto de maior importância em muitos países em desenvolvimento. É cultivado e consumido em todos os continentes, desempenhando papel estratégico, tanto em nível econômico quanto social. A maior parcela da produção deste cereal no Brasil é proveniente da região Sul, onde a cultura

irrigada é responsável por 60% da produção nacional, sendo a maior parcela produzida no RS.

Na figura 2 destacam-se algumas das áreas de cultivo de arroz irrigado no Estado do RS mapeadas com imagem Landsat no contexto do Projeto Geosafra. Entre elas destacam-se a região da Depressão Central (Agudo, Cachoeira do Sul, Dona Francisca, Paraíso do Sul, Santa Maria,...), a Região da Campanha (Bagé, Santana do Livramento, São Vicente do Sul, Rosário do Sul,...), a Região da Fronteira Oeste (Uruguaiana, São Borja, Itaqui, Alegrete,...) e a do Litoral e da Zona Sul (que não aparecem destacadas no mapa, pois não foi possível obter cenas úteis durante o sensoriamento).



Figura 2 – Localização de áreas cultivadas com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. A Região do Litoral e da Zona Sul não aparecem destacadas no mapa (Fonte: Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia – CEPSRM/UFRGS)

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição do sítio experimental e coleta de dados

Os dados foram coletados em uma área de cultivo de arroz, na localidade de Paraíso do Sul, RS (S 29° 44' 39,6", W 53° 8' 59,8"), no sul do Brasil (figura 3), como parte do projeto CT-HIDRO, com o propósito de descrever condições de superfície para diferentes ecossistemas do país.

Os sensores foram fixados em uma torre de 10m de altura, localizada em terreno plano, operando desde junho de 2003 (figura 4).

Medidas de turbulência foram feitas pelo anemômetro sônico Campbell-3D e flutuações turbulentas de vapor d'água e CO₂ pelo analisador de gás de caminho aberto LICOR 6556 (figura 5), a uma frequência de 16 Hz. Os dados foram armazenados em tempo real em um microcomputador.

Medidas de temperatura do solo em cinco níveis (2, 5, 10, 20 e 50 cm) feitas pelo STPO1 Soil Temperature Profile (Hukseflux Thermal Sensors) e umidade do solo em seis níveis (10, 20, 30, 40, 60 e 100 cm) feitas pelo Delta T Device Profile Prob PR1. Também foram feitas medidas de temperatura e umidade do ar (HMP45C), velocidade e direção do vento (Young 8100), pressão (PTB101B - Vaisala), precipitação (Rain Gauge TB4), radiação de onda longa (pirgeômetro CG1 _ Kipp e Zonen) e onda curta (piranômetro CM6B – Kipp e Zonen), coletados a 1 Hz.

Os dados brutos foram armazenados em arquivos de 30 minutos. A análise desses dados foi realizada após serem apendados em arquivos de 24h. Foram feitas médias de 30 min com avanço de 3 min, permitindo assim, para um período de 24h, 480 arquivos de dados. As variáveis turbulentas foram calculadas com auxílio de linguagem computacional Fortran-77, utilizando a técnica da covariância de vórtices (mostrada posteriormente).

Foram analisados, aproximadamente, seis meses de coleta de dados (período do ciclo do arroz), desde outubro de 2003 a março de 2004.

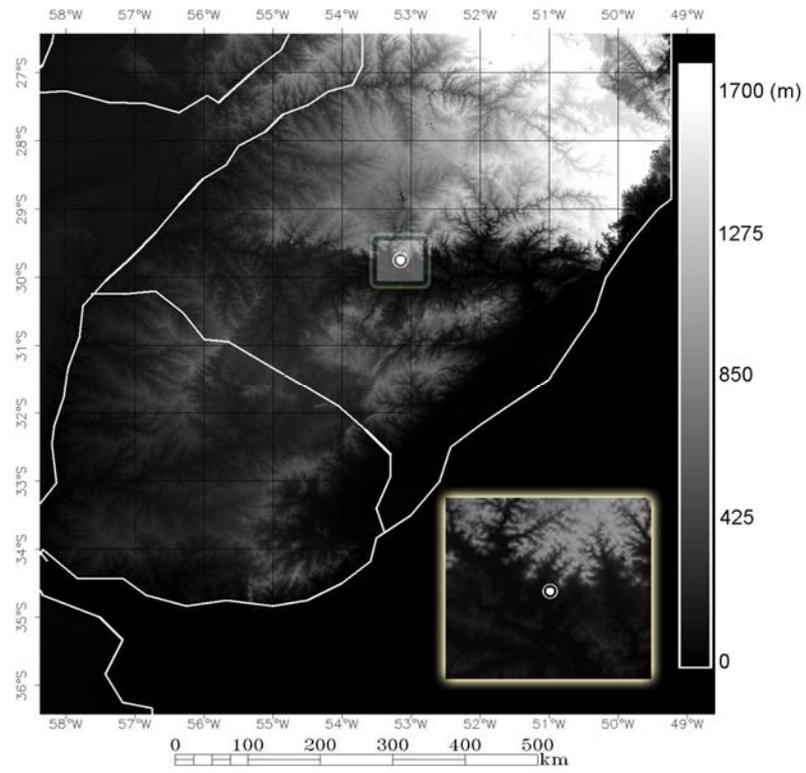


Figura 3 – Localização do município de Paraíso do Sul.



Figura 4 – Torre de observação utilizada nas medidas na cultura de arroz em Paraíso do Sul.



Figura 5 – Sistema de covariância de vórtices (*eddy covariance*): anemômetro sônico e analisador de gás de caminho aberto.

3.2 Análise dos dados experimentais

Durante o período de cultivo do arroz se obteve falhas nos dados em praticamente todos os meses, ou seja, em outubro obteve-se falha de dados em torno de 10%, em novembro 5%, em dezembro 40%, em janeiro 80% e em março 5%. Em fevereiro o conjunto de dados está completo. Isto pode ter ocorrido devido a problemas nos sensores ou até mesmo na aquisição e armazenamento dos dados. Falhas nos dados são inevitáveis quando registros de dados são construídos para um longo período e para dados de fluxos medidos pelo método de covariância de vórtices.

Neste trabalho, optou-se pelo não preenchimento das falhas nos dias em que não ocorreu armazenamento de dados.

Para registrar flutuações das propriedades dos menores vórtices, ainda capazes de proceder ao transporte turbulento, Monteith e Unsworth (1990) sugeriram que a resposta dos sensores deveria ser sincronizada e em frequência suficientemente elevada. Ainda afirmaram que as dimensões dos vórtices aumentam com a rugosidade superficial e com a velocidade do vento.

Na aplicação do método de covariância de vórtices é necessária uma adequada rotação de coordenadas para minimizar efeitos nas covariâncias (covariância entre duas variáveis é a média do produto da perturbação de cada uma dessas variáveis em relação a sua média, Moraes e Acevedo, 2004) devido à mínima inclinação topográfica que possa ter no sítio experimental. Para a média das componentes da velocidade do vento ou de covariâncias que incluam grandezas escalares são realizadas duas sucessivas rotações. A primeira, alinha a componente u com o eixo x , realizada no plano em torno do eixo z , para anular a componente v . A segunda anula a componente w , realizada em torno do eixo y .

O anemômetro sônico, além de detectar flutuações de velocidade, também permite medidas de flutuações da temperatura que proporcionam o cálculo do fluxo de calor sensível.

Medidas de fluxo de calor latente e dióxido de carbono requerem outro sensor, um analisador de gás.

Medidas de fluxo de calor latente e sensível (sensores de resposta rápida – 16 Hz) podem também representar o balanço de energia na superfície, juntamente com medidas de fluxo de calor do solo e radiação líquida (sensores de resposta lenta – 1 Hz).

A transferência simultânea de calor sensível e latente pode causar flutuações na densidade do ar (Webb et al., 1980) o que influencia nas medidas das concentrações de CO_2 e vapor d'água, por esse motivo faz-se devidas correções nessas medidas.

3.3 Cálculo dos fluxos turbulentos

O método de covariância de vórtices (*eddy covariance*) foi utilizado para medir o fluxo de CO₂ que é resultante da interação entre atmosfera e o campo agrícola, assim como o fluxo de calor latente e sensível. Esse método permite determinar o fluxo vertical de CO₂ (fotossíntese-respiração), da temperatura do ar (fluxo de calor sensível) e da umidade do ar (fluxo de calor latente), usando o cálculo da correlação entre os desvios temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com os desvios temporais do escalar.

O fluxo de uma grandeza escalar c na atmosfera pode ser escrito como:

$$F_c = \overline{w\rho_c} \quad (1)$$

onde w é a componente vertical da velocidade do vento, ρ_c é a densidade (ou concentração) do escalar c . A barra acima do termo à direita representa a média do produto destas variáveis em um determinado intervalo de tempo. Entretanto, devido à grande quantidade de flutuações observadas nas medidas de velocidade do vento, temperatura e concentração de CO₂, nos estudos de turbulência atmosférica é comum decompor essas variáveis em uma componente média e outra turbulenta (Baldocchi et al., 1988; Moncrieff et al., 1997). Este processo é conhecido como decomposição de Reynolds; assim a velocidade do vento e concentração podem ser escritas como:

$$w = \overline{w} + w' \quad (2)$$

$$\rho_c = \overline{\rho_c} + \rho_c' \quad (3)$$

onde \overline{w} e $\overline{\rho_c}$ são as componentes médias e w' e ρ_c' as componentes turbulentas da velocidade vertical do vento e da densidade da grandeza escalar c , respectivamente.

Substituindo as equações (2) e (3) na equação (1) e aplicando as regras da média de Reynolds (Stull, 1988), obtém-se:

$$F_c = \overline{w\rho_c} + \overline{w'\rho_c'} \quad (4)$$

onde os termos da adição representam, respectivamente, as componentes advectiva e turbulenta do fluxo vertical médio da grandeza escalar c na atmosfera.

Segundo Oke (1987), o valor médio de w é nulo em local plano, suficientemente extenso e geometricamente uniforme, não existindo escoamento preferencialmente vertical e porque, em um local, a massa de ar ascendente iguala a massa de ar descendente durante um intervalo de tempo razoável, assim o fluxo turbulento de uma grandeza escalar c pode ser expresso como:

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} \quad (5)$$

onde w' representa a variação da componente vertical da velocidade do vento em relação à sua média, ρ_c' representa a variação da densidade do escalar c em relação à sua média, e a barra horizontal sobre o produto caracteriza a covariância entre w' e ρ_c' .

Desta maneira, os fluxos turbulentos de calor sensível, calor latente, momentum e CO_2 podem ser expressos, respectivamente, da seguinte forma:

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \quad (6)$$

$$LE = \rho L_v \overline{w'q'} \quad (7)$$

$$u_* = \sqrt{\overline{u'w'}} \quad (8)$$

$$F_c = \rho \overline{w'c'} \quad (9)$$

onde H é o fluxo de calor sensível (Wm^{-2}), LE é o fluxo de calor latente (Wm^{-2}), u_* fluxo de momentum (ms^{-1}), T' é a componente turbulenta da temperatura do ar (K), q' é a componente turbulenta da umidade específica do ar ($KgKg^{-1}$), u' componente turbulenta da velocidade do vento (ms^{-1}), C_p é o calor específico do ar à pressão constante ($JKg^{-1}K^{-1}$), L_v é o calor latente de vaporização (JKg^{-1}) e ρ é a densidade do ar seco (Kgm^{-3}).

3.4 Troca líquida de CO_2 no ecossistema (NEE – *Net Exchange Ecosystem*)

A troca líquida de CO_2 no ecossistema (NEE) é a diferença entre o CO_2 absorvido pela fotossíntese e o perdido pela respiração (Wohlfahrt et al., 2005), combinando medidas do sistema de fluxos com medidas do perfil vertical da concentração de CO_2 .

O NEE é calculado pela soma dos fluxos de CO_2 medidos pelos sensores fixados no topo da torre e pela taxa de armazenamento na camada abaixo (Lee, 1998):

$$NEE = F_c + \text{armazenamento} \quad (10)$$

onde F_c é o fluxo de CO_2 medido pelo sistema de covariância.

Os dados de NEE foram resumidos como médias diárias feitas a cada 30 min das medidas dos fluxos de CO_2 para o período analisado.

Em nosso estudo o NEE foi calculado desconsiderando a taxa de armazenamento, ou seja, usou-se apenas o fluxo medido pelo sistema experimental:

$$NEE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i f_{ij} \quad (11)$$

onde f_{ij} é a média do fluxo diário de CO_2 .

3.5 Correção de Webb

Correções são aplicadas aos dados brutos com a intenção de se obter dados corretos usando o método de covariância de vórtices.

O fluxo vertical total do constituinte do ar inclui o fluxo vertical turbulento assim como o fluxo vertical médio, que é o transporte vertical causado pelo fluxo médio vertical. Desta maneira, o movimento turbulento que consiste em parcelas de ar ascendentes e descendentes, as quais tem densidades diferentes (parcelas de ar ascendentes são menos densas que as descendentes), deve ter uma velocidade vertical média que seja diferente de zero. Consequentemente, o fluxo turbulento obtido pelo método de covariância de vórtices deve ser corrigido para obter-se um fluxo total a partir da equação 5.

Com este objetivo Webb et al. (1980) apresentaram uma teoria para esclarecer os efeitos das flutuações das densidades induzidas por fluxos de calor e vapor d'água nas medidas de fluxos turbulentos de constituintes do ar:

$$F_c = \overline{w' \rho_c'} + \frac{m_d}{m_w} \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_d}} \overline{w' \rho_w'} + \left(1 + \frac{\overline{\rho_w}}{\overline{\rho_d}} \frac{m_d}{m_w} \right) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \overline{w' T'} \quad (12)$$

onde o sub-índice “*d*” refere-se ao ar seco e o sub-índice “*w*” ao ar úmido, m_w é o peso molecular do vapor d'água (18g/mol), m_d é o peso molecular do ar seco (28,96g/mol).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Elementos meteorológicos

Condições meteorológicas do período de cultivo do arroz são mostradas na figura 6.

A temperatura média do ar apresentou valores máximos em torno de 29°C em janeiro de 2004, período em que o arroz necessita de temperaturas elevadas assim como maior incidência de radiação solar (figura 6a). Segundo Guimarães et al. (2002), a planta de arroz, na fase inicial de crescimento, necessita de pouca radiação solar, aumentando progressivamente essa necessidade com sua idade.

A cultura do arroz é sensível às condições climáticas. Quando estas são satisfatórias, a cultura é produtiva. Ocorrem problemas de origem climática na cultura do arroz no Brasil, como por exemplo as baixas temperaturas durante a fase reprodutiva do arroz irrigado no estado do RS (Steinmetz e Meireles, 1999). A temperatura é um dos elementos climáticos mais importantes para o crescimento, desenvolvimento e produtividade do arroz (Guimarães et al., 2002).

Os valores registrados de temperatura são característicos desta época do ano, devido a menor cobertura de nuvens que por sua vez contribui para maior incidência de radiação solar durante o dia e para uma perda de energia radiativa durante a noite.

Nos meses de dezembro de 2003 e janeiro de 2004 ocorreram os maiores picos de radiação, 399 Wm^{-2} e 388 Wm^{-2} , respectivamente (figura 6b).

Esses fatores citados influenciam no cultivo do arroz, por este motivo a planta é cultivada, no RS, entre a primavera e o verão. Além disso, necessita de umidade, o que a leva a ser cultivada pelo método de irrigação, fator que influencia no fluxo de calor latente, visto posteriormente.

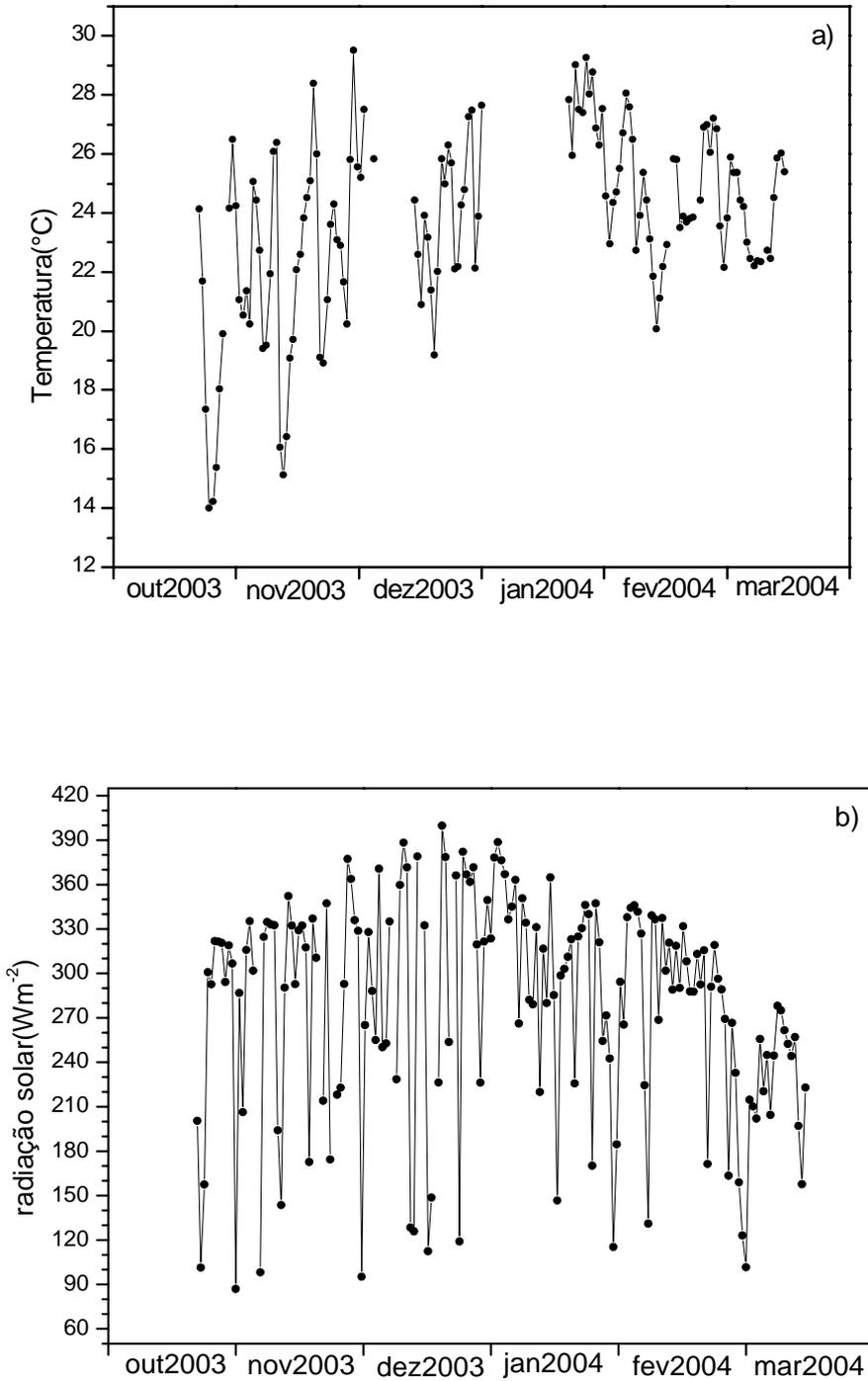


Figura 6 – Médias diárias do período de cultivo do arroz que compreende outubro de 2003 a março de 2004: (a) temperatura do ar, (b) radiação solar incidente.

4.2 Fluxos de Dióxido de Carbono

4.2.1 Troca Líquida no Ecossistema (NEE)

A figura 7 mostra a curva acumulativa do total de carbono assimilado usando dados do método de covariância de vórtices. Os maiores valores encontrados foram durante a fase reprodutiva do arroz (março de 2004), em torno de $-1,38\text{mgCO}_2\text{ m}^{-2}$. O resultado encontrado para o sítio de Paraíso do Sul, mostra que a lavoura de arroz irrigado agiu como um “sumidouro” de CO_2 atmosférico, ou seja, este sítio contribuiu para a redução das concentrações de CO_2 na atmosfera.

Este resultado está de acordo com o estudo em campo de arroz irrigado no Texas, USA (Campbell et al., 2001) na qual também se obteve os maiores valores de NEE durante a fase reprodutiva. Além disso, outros resultados em campo de arroz não irrigado em Santarém, PA, relatados por Sakai et al. (2004), encontraram valores mais elevados de CO_2 durante o plantio de arroz, conduzindo um NEE de $-2,31\text{mgCO}_2\text{ m}^{-2}$. As prováveis diferenças nos valores da NEE entre os sítios de Paraíso do Sul e Santarém, deve-se atribuir ao tipo de cultura, ou seja, no primeiro o arroz é irrigado e no segundo é não-irrigado. Outra consequência possa ser a taxa de armazenamento, que não efetuamos em nosso sítio experimental (Paraíso do Sul).

Os valores diários de NEE foram negativos na fase vegetativa (1ª fase de desenvolvimento do arroz), em concordância com os dados reportados por Campbell et al. (2001) também para uma área de arroz irrigado.

O valor de NEE encontrado para o sítio de Paraíso do Sul, RS, pode ter sido superestimado, pois em alguns dias do período do estudo o u_* noturno foi pequeno ($<0,2\text{m/s}$). Nestes casos a pequena intensidade da turbulência pode ocasionar acúmulo do CO_2 entre o solo e o nível do sensor, consequentemente interferindo no cálculo exato do saldo do fluxo de CO_2 para as 24h. Os valores dos fluxos foram calculados em intervalos de 30 min. Alguns autores sugerem períodos maiores que 30 min para não subestimar os fluxos (Sakai et al., 2001). Além disso, em períodos de pouca turbulência os sensores podem não estar medindo corretamente os fluxos e também,

em nosso estudo, não se contabilizou a taxa de acumulação para a NEE, pois neste sítio não operava sensores abaixo do sistema de fluxos.

A figura também mostra que neste sítio agrícola, a correção de Webb apresentou valores aproximadamente menores que 1% dos valores reais de NEE, que neste caso é um fator irrelevante, pois não ocorreu grande variação no saldo de CO_2 . Esta correção é feita devido à dependência que a medida da concentração de CO_2 tem com a densidade do ar, que por sua vez depende da temperatura e umidade específica a cada medida efetuada.

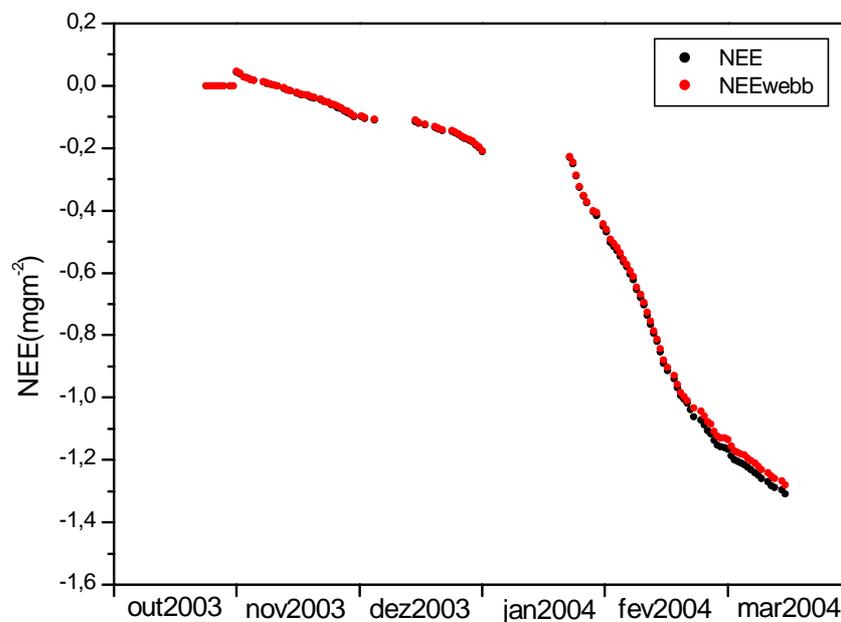


Figura 7 – Curva acumulativa da troca líquida no ecossistema (NEE) durante o período de cultivo do arroz.

4.2.2 Fluxos de CO₂

O comportamento do fluxo de CO₂ durante todo o período analisado, calculado pelo método de covariância de vórtices, pode ser observado na figura 8.

Maiores valores de fluxo negativo de CO₂ foram encontrados em janeiro de 2004, chegando a atingir um pico máximo de $-0,47\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, mostrando que é neste período que a planta de arroz se desenvolve mais, pois captura maior quantidade de CO₂ da atmosfera durante o dia e libera menor quantidade à noite. Além disso, neste mesmo mês se obteve maiores valores de temperatura e radiação incidente, o que favorece a realização da fotossíntese, atuando desta forma como um “sumidouro” de CO₂.

No início do período de cultivo do arroz, a planta encontrava-se na fase vegetativa, o consumo e a liberação de CO₂ para a atmosfera era em pequena proporção. Na fase seguinte (reprodutiva) passa a consumir mais CO₂ devido à fase de constante desenvolvimento.

Os valores dos fluxos diários de CO₂ na fase vegetativa, em nosso estudo de cultura de arroz irrigado, foi semelhante ao encontrado no campo de arroz não irrigado (Sakai et al, 2004).

Observa-se também que a correção de Webb utilizada para os fluxos de CO₂ foi pouco acentuada, provavelmente devido a algum erro constatado na flutuação do CO₂ durante a aquisição dos dados, na qual não modificou o resultado encontrado.

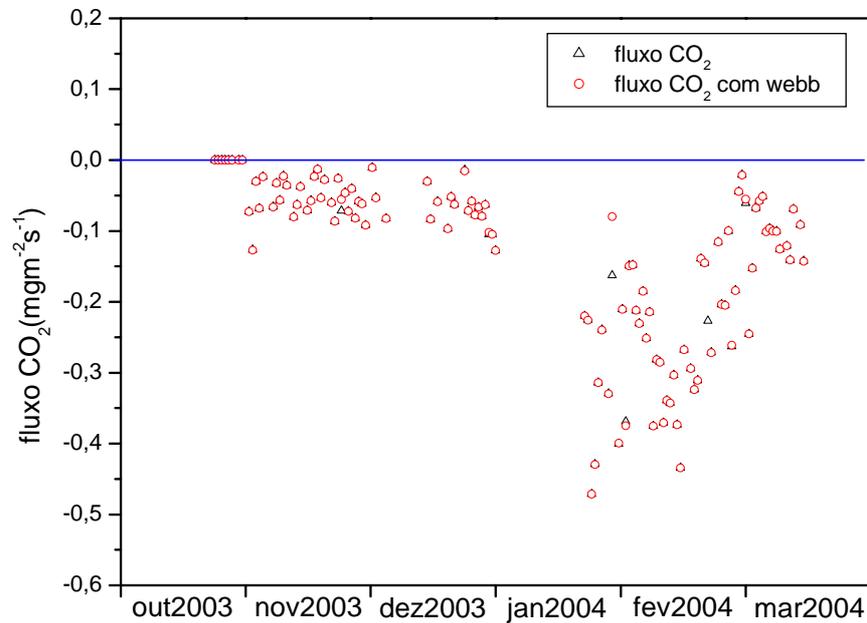


Figura 8 – Médias diárias do fluxo de CO_2 durante o período de cultivo do arroz. Os triângulos (preto) representam o fluxo de CO_2 e os círculos (vermelho) os fluxos de CO_2 com a correção de Webb.

4.2.3 Fluxos diários de CO_2

A figura 9, 10 e 11 mostra o comportamento dos fluxos diários de CO_2 e da temperatura em diferentes estágios do cultivo do arroz.

Valores máximos de médias de 30 minutos de fluxos de CO_2 ocorreram durante a fase reprodutiva (janeiro de 2004, figura 10), similar ao estudo de Campbell et al. (2001) em um campo de arroz também irrigado.

O comportamento típico do fluxo de CO_2 mostra um fluxo positivo no período noturno, quando a planta emite CO_2 para a atmosfera e começa a decrescer quando o CO_2 atmosférico é absorvido por ela, logo após o nascer do sol (em torno das 7h).

A temperatura e os fluxos de CO_2 variaram inversamente, durante o dia a temperatura cresce a partir das 6h chegando a alcançar um pico de 30°C em janeiro de 2004 atingindo um máximo de fluxo de CO_2 de $-1,1\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (figura 10). Isto nos mostra claramente que o fluxo de CO_2 está relacionado com a elevação da temperatura e radiação, proporcionando maior absorção de CO_2 pela planta de arroz, devido à realização da fotossíntese. A temperatura segue o padrão do ciclo radiativo, ou seja, durante o dia cresce devido à incidência solar, enquanto que à noite decresce devido o resfriamento radiativo.

Na fase vegetativa (figura 9) a absorção e liberação de CO_2 para a atmosfera apresentam valores pequenos, pois nesta fase a planta inicia seu processo de germinação. Na fase de maturação (figura 11) a planta encontra-se no estágio final, próximo da colheita, sem necessidade de grandes absorções de CO_2 .

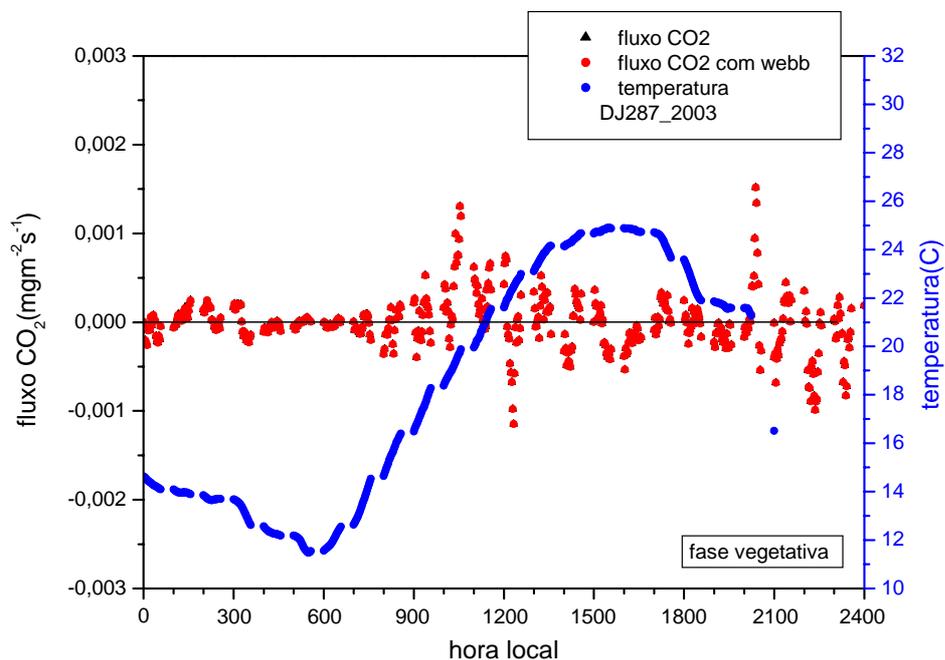


Figura 9 – Variações diárias do fluxo de CO_2 sem correção de Webb (triângulos pretos), com correção de Webb (círculos vermelhos) e da temperatura (círculos azuis) na fase vegetativa da cultura do arroz.

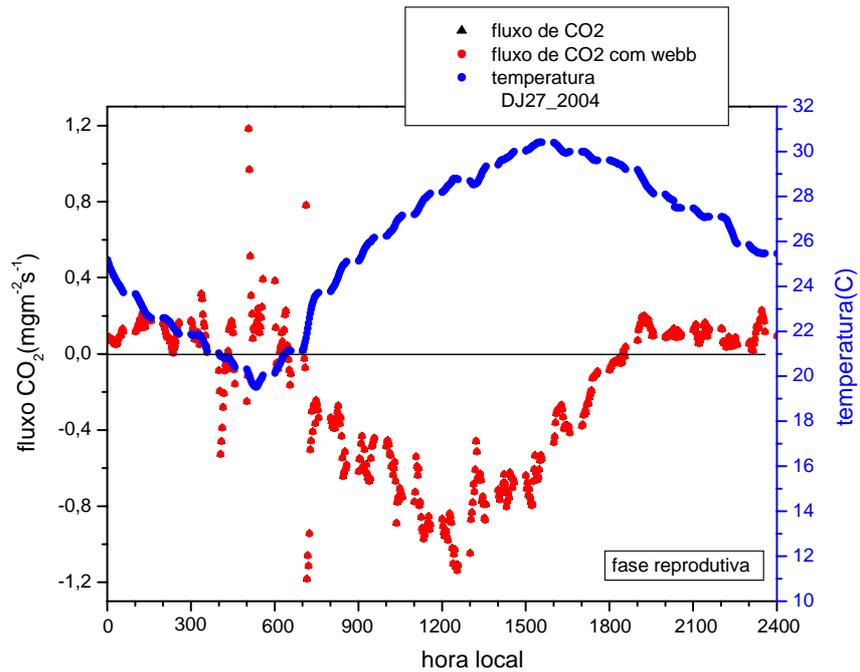


Figura 10 – Variações diárias do fluxo de CO₂ sem correção de Webb (triângulos pretos), com correção de Webb (círculos vermelhos) e da temperatura (círculos azuis) na fase reprodutiva da cultura do arroz.

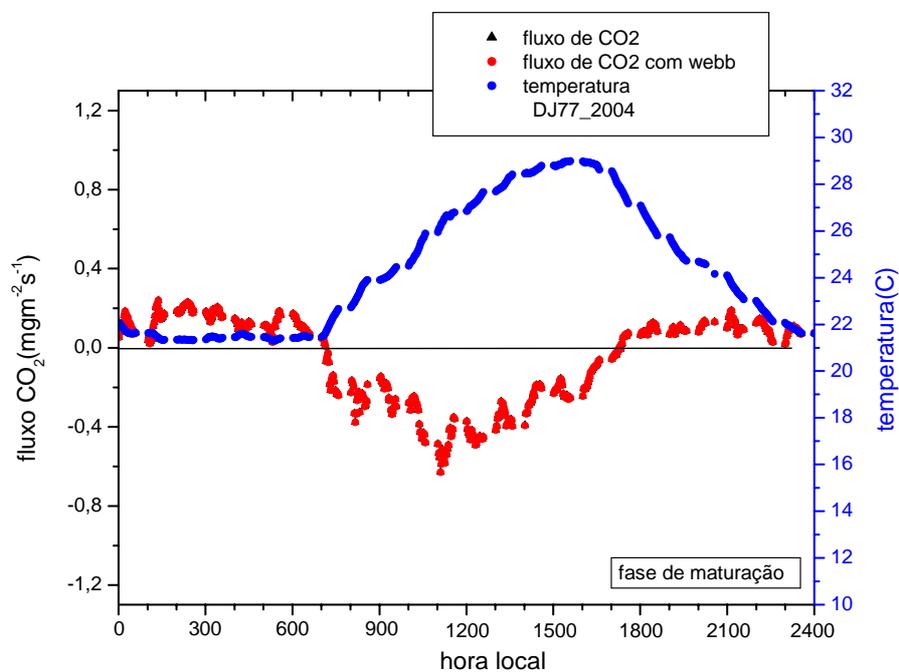


Figura 11 – Variações diárias do fluxo de CO₂ sem correção de Webb (triângulos pretos), com correção de Webb (círculos vermelhos) e da temperatura (círculos azuis) na fase de maturação da cultura do arroz.

4.2.4 Fluxo de CO₂ e u_{*}

A turbulência (velocidade de fricção, u_{*}) é uma componente importante para o transporte e também um bom indicador do comportamento de CO₂ no ecossistema.

Medidas corretas de fluxo de CO₂ são mais difíceis de se obter durante o período noturno do que no diurno, pois a atmosfera é estável e há condições de vento fraco, na qual as trocas na vertical são intermitentes. No período diurno, as condições de vento são uniformes e também há presença de forçante térmico o que torna a atmosfera, em geral, instável favorecendo o cálculo do fluxo de CO₂.

As técnicas usadas em micrometeorologia são baseadas na transferência de turbulência, ainda que o fluxo de CO₂ durante as condições noturnas seja pouco estimado (Sun et al., 1999).

Neste estudo, não se limitou a velocidade de fricção (u_{*}), pois acreditava-se ter valor sempre menor que 0,2 m s⁻¹, como sugerido por Goulden et al. (1996), na qual fluxos de vórtices são subestimados quando u_{*} < 0,2 m s⁻¹.

A figura 12 mostra o comportamento do fluxo de CO₂ e da velocidade de fricção para um mesmo dia, escolhido aleatoriamente. Na figura 12, u_{*} é maior que 0,2 m s⁻¹, obtendo um fluxo de CO₂ adequado as condições diurnas e noturnas. Durante o dia o processo de fotossíntese é intensificado, devido ao transporte de CO₂, ocasionado pelo vento, da atmosfera para a planta. À noite o processo de respiração é claramente observado, ocorrendo a liberação de CO₂ para a atmosfera. Caso contrário ocorre na figura 13, onde u_{*} mantém-se em grande parte do dia menor que 0,2 m s⁻¹ e em poucas horas da noite ultrapassa esse valor. Sendo assim, o fluxo de CO₂ comporta-se como se em alguns períodos noturnos estivesse realizando fotossíntese (fluxo negativo), especificamente em torno da 1h até às 5h, o que normalmente após este período é que começaria o processo de fotossíntese. Entre 5h e 6h a planta respira (fluxo positivo) e logo após realiza fotossíntese durante todo o período diurno, iniciando novamente o processo de respiração após as 17h, quando a turbulência se intensifica.

Isso nos leva a creditar que o fluxo de CO_2 pode ter sido subestimado. Como não foi analisado o u_* dia-a-dia, não podemos relatar o percentual de condições inadequadas (calmas) para o cálculo exato do fluxo de CO_2 . Além disso, as médias dos fluxos de CO_2 foram calculadas em intervalos de 30 min, sendo que alguns autores sugerem intervalos maiores. Massman e Lee (2002) mostraram que médias de tempo maiores podem ser necessárias à noite quando a atmosfera é estável e a turbulência é intermitente.

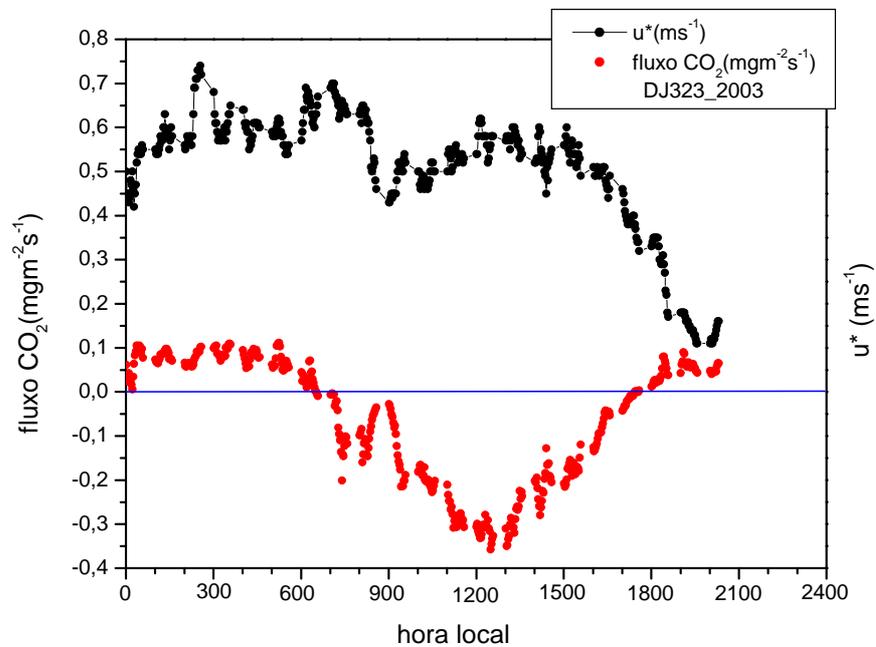


Figura 12 – Comportamento do fluxo de CO_2 e da velocidade de fricção (u^*) para o dia DJ323_2003.

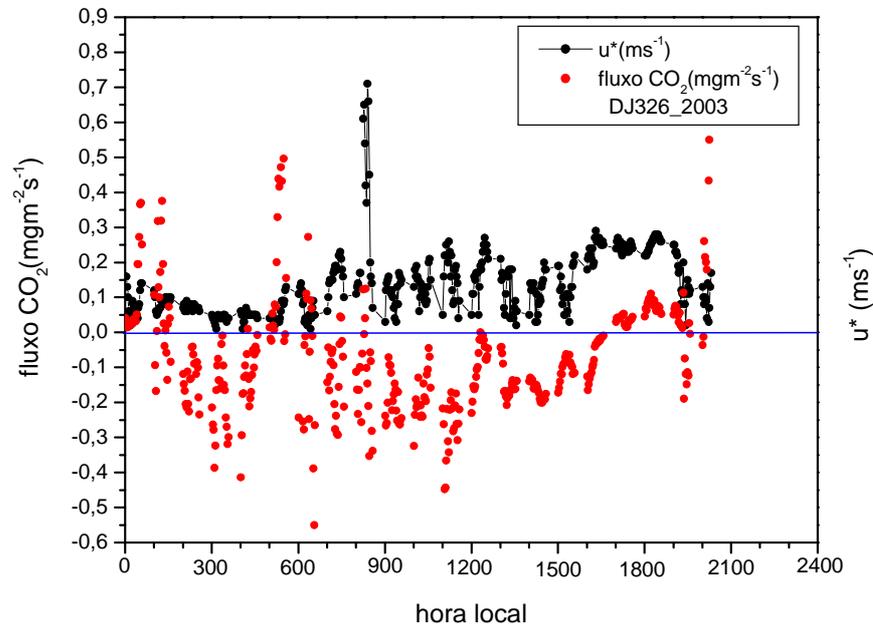


Figura 13 – Comportamento do fluxo de CO_2 e da velocidade de fricção (u^*) para o dia DJ 326_2003.

4.3 Balanço de energia

Os fluxos de calor sensível e calor latente, medidos pela técnica da covariância de vórtices, são mostrados na figura 14.

Para o fluxo de calor sensível (fig. 14a), as médias diárias apresentam valores máximos entre novembro e dezembro ($56,96 \text{ Wm}^{-2}$ e $53,60 \text{ Wm}^{-2}$) e mínimos em fevereiro e março ($2,38 \text{ Wm}^{-2}$ e $5,39 \text{ Wm}^{-2}$)

O fluxo de calor latente (fig. 14b) apresentou maiores valores médios diários entre janeiro e fevereiro, mantendo-se sempre com valores positivos, consequência de irrigação do campo de arroz. Obteve-se maiores picos em DJ28_2004 e DJ49_2004, $191,41 \text{ Wm}^{-2}$ e $191,69 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente.

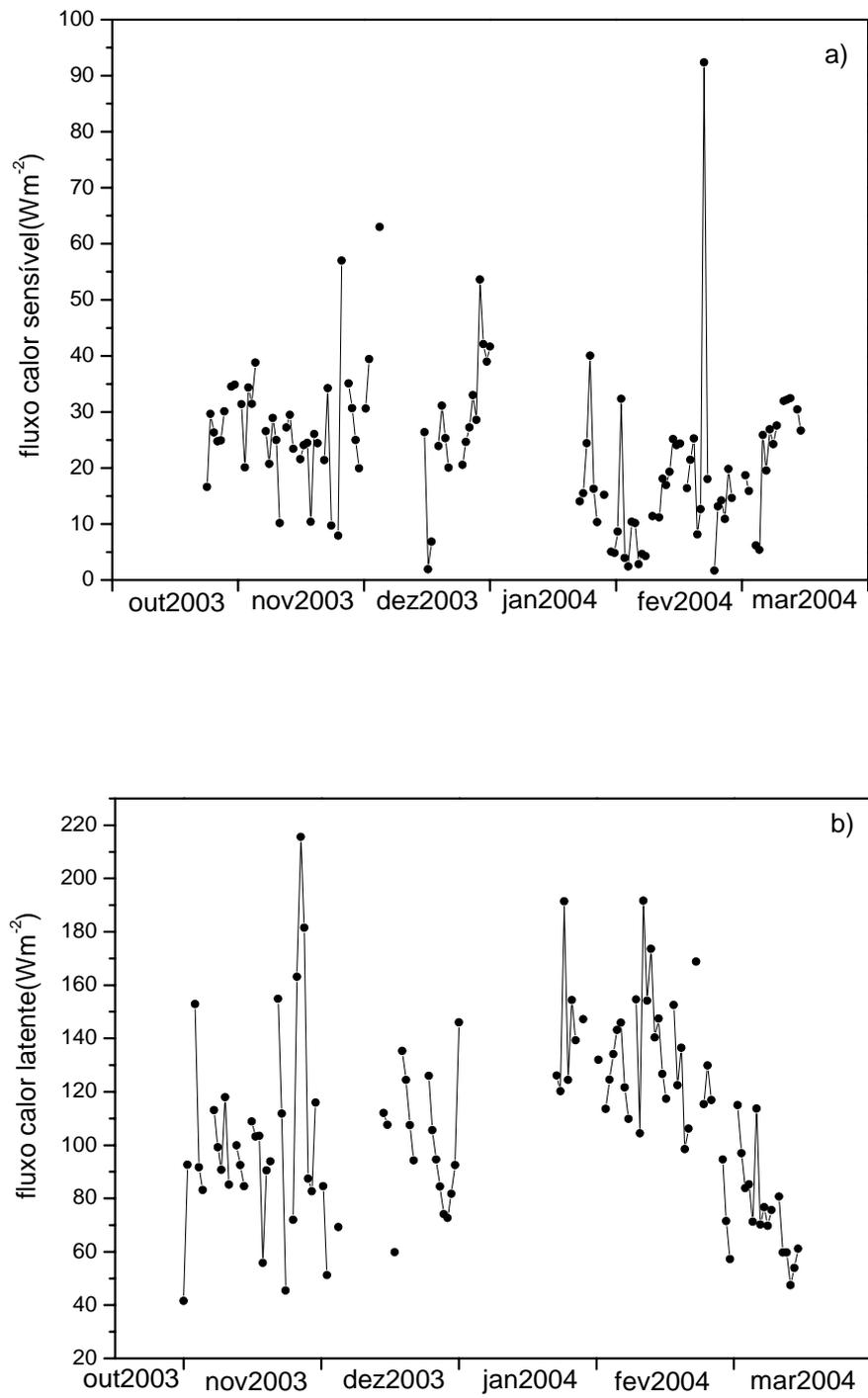


Figura 14 – Médias diárias dos fluxos de calor sensível (a) e calor latente (b) para o período analisado.

Como consequência de se obter dois dias com médias diárias elevadas de fluxo de calor latente, analisou-se o comportamento do balanço de energia para esses dois casos.

A estimativa do balanço de energia na superfície é uma das maneiras de verificar a qualidade dos fluxos turbulentos de energia.

Em 1994, no Workshop de Grenoble, o balanço de energia foi o principal tópico, discutindo o uso de dados experimentais para estimar o fechamento do balanço de energia (Foken e Oncley, 1995), na qual normalmente a soma da radiação líquida e do fluxo de calor do solo era quase sempre maior que a soma do fluxo de calor sensível e latente.

Teoricamente, o balanço de energia na superfície é expresso por:

$$R_n + G = H + LE \quad (13)$$

onde R_n é a radiação líquida, G é o fluxo de calor do solo, H é o fluxo de calor sensível e LE é o fluxo de calor latente, tudo em Wm^{-2} .

Os valores medidos dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) foram determinados usando a técnica de covariâncias de vórtices. Esta técnica quantifica diretamente a troca de massa e energia entre superfície e atmosfera, medindo o transporte turbulento de vapor d'água e calor (Baldocchi et al., 1988). A radiação líquida (R_n) e o fluxo de calor do solo (G) foram medidos pelo radiômetro (net radiometer) e pelo sensor de fluxo do solo (Hukseflux Thermal Sensors HFT3), respectivamente.

Encontrar um fechamento do balanço de energia indica desempenho satisfatório dos sistemas e confiabilidade nos dados medidos. Como as medidas de radiação líquida, fluxo de calor do solo, fluxo de calor sensível e latente são realizadas por métodos diferentes, o fechamento do balanço de energia indica se está havendo concordância entre as mediadas. Nem sempre é possível encontrar resultado satisfatório, isto porque podem ocorrer erros de medidas especialmente os que usam a técnica de covariância de vórtices, que normalmente subestimam os fluxos turbulentos, assim como as diferentes camadas em que são colocados o sensor de radiação líquida

(alguns metros acima da superfície) e o de fluxo de calor do solo (alguns centímetros abaixo da superfície), e ainda a heterogeneidade da superfície (Culf et al., 2004).

As figuras 15 e 16 mostram o balanço de energia para os dias DJ28_2004 e DJ49_2004, respectivamente.

As figuras 15a e 16a mostram o que relata a literatura, que todas as componentes do balanço de energia são positivas durante o dia e decaem à noite. Neste sítio, o fluxo de calor latente tem magnitude maior que o fluxo de calor sensível, devido a presença de água no solo (irrigação). Outro aspecto importante observado nestas figuras, é o comportamento do fluxo de calor do solo. Observa-se que G começa a crescer após as 15h GMT (12h local), devido à cobertura de água presente na superfície, o que ocasiona um intervalo de tempo maior para evaporar a água e consequentemente retardando a evolução de G , pois na literatura G começa a crescer ao nascer do Sol, devido a emissão de radiação para a superfície e decresce ao pôr-do-sol (Oke, 1987).

As figuras 15b e 16b mostram o fechamento do balanço de energia para os dois casos (dois dias de maior média diária do fluxo de calor latente). Observa-se que para ambos os casos não foi alcançado o fechamento. Para o DJ28_2004 (fechamento de 86%) $R_n + G$ foi maior que $H + LE$, provavelmente devido à cobertura de nuvens, o que afeta a evolução de H . Já para o DJ49_2004 (fechamento de 93%), $R_n + G < H + LE$.

Uma provável razão para não ter alcançado o fechamento do balanço de energia para os referidos dias, pode ser devido à subestimação dos fluxos quando aplicado o método de covariância de vórtices (H e LE), devido a pouca turbulência noturna, ou até mesmo devido ao comportamento do fluxo de calor do solo (G), ocasionado pela lâmina d'água na superfície.

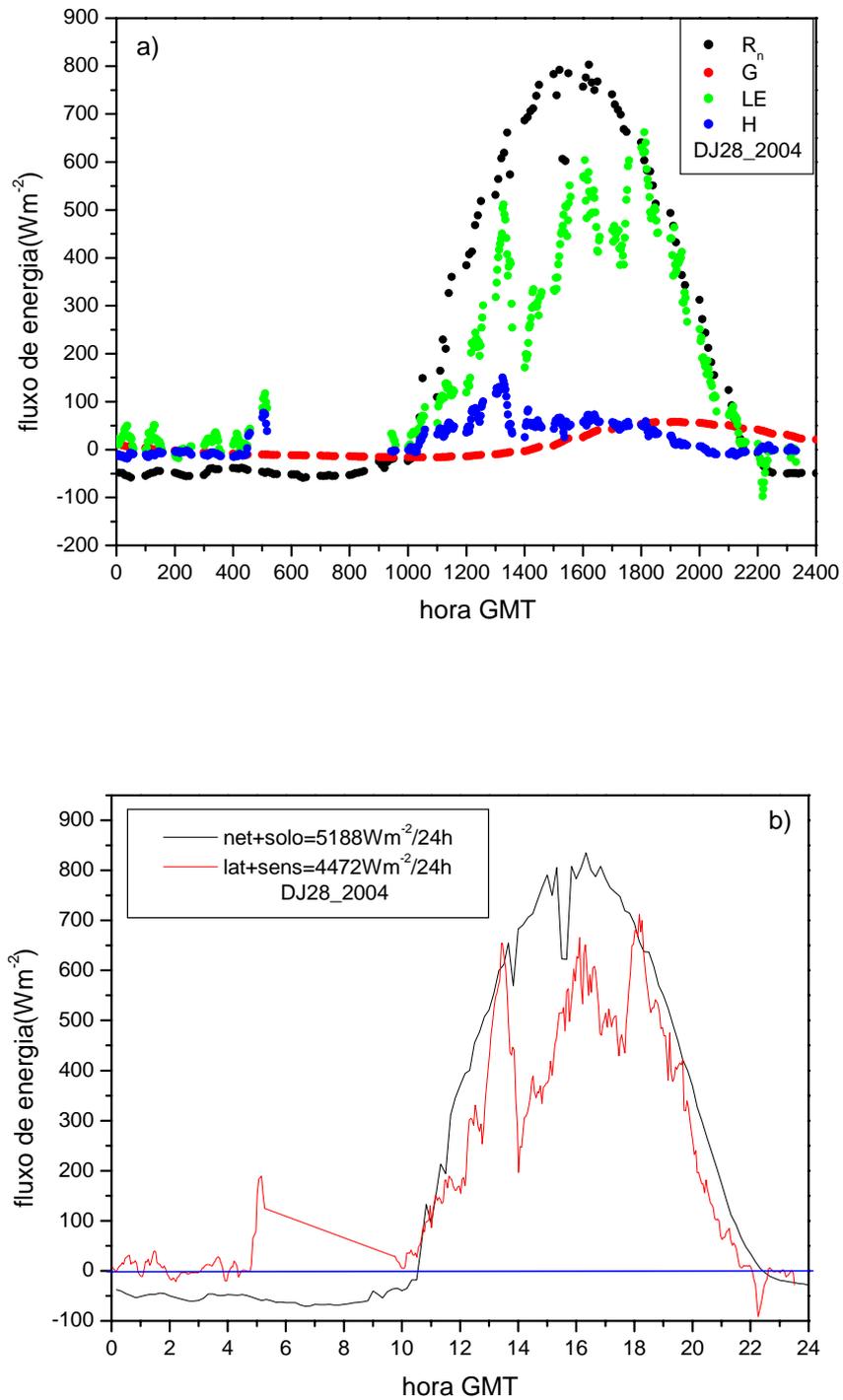


Figura15 – Fluxos de energia para DJ28_2004. a) componentes do balanço de energia, b) fechamento do balanço de energia.

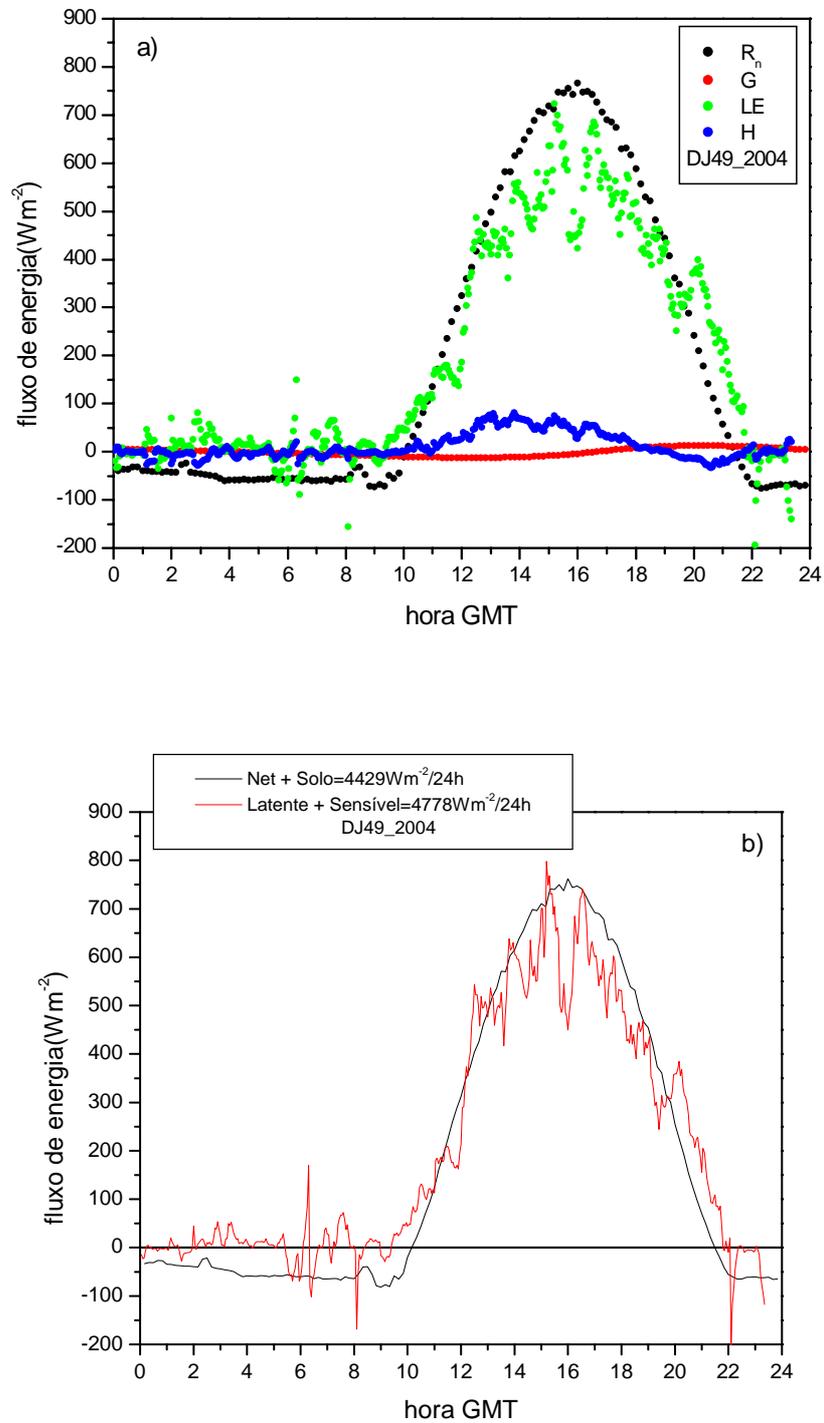


Figura 16 – Fluxos de energia para DJ49_2004. a) componentes do balanço de energia, b) fechamento do balanço de energia.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho descreve o comportamento dos fluxos de CO₂ para uma área de cultivo de arroz irrigado em Paraíso do Sul, Rio Grande do Sul, no período entre outubro de 2003 e março de 2004.

O total de CO₂ assimilado pela planta de arroz, no sítio experimental, foi de -1,38mgCO₂m⁻², mostrando que este campo agrícola agiu como um “sumidouro” de CO₂. A curva de NEE encontrada, foi provavelmente, em valores absolutos, subestimada, devido a pouca turbulência noturna, verificada em alguns períodos da análise dos dados. A taxa de respiração foi provavelmente subestimada devido a pouca turbulência noturna ou até mesmo pelo intervalo utilizado para calcular os fluxos (30 min). Alguns autores (Massman e Lee, 2002) sugerem janelas maiores do que 30 min, outros estudos (Acevedo et al., 2006) demonstram que, em condições de pouca turbulência, os fluxos são adequadamente calculados com janelas da ordem de alguns minutos.

Maiores fluxos negativos de CO₂ foram encontrados no mês de janeiro de 2004, atingindo um pico máximo de -0,47mgCO₂m⁻²s⁻¹, mostrando que é neste período que a planta absorve maior quantidade de CO₂ durante o dia e libera menor quantidade a noite.

O comportamento do fluxo de CO₂ nas diferentes fases da cultura, mostrou um fluxo positivo durante a noite, quando a planta emite CO₂ para a atmosfera, e um fluxo negativo logo após o nascer do sol, devido a absorção de CO₂ atmosférico pela planta. Durante o dia quando a temperatura cresce, chegando a um pico de 30°C em janeiro de 2004, o fluxo de CO₂ atinge um máximo de -1,1mgCO₂m⁻²s⁻¹, demonstrando que a elevação da temperatura favorece a fotossíntese.

Em noites em que o u_{*} foi pequeno, os valores dos fluxos de CO₂ indicaram que a planta estava absorvendo CO₂ atmosférico e não o emitindo. Isso nos leva a supor que o fluxo de CO₂, nestas condições, foi subestimado, o que torna questionável a aplicação do método de correlação de vórtices.

A correção de Webb na curva da NEE e se encontrou valores menores que 1%, o que neste caso, é irrelevante, pois não modificou a análise do saldo líquido de CO_2 .

Neste trabalho, em uma área de arroz irrigado, o valor calculado da NEE foi aproximadamente 60% do valor encontrado por Sakai et al. (2004) para uma cultura não irrigada em Santarém (PA). Também o resultado está em conformidade com o estudo de Campbell et al. (2001), no Texas (EUA), na qual valores máximos de NEE foram encontrados na fase reprodutiva.

A partir da análise do fluxo de calor latente, na qual se obteve dois dias com médias diárias superiores aos demais, observou-se o balanço de energia. Todas as componentes do balanço de energia foram positivas durante o dia e decaíram a noite. O fluxo de calor do solo (G) aumentou após as 15h GMT (12h local), devido a cobertura de água presente na superfície, o que dificulta a evaporação, conseqüentemente retardando a evolução de G . Para ambos os casos (DJ28_2004 e DJ49_2004), não foi alcançado o fechamento do balanço de energia. Para DJ28_2004: $R_n + G > H + LE$ (fechamento de 86%), provavelmente devido à cobertura de nuvens, que por sua vez afeta a evolução de H , e para DJ49_2004: $R_n + G < H + LE$ (fechamento de 93%). Como provável razão a este fato, pode ser a subestimativa dos fluxos quando aplicado o método de covariância de vórtices ou devido ao comportamento do fluxo de calor do solo (G).

6 TRABALHOS FUTUROS

Um dos aspectos importantes deste trabalho é que ele claramente indica estudos futuros. A suposição de superestimativa da NEE aponta a necessidade de investigação da taxa de acumulação e assim como do fluxo do solo. Para tanto se necessita repetir o experimento com sensores de concentrações de CO_2 entre o solo e os sensores de turbulência, assim como sensor de fluxo de solo (figura 17).

A janela de análise de dados também requer análise adicional. Em condições de pouca turbulência intervalos de 30 min são inadequados.

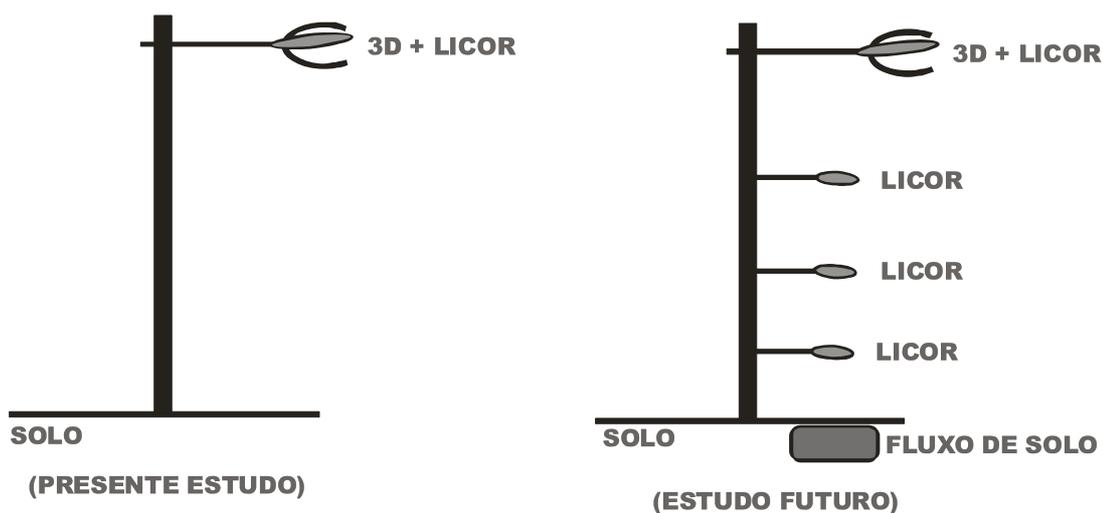


Figura 17 - Ilustração dos sensores no presente estudo (a) e para estudos futuros (b).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEVEDO, O.C. et al. Intermittency and the exchange of scalars at the nocturnal boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, Holanda, v. 119, p. 41-55, 2006.

ARAÚJO, A.C. et al. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research**. v.107, p. 58-1 – 58-20, 2002.

ARTAXO, P. As mudanças climáticas globais e a Amazônia. **Ciência Hoje**. Rio de Janeiro, RJ, v.35,n.206, p.40-42, jul. 2004.

ARROZ IRRIGADO: RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS DA PESQUISA PARA O SUL DO BRASIL / SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO; IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, XXVI REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 2005, Santa Maria. Anais...Santa Maria:SOSBAI, 2005. 159p.

BALDOCCHI, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, 9., p.479-492, 2003.

BALDOCCHI, D.D. et al. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**. V.2, p. 159-168,1996.

BALDOCCHI, D.D.; HINCKS, B.B.; MEYERS, T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, v.69,n.5,p.1331-1340, 1988.

CAMPBELL, C.S. et al. Diel and seasonal variation in CO₂ flux of irrigated rice. **Agricultural and Forest Meteorology**, 108, p. 15-27, 2001.

CULF, A.D.; FOKEN, T.; GASH, J.H.C. The energy balance closure problem, in: vegetation, water, humans and the climate. A new perspective on an interactive system, edited by: Kabat,P. et al., **Springer**, Berlin, Heidelberg, p.159-166, 2004.

DAVIDSON, E.A.; HIRSCH, A.I. Fertile Forest Experiments. **Nature**.v.411, p.431-433,2001.

FAN, S.M. et al. Atmosphere-Biosphere Exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon. **Journal of Geophysical Research**. v.95, n. D10 (Sept.), p. 16851-16864, 1990.

FALKOWSKI, P. et al. The global carbon cycle: a test of our know ledge of Earth as a system. **Science**. v. 290, p. 291-296, 2000.

FOKEN, T.; ONCLEY, S.P. Instrumental and methodical problems of land surface flux measurements. Results of the workshop. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, 76, p. 1191-1193, 1995.

FISCH, G. **Camada Limite Amazônica**: aspectos observacionais e de modelagem. 1995. Tese (Doutorado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, SP, 1995.

FÓRUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: guia de informação, 2002, Brasília. Tradução: Thiago Costa Serra. Anais... Brasília: Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002, 1. ed., 116p.

GOULDEN, M.L. et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Ecology**. v.2, p. 169-182, 1996.

GUERRA, L.C. et al. Producing more rice with less water. **International Water Management Institute**, SWIM paper 5, 1998, 24p.

GUIMARÃES, C.M.; FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P. Como a planta de arroz se desenvolve. Encarte de informações agrônômicas, n.99, set.2002.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente e Desenvolvimento**. Trad. André Koch, Ed. Edusp, 233p. São Paulo, 1998.

HALL, D.O. & RAO, K.K. **Fotossíntese**. Ed. Pedagógica e Universitária, 89p. São Paulo, 1980.

LEE, X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 91, p.39-49, 1998.

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Tree**, v.15, p. 332-337, 2000.

MASSMAN, W.J.; LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. **Agricultural and Forest Meteorology**, 113, p. 121-144, 2002.

MILLER, S.D. et al. Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. **Ecological Applications**. V. 14, p. s114-s116, 2004.

MONCRIEFF, J.B. et al. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapor and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, v.188-189, p. 589-611, 1997.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**, 2 ed., London, E. Arnold Publ. CO., 1990.

- MORAES, O.L. et al. Fluxos turbulentos: o diálogo entre a superfície e a atmosfera. **Ciência & Ambiente**, n.34, p.115-135, 2007.
- MUDANÇA DO CLIMA. Cadernos NAE, n.3, Brasília, 2005. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Brasília, 2005, 250p.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates, 2nd Edition**. London: Routledge, 1987.
- PINTO, L.D.V. de O. **Fluxos de energia sobre uma floresta tropical na Amazônia**. 2003. Tese (Mestrado em Meteorologia) – USP, São Paulo, SP, 2003.
- RODHE, H.; CHARSON, R.; CRAWFORD, E. Svante Arrhenius and the greenhouse effect. **Ambio**. V. 6, v. 1, p. 2-5, 1997.
- SAITO, M. et al. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. **Agricultural and Forest Meteorology**, 135, p. 93-109, 2005.
- SAKAI, R.K.; Fitzjarrald, D.R.; Moore, K.E. Importance of low-frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces. **Journal of Applied Meteorol.**, 40, p. 2178-2192, 2001.
- SAKAI, R.K. et al. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**, 10, p. 1-13, 2004.
- SANTOS, E.O. dos. **Contribuição ao estudo do fluxo de dióxido de carbono dentro da floresta Amazônica**. 1999. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- SARIEGO, J.C. **Educação Ambiental: as ameaças ao Planeta Azul**. 1. ed., Ed Scipione, 1994.
- SCARPINELLA, G.D'A. **Reflorestamento no Brasil e Protocolo de Quioto**. 2002. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- STEINMETZ, S.; MEIRELES, E.J.L. Clima. In: VIEIRA, N.R. de A.; SANTOS, A.B. dos: SANT'ANA, E.P. **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás. EMBRAPA Arroz e Feijão, p. 58-87, 1999.
- STULL, R.B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Press, 1988.
- SUN, J. et al. Transport of carbon dioxide, water vapor, and ozone by turbulence and local circulations. In: proceeding of the 13th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Dallas, TX, **American Meteorological Society**, p. 179-182, 1999.
- VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília: INMET, 2001.

VERGARA, B.S. Rice plant growth and development. In: LUH, B.S.(ed.). Rice: production and utilization. Davis: Avi, 1980. p.75-85.

WEBB, E.; PEARMAN, G.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 106., p. 85-100, 1980.

WOHLFAHRT, G. et al. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modeling. **Agricultural and Forest Meteorological**, v. 128, p. 141-162, 2005.

YOSHIDA, S. Fundamentals of rice crop science. Los Baños: IRRI, 1981, 269p.

Sites consultados:

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - <http://www.embrapa.br/>

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz – <http://www.irga.rs.gov.br/>

Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas –
<http://www.centroclima.org.br/>

CEPA – Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada – <http://cepa.if.usp.br/>

IPCC – Intergovernmental Pannel on Climate Change – <http://www.ipcc.ch/>