

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

**TROCAS DE CARBONO ATMOSFÉRICO SOBRE DOIS  
DIFERENTES SISTEMAS DE PLANTIO DE MILHO NO  
SUL DO BRASIL**

**TESE DE DOUTORADO**

**CLAUDIO ALBERTO TEICHRIEB**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

# **TROCAS DE CARBONO ATMOSFÉRICO SOBRE DOIS DIFERENTES SISTEMAS DE PLANTIO DE MILHO NO SUL DO BRASIL**

**por**

**Claudio Alberto Teichrieb**

Tese de Doutorado Apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Física , Área de Concentração em Áreas Clássicas da Fenomenologia e Suas Aplicações, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

**Doutor em Física**

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

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**TROCAS DE CARBONO ATMOSFÉRICO SOBRE DOIS  
DIFERENTES SISTEMAS DE PLANTIO DE MILHO NO SUL DO  
BRASIL**

elaborada por  
**Claudio Alberto Teichrieb**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Física**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

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

**Prof. Dr. Osvaldo Machado Rodrigues Cabral**(Embrapa)

**Prof. Dr. Roberto Lyra**(UFAL)

**Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado**(UFSM)

**Prof. Dr. Otávio Costa Acevedo**(UFSM)

Santa Maria, 6 de setembro de 2012.

## AGRADECIMENTOS

À Deus por tudo.

À Sandra Ana Bolfe minha companheira de todas as horas, por ter me apoiado em todos os momentos e por ter me dado o presente mais valioso dessa vida que é a nossa filha Ana Luiza.

À Ana Luiza, que deu mais alegria e motivação para a realização deste trabalho.

Aos meus pais Peter Teichrieb e Elfi Danecke por terem me dado a vida e condições de vive-lá e aos meus irmãos Carlos, Jaime, Janete e Fabio, por terem compartilhado os melhores momentos da vida.

Aos meus fiéis amigos de estimação Max, "† Léssie", Mégui, Tinho, Gaspar, Chico, Gepeto, Ivi, Esperança, Chiquita e Chiquinha.

Ao professor Dr. Osvaldo Luiz Leal de Moraes pela orientação, dedicação, paciência e estímulo em sua orientação e pela amizade.

A professora Dr<sup>a</sup>. Debora Regina Roberti pela co-orientação e pela amizade.

Aos professores Dr. Otávio Costa Acevedo e Dr. Gervásio Annes Degrazia pelas valiosas sugestões e pela amizade.

A todos os professores do Departamento de Física da UFSM.

Aos meus colegas do Laboratório de Micrometeorologia em especial ao Hans Rogério Zimmermann, a Janaina Viário Carneiro, ao Daniel Michelin dos Santos, ao Pablo Eli de Oliveira, ao Diogo Custódio, ao Júlio Cezar Lopes Sena, ao Virnei Silva Moreira, a Andrea Ucker Timm, e demais colegas por compartilharem seus conhecimentos e sua amizade.

À todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

À UFSM, pela oportunidade de estudo e utilização de suas instalações.

Ao INPE pela utilização de suas instalações.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado

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

### **TROCAS DE CARBONO ATMOSFÉRICO SOBRE DOIS DIFERENTES SISTEMAS DE PLANTIO DE MILHO NO SUL DO BRASIL**

AUTOR: CLAUDIO ALBERTO TEICHRIEB

ORIENTADOR: OSVALDO LUIZ LEAL DE MORAES

Data e Local da Defesa: 6 de setembro de 2012, Santa Maria.

Os sistemas agrícolas podem atuar como dreno ou fonte de carbono atmosférico, dependendo do tipo da cultura e do sistema de manejo do solo adotado. Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre os dados obtidos a partir de duas estações micrometeorológicas instaladas sobre a cultura de milho, com o objetivo de avaliar o impacto de dois sistemas de semeadura de milho (preparo convencional-PC e plantio direto-PD) na troca líquida do ecossistema dos fluxos de carbono (NEE). Os fluxos foram avaliados pelo método de covariância de vórtices turbulentos (MCV), durante o período de 156 dias da cultura do milho. Os resultados obtidos mostram que os dois sistemas de cultivo de milho atuam como dreno de  $C - CO_2$  e que há uma diferença quanto a absorção de  $C - CO_2$  entre os dois sistemas de plantio, com o PD apresentando maior troca líquida de carbono no ecossistema em relação ao PC. A maior diferença entre os sistemas ocorre na primeira metade do ciclo da cultura do milho, sendo que nos primeiros 40 dias as culturas se comportam como fonte de  $C - CO_2$ , com o PC apresentando valores maiores de emissão neste período em relação ao PD, e a partir de então a cultura se comporta como dreno de  $C - CO_2$ .

Realizou-se um estudo sobre o papel relativo das baixa frequências e dos processos turbulentos na camada limite noturna através da análise de correlações de dois pontos das componentes do vento. Verificando-se que os processos de baixa frequência dominam as correlações de dois pontos em condições de vento fraco, que as correlações verticais de dois pontos da componente lateral do vento são negativas no limite de escala de tempo muito baixa e que as propriedades estatísticas do campo turbulento são preservadas horizontalmente ao longo de distâncias para os quais as correlações de dois pontos já foram largamente reduzidos.

Palavras-chaves: NEE,  $CO_2$ , Covariância de Vórtices, Plantio Direto e Convencional

## **ABSTRACT**

Dissertação de Mestrado

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

### **ATMOSPHERIC CARBON EXCHANGES ON TWO DIFFERENT SYSTEMS OF CORN PLANTING IN SOUTHERN BRAZIL**

AUTOR: CLAUDIO ALBERTO TEICHRIEB

ORIENTADOR: OSVALDO LUIZ LEAL DE MORAES

Data e Local da Defesa: 6 de setembro de 2012, Santa Maria.

Farming systems can act as a source or sink of atmospheric carbon, depending on the type of culture and soil management system adopted. This thesis presents a comparative study between the data obtained from two micrometeorological stations installed on the corn crop, in order to assess the impact of two tillage systems for corn (conventional tillage-CT and no-till-NT) in net ecosystem exchange of carbon fluxes (NEE). The flux were evaluated by the method of eddy covariance (EC), during the 156 days of maize. The results show that the two systems of planting corn act as drain  $CO_2 - C$  and that there is a difference in the absorption of  $CO_2 - C$  between the two planting systems with a NT with higher net exchange of carbon in the ecosystem in relation to CT . The biggest difference between the systems occurs in the first half cycle of corn, and after 40 days the cultures behave as a source of  $CO_2 - C$ , with higher values of CT issue at this time in relation to NT, and from then culture behaves as  $CO_2 - C$  drain.

We conducted a study on the relative role of low-frequency and turbulent processes in the nocturnal boundary layer through the analysis of two-point correlations of wind components. Noting that the low-frequency processes dominate the two-point correlations in weak wind conditions, that the vertical two-point correlations of the spanwise component are negative at the very low time scale limit and that the statistical properties of the turbulent field are preserved horizontally over distances for which the two-points correlation have already been largely reduced.

Key-words: NEE,  $CO_2$ , Eddy Covariance, No-till and Conventional Tillage

## LISTA DE FIGURAS

3.1	Localização do sítio experimental de Cruz Alta-RS . . . . .	p. 32
3.2	Medidas das parcelas do sítio experimental de Cruz Alta-RS . . . . .	p. 32
3.3	Torre micrometeorológica sobre o sistema de plantio direto . . . . .	p. 33
3.4	Torre micrometeorológica sobre o sistema de plantio convencional . . . . .	p. 34
3.5	Ilustração da intercomparação de sensores no Sítio experimental Cruz Alta	p. 38
4.1	Média diária da temperatura do ar no Sítio experimental Cruz Alta . . . . .	p. 39
4.2	Média mensal da temperatura do ar e da normal climatológica para o período da cultura do milho no sítio de Cruz Alta . . . . .	p. 40
4.3	Média diária da precipitação e umidade volumétrica de água no solo no Sítio experimental Cruz Alta . . . . .	p. 41
4.4	Média mensal da precipitação e da normal climatológica para o período da cultura do milho no sítio de Cruz Alta. . . . .	p. 41
4.5	Variação da radiação solar global e fotossinteticamente ativa no Sítio experimental Cruz Alta . . . . .	p. 42
4.6	Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção, para toda cultura do milho . . . . .	p. 43
4.7	Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção, para a fase vegetativa jovem da cultura do milho . . . . .	p. 44
4.8	Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção, para a fase vegetativa adulta da cultura do milho . . . . .	p. 44
4.9	Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção, para a fase reprodutiva da cultura do milho . . . . .	p. 44
4.10	Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção, para a fase de senescência da cultura do milho . . . . .	p. 45
4.11	Representação da contribuição relativa para o fluxo medido no Plantio Direto . . . . .	p. 46
4.12	Representação da contribuição relativa para os fluxos medidos no Plantio Convencional . . . . .	p. 46

4.13	Representação da contribuição cumulativa normalizada para os fluxos medidos no Plantio Direto . . . . .	p. 47
4.14	Representação da contribuição cumulativa normalizada para os fluxos medidos no Plantio Convencional . . . . .	p. 47
4.15	Representação da comparação da contribuição cumulativa normalizada para os fluxos medidos no Plantio Direto e Plantio Convencional . . . . .	p. 48
4.16	Fluxo de $CO_2$ com médias de meia hora . . . . .	p. 49
4.17	Fluxo de $CO_2$ separados por fase com médias de meia hora . . . . .	p. 50
4.18	Fases fenológicas, altura média e medidas do índice de área foliar para sistemas de plantio direto e convencional . . . . .	p. 51
4.19	Medidas de massa seca da folha e massa total seca da planta do milho para o plantio direto e convencional . . . . .	p. 52
4.20	Relação do fluxo de $CO_2$ noturno com o desvio da velocidade vertical do vento ( $\sigma_w$ ). . . . .	p. 53
4.21	Resposta do NEE noturno com a temperatura do ar para as diferentes fases fenológicas no PD . . . . .	p. 55
4.22	Resposta do NEE noturno com a temperatura do ar para as diferentes fases fenológicas no PC . . . . .	p. 55
4.23	Resposta do fluxo de $CO_2$ diurno com a radiação fotossinteticamente ativa para as diferentes fases fenológicas no PD . . . . .	p. 56
4.24	Resposta do fluxo de $CO_2$ diurno com a radiação fotossinteticamente ativa para as diferentes fases fenológicas no PC . . . . .	p. 57
4.25	Distribuição da produção primária bruta (GPP) . . . . .	p. 58
4.26	Distribuição da produção primária bruta por fases . . . . .	p. 60
4.27	Distribuição da respiração total do ecossistema (Re) . . . . .	p. 61
4.28	Distribuição da respiração total do ecossistema por fases . . . . .	p. 61
4.29	Distribuição da troca líquida do ecossistema (NEE) . . . . .	p. 62
4.30	Distribuição da troca líquida do ecossistema por fases . . . . .	p. 63

4.31	Distribuição acumulada da produção primária bruta, da respiração do ecossistema e da troca líquida do ecossistema . . . . .	p. 64
4.32	Distribuição acumulada da troca de carbono para os sistemas de plantio direto e convencional . . . . .	p. 64
4.33	Distribuição cumulativa do GPP para os sistemas de plantio direto e convencional . . . . .	p. 66
4.34	Distribuição cumulativa da Re para os sistemas de plantio direto e convencional . . . . .	p. 67
4.35	Distribuição cumulativa do NEE para os sistemas de plantio direto e convencional . . . . .	p. 68
5.1	Diagrama esquemático mostrando as duas torres de observações micrometeorológicas . . . . .	p. 72
5.2	Série temporal da velocidade vertical no nível superior da torre 1 ao longo das diferentes noites escolhidas para estudos de casos . . . . .	p. 73
5.3	Coefficientes de correlação verticais em função da escala de intensidade de turbulência $\sigma_w$ . . . . .	p. 76
5.4	Coespectro de multiresolução de correlação das componentes do vento vertical medido em dois pontos separados verticalmente em cada uma das Torres . . . . .	p. 77
5.5	Coespectro de multiresolução de correlação das componentes do vento longitudinal medido em dois pontos separados verticalmente em cada uma das Torres . . . . .	p. 78
5.6	Coespectro de multiresolução de correlação das componentes do vento lateral medido em dois pontos separados verticalmente em cada uma das Torres . . . . .	p. 79
5.7	Coespectro de multiresolução de correlação das componentes do vento lateral medido em dois pontos separados verticalmente em cada uma das Torres, mas para apenas uma pequena escala de tempo . . . . .	p. 80
5.8	O mesmo que na figura 5.3, mas para as correlações horizontais . . . . .	p. 81
5.9	Coespectro de multiresolução de correlação para as componentes vertical, longitudinal e lateral do vento . . . . .	p. 82

5.10	Comparação entre as correlações de dois pontos horizontais da componente vertical do vento e a autocorrelação obtidos na Torre 1 . . . . .	p. 84
5.11	Comparação entre as correlações de dois pontos horizontais das componentes longitudinal e lateral do vento e a autocorrelação obtidos na Torre 1 . . . . .	p. 85
A.1	Intercomparação das variâncias das componentes horizontais do vento . . . . .	p. 96
A.2	Intercomparação das variâncias da componente vertical do vento e da temperatura do ar . . . . .	p. 97
A.3	Intercomparação das variâncias das concentrações de $CO_2$ e $H_2O$ . . . . .	p. 98
A.4	Intercomparação dos fluxos de $CO_2$ e momentum . . . . .	p. 99
A.5	Intercomparação dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) . . . . .	p. 100

## LISTA DE TABELAS

- 4.1 Tabela comparativa de valores máximos da GPP, da  $R_e$  e do NEE entre diferentes sítios experimentais . . . . . p. 59
- 4.2 Tabela comparativa de valores acumulados da GPP, da  $R_e$  e do NEE entre diferentes sítios experimentais . . . . . p. 65

# CONTEÚDO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 Camada Limite.....	14
2.2 Fluxos turbulentos.....	16
2.3 Fluxos noturnos .....	19
2.4 Parâmetros de rugosidade aerodinâmica sobre superfícies vegetadas.....	20
2.5 Fenologia .....	20
2.6 Trocas de dióxido de carbono entre o ecossistema e a atmosfera.....	21
2.7 Radiação Solar .....	24
2.8 Sensores .....	26
2.8.1 Sensor de vento.....	27
2.8.2 Sensor de concentração de $CO_2$ e $H_2O$ .....	28
2.8.3 Sensor de radiação .....	28
2.8.4 Fluxo e umidade do solo.....	29
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
3.1 Descrição do Sítio Experimental .....	31
3.2 Sistemas de Medidas.....	34
3.2.1 Instrumentação .....	34
3.2.2 Método de Covariância dos Vórtices .....	35
3.2.3 Representatividade espacial do Sensor .....	35
3.2.4 Tratamento dos dados .....	36
3.2.5 Medidas fenológicas .....	37
3.2.6 Intercomparação de sensores .....	38
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>

4.1 Condições climáticas .....	39
4.2 Representatividade espacial do sensor para o MCV .....	45
4.3 Fluxo de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) .....	48
4.4 Biomassa e índice de área foliar .....	50
4.5 Determinação do filtro de $\sigma_w$ .....	53
4.6 Separação do fluxo de $CO_2$ em GPP, NEE e $R_e$ .....	54
4.7 Evolução do GPP, da $R_e$ e do NEE na cultura do milho .....	57
<b>5 CARACTERIZANDO O PAPEL RELATIVO DAS BAIXAS FRE- QUÊNCIAS E DOS PROCESSOS TURBULENTOS NA CAMADA LIMITE NOTURNA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES DE DOIS PONTOS DAS COMPONENTES DO VENTO.....</b>	<b>70</b>
5.1 Observações e Métodos .....	72
5.1.1 Dados .....	72
5.1.2 Metodologia .....	73
5.2 Correlações Verticais .....	75
5.2.1 Dependência da intensidade de turbulência .....	75
5.2.2 Decomposição de escala .....	76
5.3 Correlações Horizontais .....	80
5.3.1 Dependência da intensidade de turbulência .....	80
5.3.2 Decomposição de escala .....	82
5.3.3 Autocorrelação e Hipótese de Taylor .....	83
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>89</b>
<b>Apêndice A – Intercomparação de Sensores .....</b>	<b>95</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o aquecimento global devido à interferência humana nos ecossistemas naturais através de desmatamentos, queimadas, aumento do uso de combustíveis fósseis, mudança no uso da terra, preparo intensivo do solo, cultivo de arroz em solo inundado, etc., proporcionam um aumento da concentração dos gases dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ) e clorofluorcarbonos ( $CFC's$ ) na atmosfera.

Esses gases de efeito estufa existem naturalmente na atmosfera, porém este aumento de concentração causa um forçante radioativo positivo que tende a aquecer a baixa atmosfera e a superfície terrestre. Do ponto de vista científico e global, mudanças climáticas são causadas por forças naturais e antropogênicas (IPCC, 2001).

O aumento da concentração de  $CO_2$  na atmosfera se dá a partir do resultado dos desequilíbrios entre as fontes de emissão de  $CO_2$  e dos sumidouros de retirada de  $CO_2$  da atmosfera (BALDOCCHI et al., 2001). Desta forma há uma necessidade de se quantificar a contribuição de cada fonte para se identificar e entender os processos geradores dos gases do efeito estufa, bem como seus fatores controladores. A compreensão dos processos físicos e biológicos entre a superfície e a atmosfera é de grande importância para o meio científico, com destaque para os fluxos de dióxido de carbono.

O dióxido de carbono é o mais importante gás de efeito estufa resultante de ações antropogênicas (IPCC..., 2007). A emissão ou absorção de  $CO_2$  pelos diferentes ecossistemas, que ocorre na superfície, é governada pelos processos característicos da chamada Camada Limite Planetária (CLP). Segundo Stull (1988), a CLP é definida como a região da atmosfera que fica em contato direto com a superfície e responde às forçantes superficiais com uma escala de tempo da ordem de uma hora ou menos. Estes forçantes podem ser térmicos, devido ao aquecimento ou resfriamento da superfície, ou mecânicos, devido ao cisalhamento do vento causado pelo atrito com a superfície. A CLP tem como uma de suas principais características a sua natureza turbulenta.

O aumento das pesquisas sobre o problema das alterações climáticas nos últimos 15-20 anos tem aumentado a demanda por medições confiáveis, de absorção e emissão de dióxido de carbono por florestas e culturas agrícolas, de evaporação e os fluxos dos gases de efeito estufa. As medições dessas quantidades são muito complexas e necessitam de conhecimentos micrometeorológicos abrangentes. A maioria dos métodos de medições é baseada em simplificações e condições especiais, e, portanto, sua implementação não é trivial.

Neste trabalho, medidas para quantificar a troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema (net ecosystem exchange (NEE)), foram feitas sobre a cultura do milho para dois sistemas de plantio, um o de semeadura ou plantio direto (PD) que constitui no estabelecimento de culturas diretamente através dos resíduos culturais mantidos sobre a superfície do solo e outro o preparo convencional (PC) que constitui de operação de grade pesada ou arado de discos seguido de grade leve. O PD é o sistema mais usado no cultivo do milho, principalmente nas grandes áreas e o PC é usado na abertura de novas áreas e em outras que estavam estabelecidas pastagens. Entre os pequenos produtores ainda predomina o sistema convencional, embora seja crescente a adoção do PD. O PD tem sido proposto como um sistema que apresenta-se como um dreno de  $CO_2$  atmosférico.

As medidas foram realizadas no Sul do Brasil, na região de Cruz Alta - RS em todo o período de crescimento da cultura na estação do verão no hemisfério sul (2010/2011). Assim, iniciou-se a pesquisa para uma melhor compreensão das trocas de carbono em dois diferentes sistemas de cultivos de milho.

A importância em se fazer um estudo sobre diferentes sistemas de plantio, reside na hipótese de que o efeito de práticas de manejo do solo (PD e PC) e tipo de cultura sobre as componentes do ciclo do carbono (o carbono fotossintetizado adicionado ao solo pelos resíduos vegetais, as emissões de carbono na forma de dióxido de carbono ( $C - CO_2$ ) e o armazenamento de carbono orgânico no solo) no sistema solo-planta-atmosfera tem efeitos distintos quanto ao fluxo de  $CO_2$  do solo para a atmosfera. Dessa forma, é necessário um melhor entendimento neste processo, a fim de identificar um sistema com potencial de reter o carbono atmosférico no solo e contribuir para a mitigação do aquecimento global.

Foi utilizado o método de covariância de vórtices turbulentos (MCV) em duas torres micrometeorológicas com sensores instalados em dois níveis (2,50 e 5,00 m) para as medidas dos fluxos de longo prazo das emissões de  $CO_2$ , vapor de água e energia. O método de covariância de vórtices mede a troca líquida de  $CO_2$  do ecossistema, o balanço entre o carbono emitido e absorvido pela respiração do ecossistema (Re) e a produção primária bruta (GPP – gross primary production). A separação do NEE em suas componentes ajuda em um melhor entendimento no ciclo de carbono terrestre.

Este trabalho é uma contribuição para a avaliação da absorção ou emissão de  $C - CO_2$  em dois sistemas de manejo do solo, o plantio convencional (aração + gradagem + semeadura) e o plantio direto (semeadura), para a cultura do milho.

O milho (*Zea mays L.*) é um cereal cultivado em grande parte do mundo, sendo extensivamente utilizado como alimento humano ou ração animal, devido às suas qualidades

nutricionais. O milho é um alimento essencialmente energético, pois seu principal componente é o amido. O grão é transformado em óleo, farinha, amido, margarina, xarope de glicose e flocos para cereais matinais. É cultivado em diversas regiões do mundo, sendo o maior produtor mundial os Estados Unidos, seguido pela China. De acordo com o Ministério da Agricultura, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, sendo que na safra de 2011/2012 a produção chegou a 69,4 milhões de toneladas de milho conforme o levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012), com 34,9 milhões de toneladas na primeira safra e 34,5 milhões de toneladas na segunda safra.

Cultivado em diferentes sistemas produtivos, o milho é plantado principalmente nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul. Segundo a Conab (2012), os maiores estados produtores são: Paraná com cerca de 24,3% da produção nacional, seguido de Mato Grosso (19,3%), Goiás (11,9%), Minas Gerais (11,1%). O Rio Grande do Sul com 5%, aparece em 7º. Atualmente somente cerca de 5% de produção brasileira se destina ao consumo humano e, mesmo assim, de maneira indireta na composição de outros produtos. Isto se deve principalmente à falta de informação sobre o milho e à ausência de uma maior divulgação de suas qualidades nutricionais, bem como aos hábitos alimentares da população brasileira, que privilegia outros grãos.

Perdas significativas de fluxos noturnos podem ocorrer com o MCV devido a adveção (fluxos de drenagem horizontal) durante condições de pouco vento, que pode influenciar no somatório anual do NEE (AUBINET et al., 2000), de maneira que os fluxos podem ser subestimados. Baldocchi (2003), Massman e Lee (2002) apontaram a mistura turbulenta insuficiente e a existência de escoamentos de drenagem para o MCV subestimar as taxas de respiração em noites calmas. Portanto, fez-se um estudo a partir das medidas de períodos noturnos, para entender melhor os processos noturnos.

Realizou-se um segundo estudo, no qual caracteriza-se o papel relativo das baixa frequências e dos processos turbulentos na camada limite noturna através da análise de correlações de dois pontos das componentes do vento.

A análise de correlações em dois pontos entre as componentes da velocidade do vento observadas em diferentes locais tem sido usado largamente para fornecer informações sobre a estrutura tridimensional do fluxo turbulento. Tal procedimento tem sido aplicado a dados observacionais obtidos em túneis de vento usando anemometria de fio quente (SHAW et al., 1995; HUTCHINS; MARUSIC, 2007) ou velocimetria de imagem de partículas (PIV - *particle image velocimetry*) (GANAPATHISUBRAMANI et al., 2005; HUTCHINS; MARUSIC, 2007) e conjuntos de dados numéricos, originado a partir de simulações numéricas diretas

(DNS - *direct numerical simulations*) (ZHOU; ADRIAN; BALACHANDAR S. KENDALL, 1999) e simulações de grandes turbilhões (LES - *large eddy simulations*) (SU; SHAW; PAW, 2000; CAELOTTI, 2002).

Recentemente Hutchins et al. (2012) realizaram uma análise detalhada das correlações de dois pontos observadas na camada limite atmosférica, mostrando que seus resultados estão em concordância quando comparados com dados atualmente conhecidos originados a partir do laboratório. Estudos observacionais anteriores de correlações de dois pontos na camada limite atmosférica enfatizaram a função de coerência espacial e como decai com a separação espacial entre os dois pontos (PANOFSKY et al., 1974; TONG; WYNGAARD, 1996; SCHLEZ; INFELD, 1998).

Os estudos citados acima, concentram-se na estrutura turbulenta do fluxo. Por esta razão, eles geralmente filtram qualquer forçante de grande escala sobre as componentes do vento.

Isso é particularmente importante quando são utilizados dados da camada limite atmosférica. Com essa motivação, Hutchins et al. (2012) filtrando processos de grande escala que apareceram como a média sobre uma matriz horizontal de sensores e, além disso, considerando apenas os dados obtidos em estabilidade atmosférica quase neutra. A importância das baixas frequências, processos não turbulentos na camada limite atmosférica, tem sido cada vez mais reconhecida nos últimos anos (MAHRT, 2009). Na verdade, esses processos são conhecidos por afetar o balanço total de escalares de modo que sua consideração melhora o fechamento do balanço (ACEVEDO; MAHRT, 2010; KIDSTON et al., 2010). Particularmente, os processos de baixa frequência têm um papel importante na camada limite noturna muito estável.

No presente estudo, dados da camada limite atmosférica noturna são usados para fornecer informações sobre as correlações espaciais horizontais e verticais das três componentes do vento. A análise se concentra em temas específicos, não totalmente dirigidos por estudos observacionais anteriores de correlações de dois pontos na camada limite atmosférica. O primeiro é a dependência da correlação com a intensidade da turbulência. O segundo e mais relevante aspecto analisado no que se refere a dependência da escala de tempo com as correlações de dois pontos. Isso é feito usando a decomposição de multiresolução, uma técnica que permite identificar a contribuição de eventos que ocorrem em diferentes escalas temporais de um dado sinal.

Essa análise permite identificar como diferentes estruturas de fluxo contribuem para as correlações de dois pontos observadas. Isto é particularmente relevante na camada limite atmosférica noturna, pois diversos processos, tais como intermitência turbulenta (SUN et

al., 2004; ACEVEDO et al., 2006), meandro (ANFOSSI; DEGRAZIA; GOULART, 2005; MAHRT, 2007; DEGRAZIA et al., 2008), ondas de gravidade (LALAS; EINAUDI, 1976; NAPPO, 2002) e outros podem coexistir, originando relevantes fluxos de baixa frequência, às vezes, também considerados como fluxos de mesoescala ou submeso (MAHRT, 2009; BELUSIC; GUTTLER, 2010).

Além deste Capítulo introdutório, a tese está dividida como segue: No Capítulo 2 é apresentado um aporte teórico, na qual procura-se abordar alguns aspectos qualitativos e quantitativos do sistema superfície-planta-atmosfera; No Capítulo 3, faz-se uma descrição da metodologia utilizada para o desenvolvimento desta tese, bem como a descrição do sítio experimental; No Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos; No Capítulo 5 faz-se uma análise dos processos turbulentos e de baixa frequência da camada limite noturna e no Capítulo 6 as conclusões.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A descrição de alguns elementos teóricos faz-se necessária, uma vez que proporcionará um melhor entendimento do conteúdo deste estudo, bem como registrará informações de nível didático-científico úteis ao leitor.

### 2.1 Camada Limite

Os movimentos atmosféricos possuem uma variedade de escalas que se estende desde aquelas da ordem de alguns milímetros até aqueles que apresentam a dimensão da circunferência terrestre e/ ou a profundidade da própria atmosfera. Em termos temporais as escalas destes movimentos variam desde frações de segundo até meses e anos. Estas escalas são usualmente classificadas em três grandes grupos: micro, meso e grande escala. Não raro usa-se os termos local, regional ou global para a subdivisão dos movimentos atmosféricos (MORAES, 2010).

A atmosfera que envolve o planeta Terra apresenta uma série de fenômenos que ocorrem próximo a sua superfície na chamada camada limite planetária (CLP) ou atmosférica (CLA), devido ao seu movimento permanente, tais como os deslocamentos de massas de ar (os ventos) e as precipitações, tendo como fonte principal de energia a radiação solar (aquecimento diferencial do sol). A água presente na atmosfera, nos três estados, exerce uma função termoreguladora de extrema importância, pela absorção, reflexão ou transmissão de energia sob forma de calor sensível bem como pela absorção ou liberação de calor latente, nas mudanças de estado.

Desta forma, é importante compreender o comportamento da atmosfera, seja pelo seu monitoramento climático, através da instalação de instrumentos que são capazes de registrar as diferentes variáveis atmosféricas, ou pela simulação da dinâmica da atmosfera através de modelos numéricos, ou ainda pela medidas micrometeorológicas de alta frequência para o entendimento dos processos turbulentos que ocorrem na atmosfera.

Para o estudo dos processos físicos característicos que ocorrem na atmosfera, é necessário criar condições de contorno nos quais estão contidas as informações que queremos analisar. Assim, divide-se a atmosfera em duas camadas principais: a camada limite atmosférica com a altura variável, podendo ter de algumas dezenas de metros até 1 a 2 km de altura, onde ocorrem as interações entre a superfície e a atmosfera e, acima desta, a chamada atmosfera

livre, onde os efeitos da superfície são pouco sentidos e predominam escoamentos laminares, sendo os processos de dispersão dominados por difusão molecular e transporte pelo vento médio.

A CLA é definida como a região da atmosfera que fica em contato direto com a superfície e responde às forçantes superficiais com uma escala de tempo da ordem de uma hora ou menos (STULL, 1988). Estes forçantes podem ser térmicos, devido ao aquecimento ou resfriamento da superfície, ou mecânicos, devido ao cisalhamento do vento causado pelo atrito com a superfície. A CLP tem como uma de suas principais características a sua natureza turbulenta. Portanto, a CLA é a região que é diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre, sendo sua extensão vertical variável no tempo e no espaço. Durante o período noturno (Camada Limite Estável - CLE) ela pode não ser superior a uma ou duas centenas de metros de altura, e durante o período diurno (Camada Limite Convectiva - CLC) ela pode se estender até alguns quilômetros. A altura da CLA, varia ao longo do dia, e também ao longo do ano. Em um mesmo local ela é diferente no inverno e no verão. Ela também é diferente para diferentes locais, em regiões tropicais, por exemplo, a CLA é distinta daquela observada em regiões temperadas, sobre os oceanos é diferente que sobre o continente, sobre o deserto possui pouca, ou quase nenhuma, semelhança com a observada sobre áreas com vegetação ou urbanas (ZIMERMANN, 2005).

A região de grande interesse é a Camada Limite Superficial (CLS), que é a porção inferior da CLA representando cerca de 10% desta, na qual o efeito de Coriolis e a variação horizontal da pressão podem ser ignorados e o tensor cisalhamento possui uma componente principal que é paralela a direção do vento (MORAES, 2010). A CLS é caracterizada por interações com a superfície através da troca de energia por processos turbulentos térmicos e mecânicos. Devido a sua pequena profundidade e por ser o local onde são realizadas a maioria das atividades humanas, o estudo dos processos físicos através da investigação experimental com torres micrometeorológicas podem ser efetuadas facilmente.

A partir das investigações na CLS, foi desenvolvida a primeira ferramenta teórica para o estudo da CLA, conhecida como Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (KAIMAL; FINNIGAN, 1994; STULL, 1988), que foi fundamental para o surgimento subsequente de teorias que possibilitaram o estudo da CLA como um todo. As investigações também possibilitaram a caracterização dos parâmetros físicos que permitem descrever a estrutura dinâmica e termodinâmica da camada limite. É na CLS que ocorrem mudanças significativas de quantidade de movimento, calor e massa, que são transferidas para toda a CLA através de mecanismos de transferência turbulenta.

## 2.2 Fluxos turbulentos

O fluxo de uma propriedade em uma determinada direção é definido como a sua quantidade por unidade de tempo que passa através de uma unidade de área normal à direção. O método de covariância de vórtices (MCV), segundo (MONCRIEFF et al., 1997), é uma técnica micrometeorológica eficaz para monitorar das trocas gasosas e de escalares entre a biosfera e a atmosfera. Assim, o MCV (EC - *Eddy Covariance* - em inglês) é o método mais utilizado para estimar as trocas turbulentas na CLP.

Através de amostragens dos movimentos ascendentes e descendentes, que transportam escalares específicos, o MCV determina a diferença líquida destes escalares através de uma interface. É um método de medição direta, sem qualquer aplicação de constantes empíricas (BUSINGER, 1986), (FOKEN; ONCLEY, 1995), (KAIMAL; FINNIGAN, 1994), (LEE; MASSMAN; LAW, 2004), porém a derivação da equação matemática baseia-se em uma série de simplificações, para que o método possa ser usado somente se esses pressupostos são exatamente cumpridos.

Segundo Foken (2008) a qualidade das medidas depende mais das condições de aplicação e o uso exato das correções do que no atual sistema de medição altamente sofisticado disponíveis. Portanto, a experiência e o conhecimento experimental do caráter especial da turbulência atmosférica têm uma alta relevância. A maioria das condições limitantes são superfícies horizontalmente homogêneas e condições de estado estacionário.

Sendo  $Q$  a concentração (massa por volume) de um escalar ( $CO_2$ ,  $CH_4$ , etc.) presente na atmosfera, a conservação da massa desse escalar, requer que

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_I + \underbrace{U_j \frac{\partial Q}{\partial x_j}}_{II} = \underbrace{v_Q \frac{\partial^2 Q}{\partial x_j^2}}_{III} + \underbrace{S_Q}_{IV} \quad (2.1)$$

onde  $v_Q$  é a difusividade molecular do constituinte  $Q$ .  $S_Q$  é o termo de fonte dos processos restantes não citados na equação, tal como reações químicas. A interpretação física de cada termo é:

*I* termo de armazenamento.

*II* advecção.

*III* difusão molecular.

*IV* termo fonte.

Para um escalar ou quantidade  $Q$  o fluxo é dado por:

$$F = \overline{\rho_a w Q}, \quad (2.2)$$

Nesta equação  $Q = \rho_Q / \rho_a$  é a razão de mistura da quantidade  $Q$ ,  $\rho_Q$  é a sua densidade,  $\rho_a$  é a densidade do ar e  $w$  é a componente vertical da velocidade do vento. Seguindo a proposta de Reynolds (*Decomposição de Reynolds*)(STULL, 1988), separando-se os valores instantâneos das variáveis como sendo a soma de uma parte flutuante (turbulenta) e uma parte média, onde barras superiores denotam médias temporais e apóstrofos denotam as perturbações em relação ao valor médio,

$$\rho_a = \bar{\rho}_a + \rho'_a, \quad (2.3)$$

$$w = \bar{w} + w', \quad (2.4)$$

$$Q = \bar{Q} + Q'. \quad (2.5)$$

Assim:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a + \rho'_a)(\bar{w} + w')(\bar{Q} + Q')}. \quad (2.6)$$

Fazendo as respectivas multiplicações, temos:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{Q} + \bar{\rho}_a \bar{w} Q' + \bar{\rho}_a w' \bar{Q} + \bar{\rho}_a w' Q' + \rho'_a \bar{w} \bar{Q} + \rho'_a \bar{w} Q' + \rho'_a w' \bar{Q} + \rho'_a w' Q')}. \quad (2.7)$$

Aplicando as regras das médias de Reynolds, que diz que a média da flutuação é nula, temos que  $\overline{\rho'} = \overline{w'} = \overline{Q'} = 0$ , assim:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{Q} + \bar{\rho}_a w' Q' + \rho'_a \bar{w} Q' + \rho'_a w' \bar{Q} + \rho'_a w' Q')}. \quad (2.8)$$

Supondo-se que as flutuações na densidade do ar são negligenciáveis, obtemos:

$$F = \overline{(\bar{\rho}_a \bar{w} \bar{Q} + \bar{\rho}_a w' Q')}. \quad (2.9)$$

Supondo uma situação ideal, onde o terreno é plano e homogêneo, pode-se considerar que a velocidade vertical média é nula ( $\bar{w} = 0$ ). Portanto:

$$F = \overline{\rho_a w' Q'}. \quad (2.10)$$

A equação (2.10) é a equação do fluxo turbulento de uma quantidade " $Q$ " para um terreno plano e homogêneo, conhecido como método da covariância de vórtices, uma vez que a quantidade  $\overline{w'Q'}$  representa a covariância estatística entre as variáveis  $w$  e  $Q$ .

Na maioria das medidas de  $CO_2$  com o MCV, a medida que é feita é a densidade molar ( $\rho_c$ ) do gás ao invés da razão de mistura. Variações na densidade molar podem surgir quando se adiciona ou retira se moléculas do volume de controle ou quando há variação do tamanho do volume de controle, que ocorre quando há mudança na temperatura, pressão e umidade na atmosfera. Então, em termos da densidade molar, o fluxo de  $CO_2$  ( $F_c$ ) é dado por:

$$F_c = \overline{w\rho_c} = \overline{w'\rho'_c} + \bar{w}\bar{\rho}_c. \quad (2.11)$$

O segundo termo do lado direito da equação (2.11) é o produto entre a velocidade vertical média e a densidade molar média do gás. Neste caso, a velocidade vertical média é diferente de zero e surge devido à flutuações da densidade do ar.

Segundo Webb, Pearman e Leuning (1980), quando são medidas as flutuações ou o gradiente médio da razão de mistura do constituinte em relação ao ar seco, nenhuma correção nas medidas dos fluxos é necessária. Entretanto, quando são medidas as flutuações da densidade ou gradiente médio do constituinte no ar *in situ*, são necessárias correções devido aos fluxos de calor sensível e latente.

Quando o fluxo de calor (tanto o sensível quanto o latente) é positivo, parcelas de ar mais quente e, portanto, menos densas, se elevam, enquanto parcelas de ar mais frio e mais densas descem na atmosfera. Como as parcelas de ar em elevação são menos densas que as parcelas descendentes, para haver conservação da massa é necessário que haja uma velocidade vertical média positiva. Da mesma forma, quando o fluxo de calor é negativo, parcelas de ar mais frio (mais densas) se elevam e parcelas de ar mais quente descem em direção a superfície, de modo que para haver conservação de massa é necessária uma velocidade vertical média negativa do vento.

Então, na equação (2.10), a contribuição do fluxo de  $CO_2$  associada como vento médio vertical é perdida, e uma correção torna-se necessária. Se a velocidade vertical  $w$  pudesse

ser medida com suficiente precisão, nenhuma correção seria necessária, mas na prática, a velocidade vertical média é muito pequena para ser medida corretamente pelos anemômetros, de magnitude  $< 1 \text{ mm s}^{-1}$  (BALDOCCHI, 2003).

O fluxo turbulento vertical, com a correção proposta por Webb, fica:

$$F_c = \overline{w' \rho'_c} + \frac{m_a \overline{\rho_c}}{m_v \overline{\rho_a}} \overline{w' \rho'_v} + \left( 1 + \frac{m_a \overline{\rho_v}}{m_v \overline{\rho_a}} \right) \frac{\overline{\rho_c}}{T} \overline{w' T'}. \quad (2.12)$$

Na equação 2.12,  $m_a$  e  $m_v$  são os pesos molares do ar e do seco e do vapor d'água. Na derivação da equação (2.12) são ignorados os efeitos de flutuações de pressão (MASSMAN; LEE, 2002), que pode ser significativa em condições de vento forte, as covariâncias entre temperatura e pressão (FUEHRER; FRIEHE, 2002 apud BALDOCCHI, 2003, p. 484), e a advecção (PAW et al., 2000 apud BALDOCCHI, 2003, p. 484), importante em terrenos inclinados.

### 2.3 Fluxos noturnos

Perdas significativas de fluxos noturnos podem ocorrer com o MCV devido a advecção (fluxos de drenagem horizontal) durante condições calmas que pode influenciar no somatório anual do NEE (AUBINET et al., 2000). Assim, é utilizada a chamada correção de  $u_*$  (velocidade de fricção) ou  $\sigma_w$  (desvio da velocidade do vento vertical) na qual se faz a substituição de dados de fluxos medidos durante períodos calmos por valores decorrentes de períodos com muito vento, baseado na dependência do NEE da temperatura (MASSMAN; LEE, 2002). No entanto, segundo (FARKAS et al., 2011), isso deve ser feito com cuidado, pois o  $CO_2$  respirado e em seguida acumulado abaixo do nível do sistema de medidas pode não ser removido pelo fluxo de escoamento (causado pela irregularidade dos terrenos nas medições), que pode então ser levado para fora da vegetação na manhã seguinte, e capturado pelo sistema do MCV.

Uma análise específica para cada sítio experimental tem de ser realizada, para decidir sobre a necessidade de correção de  $u_*$  e estimar um limite para a correção (LEE; MASSMAN; LAW, 2004).

No capítulo 5, apresenta-se um estudo utilizando-se apenas dados noturnos das componentes do vento, para caracterizar o papel relativo das baixas frequências e dos processos turbulentos na camada limite noturna, mediante a análise das correlações de dois pontos.

## 2.4 Parâmetros de rugosidade aerodinâmica sobre superfícies vegetadas

Investigações micrometeorológicas sobre superfícies vegetadas (florestas, culturas agrícolas, etc), requerem atenção quanto a altura do sensor, uma vez que esse fator terá influência na representatividade espacial (*footprint*) do mesmo.

Em condições de estabilidade quase neutras, a velocidade do vento  $U$  em uma altura  $z$  pode ser descrita como:

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left[ \frac{(z-d)}{z_0} \right], \quad (2.13)$$

Na equação 2.13,  $u_*$  é a velocidade de fricção ( $m s^{-1}$ );  $k$  é a constante de Von Karman (0,4) e  $d$  é o deslocamento do plano zero ( $m$ ) e  $z_0$  é o parâmetro de rugosidade.

Sobre superfícies vegetadas, os parâmetros  $z_0$  e  $d$  são afetados pela estrutura física da vegetação, tais como: altura da cultura, flexibilidade das plantas, densidade e distribuição dos ramos e folhagens e também por sua distribuição espacial (BALDOCCHI; VERMA; ROSENBERG, 1983), bem como da própria velocidade do vento mais acima (VAREJAO-SILVA, 2005).

Assim, as características de uma superfície podem ser definidas pelo comprimento de rugosidade  $z_0$  que é a altura da região adjacente ao solo onde a velocidade de vento é nula (limite inferior de validade do perfil médio) e pelo deslocamento do plano zero  $d$  que é um escalar empírico para compensar o deslocamento vertical da dissipação de momentum pelas superfícies com obstáculos (altura acima de  $z_0$  até onde não há vento).

## 2.5 Fenologia

A partir do estudo da fenologia de uma cultura, ou seja, de como a planta se desenvolve ao longo de suas diferentes fases evolutivas, podemos relacioná-las com as condições do ambiente, tais como luz, temperatura, umidade. A principal fonte de energia das superfícies vegetadas é a radiação solar, que é a grande responsável pelo processo de fotossíntese. O índice de área foliar (IAF) tem sido utilizado para caracterizar culturas do ponto de vista da interceptação e penetração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), e varia ao longo da evolução do cultivo, em consequência das atividades fotossintéticas e metabólicas da planta.

A área foliar de uma planta depende do número e do tamanho das folhas e, por consequência, do estágio de desenvolvimento da planta. O IAF pode ser definido como a razão

entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo ( $m^2 m^{-2}$ ) sendo um parâmetro importante para os estudos da estrutura da vegetação, uma vez que está associado a processos físicos como evapotranspiração, fluxos de  $CO_2$  e  $H_2O$ , interceptação da luz. Como variável biofísica, está diretamente relacionada com a transpiração e a produtividade da cultura.

Durante o desenvolvimento da cultura, a variação temporal da área foliar em geral aumenta até um limite máximo, no qual permanece por algum tempo, decrescendo em seguida, devido à senescência das folhas velhas. Como a fotossíntese depende da área foliar, o rendimento da cultura será tanto maior quanto mais rápido a planta atingir o índice de área foliar máximo e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa (PEREIRA; MACHADO, 1987).

As plantas realizam uma série de funções como, a fotossíntese, a respiração e a transpiração indispensáveis à sua sobrevivência. Estas funções, que permitem a obtenção e transporte de matéria orgânica até as células e a sua utilização na obtenção de energia, implicam trocas gasosas. Assim, durante a respiração, a planta capta oxigênio e libera dióxido de carbono; durante a fotossíntese, a planta capta dióxido de carbono e libera oxigênio; e durante a transpiração, a planta libera vapor de água. Portanto, a fotossíntese é o processo pelo qual a planta sintetiza compostos orgânicos a partir da presença de luz (faixa do visível do espectro eletromagnético), água e gás carbônico. Ela é fundamental para a manutenção de todas as formas de vida no planeta, pois todas precisam desta energia para sobreviver.

## 2.6 Trocas de dióxido de carbono entre o ecossistema e a atmosfera

A troca de  $CO_2$  no sistema superfície-atmosfera relacionada à vegetação representa o equilíbrio de vários processos. Durante o período de crescimento, o carbono é fixado na forma de biomassa aérea e radicular através de fotossíntese enquanto é perdido devido à manutenção, respiração e crescimento da planta (BONAN, 1991).

O saldo entre a fotossíntese e a respiração total da planta é conhecido como assimilação ou troca líquida de carbono. A respiração do solo é outro componente do balanço de  $CO_2$  no sistema solo-planta-atmosfera, que representa uma perda contínua de carbono pela respiração de raízes, atividades microbiológicas e oxidação do carbono, de modo geral. Este mecanismo está associado às condições de temperatura e umidade do solo, portanto, está associado à variabilidade destas variáveis atmosféricas.

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 pode ser determinado pela soma dos fluxos de  $CO_2$  medidos pelos sensores fixados na torre e pela taxa de armazenamento na camada mais abaixo (LEE, 1998):

$$NEE = F_c + \text{armazenamento} \quad (2.14)$$

Nesta equação (2.14)  $F_c$  é o fluxo de  $CO_2$  medido pelo MCV.

As trocas líquidas de  $CO_2$  entre um ecossistema e a atmosfera (NEE) pode ser particionado em: assimilação bruta de  $CO_2$  devido a fotossíntese (GPP) e a liberação de  $CO_2$  devido respiração total do ecossistema ( $R_e$ ). Assim, o NEE pode ser obtido pela soma da produção primária bruta (GPP) com a respiração do ecossistema ( $R_e$ ). Desta forma o GPP representa a assimilação de  $CO_2$  pela fotossíntese da planta e a  $R_e$  representa a respiração do solo, caule, folhas e raízes das plantas.

A seguir será apresentado o modelo para a estimativa da respiração e para a estimativa do GPP.

No período diurno, por definição, o NEE é dado por:

$$NEE = GPP - R_e \quad (2.15)$$

Para o período noturno, na qual não ocorre a assimilação de  $CO_2$  pela planta, assume-se que o GPP é igual a zero, então, temos que o NEE é igual a  $R_e$  noturna,

$$NEE = R_e \quad (2.16)$$

Para descrever a dependência entre a temperatura e a  $R_e$ , é utilizado o modelo tipo Arrhenius (LLOYD; TAYLOR, 1994) e (FALGE et al., 2001), onde a  $R_e$  noturna é dada por uma função exponencial que depende da temperatura do ar conforme a equação abaixo:

$$R_e = r_b \exp \left[ E_0 \left( \frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{ar} - T_0} \right) \right] \quad (2.17)$$

onde  $r_b$  é a respiração na temperatura de referência ( $\mu mol C m^{-2} s^{-1}$ ),  $E_0$  é a temperatura de sensibilidade ( $^{\circ}C$ ),  $T_{ar}$  é a temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ),  $T_{ref} = 15^{\circ}C$  e  $T_0 = -46,02^{\circ}C$ , obtidos de (LLOYD; TAYLOR, 1994). Os valores de  $r_b$  e  $E_0$  são definidos a partir da curva entre a  $R_e$  noturna e a  $T_{ar}$  noturna, que podem ser determinados linearizando-se a equação (2.17),

(GOERGEN et al., 2010):

$$\ln(R_e) = \ln(r_b) + E_0 \left( \frac{1}{T_{ref} - T_0} \right) - E_0 \left( \frac{1}{T_{ar} - T_0} \right) \quad (2.18)$$

Assumindo que a equação (2.18) seja:

$$\ln(R_e) = AZ + B \quad (2.19)$$

onde:

$$B = \ln(r_b) + E_0 \left( \frac{1}{T_{ref} - T_0} \right) \quad (2.20)$$

$$A = -E_0 \quad (2.21)$$

$$Z = \left( \frac{1}{T_{ar} - T_0} \right) \quad (2.22)$$

Portanto os valores das constantes  $r_b$  e  $E_0$ , são dados por:

$$E_0 = -A \quad (2.23)$$

$$r_b = \exp \left( B - \frac{E_0}{T_{ref} - T_0} \right) \quad (2.24)$$

Para estimar o GPP usa-se a equação hiperbólica retangular (FALGE et al., 2001) que utiliza a radiação fotossinteticamente ativa (PAR):

$$GPP = \frac{\alpha\beta PAR}{\alpha PAR + \beta} \quad (2.25)$$

onde  $\alpha$  é a eficiência da utilização de luz pelo dossel e representa a inclinação inicial da curva de resposta de luz ( $\mu mol C J^{-1}$ ) e  $\beta$  é a taxa máxima de  $CO_2$  absorvida pelo dossel na saturação de luz ( $\mu mol C m^{-2} s^{-1}$ ).

Conforme Goergen et al. (2010), fazendo o inverso da equação (2.25):

$$\frac{1}{GPP} = \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha PAR} \quad (2.26)$$

Uma boa aproximação para a equação (2.26) é:

$$Y = a + bX \quad (2.27)$$

onde:

$$Y = \frac{1}{GPP} \quad (2.28)$$

$$a = \frac{1}{\beta} \quad (2.29)$$

$$b = \frac{1}{\alpha} \quad (2.30)$$

$$X = \frac{1}{PAR} \quad (2.31)$$

Assim, os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser escritos como:

$$\alpha = \frac{1}{b} \quad (2.32)$$

$$\beta = \frac{1}{a} \quad (2.33)$$

## 2.7 Radiação Solar

A radiação solar é a fonte de energia, seja na forma de luz ou calor, para os processos biológicos e meteorológicos que ocorrem na superfície do planeta Terra, sendo esta energia emitida na forma de radiação eletromagnética (transporte de energia por meio de oscilações dos campos elétrico e magnético), caracterizada em termos quantitativos, por meio de sua intensidade em  $W m^{-2}$ , e qualitativo, por sua frequência (ou comprimento de onda).

A radiação solar chega em todos os comprimentos de onda ou frequências, mas principalmente entre 200 e 3000 nanômetros. O máximo de emissão se verifica no comprimento de onda de 480 nanômetros. O valor real recebido à superfície do planeta depende, dos fa-

tores astronômicos ditados pela latitude e da época do ano (em função da posição da Terra ao longo da eclíptica) e também do estado de transparência da atmosfera no local, em particular da nebulosidade.

A radiação solar incide no topo da atmosfera terrestre e ao atravessá-la, interage com seus constituintes e parte dessa radiação é espalhada em outras direções denominada de radiação solar difusa, e outra parte atinge diretamente à superfície do solo denominada de radiação solar direta. Somando a radiação solar direta com a difusa obtém-se a radiação solar global.

A produção final de matéria seca de uma planta depende da quantidade de radiação solar absorvida pelas folhas e da eficiência com que essas convertem a energia radiante em energia química, através da fotossíntese. Porém, somente uma fração do espectro solar (faixa do visível) é utilizada pelas plantas para este processo de conversão. As clorofilas e os carotenóides apresentam picos de absorção de radiação nas faixas do azul (450 *nm*) e do vermelho (650 *nm*) (SALISBURY; ROSS, 1994). Estas faixas de comprimento de onda estão contidas em uma fração da radiação global denominada radiação fotossinteticamente ativa (PAR), genericamente considerada como o fluxo de fótons entre 400 e 700 *nm* do espectro solar (MCCREE, 1972). Nesta porção do espectro ocorre excitação das moléculas de clorofila, dando início ao fluxo de energia necessário para a fotossíntese, sendo, por isso, denominada radiação fotossinteticamente ativa (RFA) (*Photosynthetically Active Radiation* - PAR) (RADIN, 2002).

Devido a presença de gases no ar, bem como de partículas sólidas e líquidas em suspensão, a energia radiante proveniente do sol em ondas eletromagnéticas, sofre alterações de direções e de intensidade, por absorção, reflexão ou transmissão. Sendo que, uma parcela dessa energia é interceptada pelo sistema Terra-atmosfera e convertida para outras formas de energia, tal como, calor e energia cinética da circulação atmosférica.

Aproximadamente 51% da energia solar que chega ao topo da atmosfera atinge a superfície da Terra. A maior parte desta energia é reirradiada para a atmosfera. Como a Terra tem uma temperatura superficial bem menor que a do Sol, a radiação terrestre tem comprimentos de onda maiores que a radiação solar, situados no intervalo infravermelho, entre 1  $\mu m$  e 30  $\mu m$ . Desta forma, a atmosfera é um absorvedor eficiente de radiação entre 1  $\mu m$  e 30  $\mu m$ . O vapor d'água e o dióxido de carbono são os principais gases absorvedores neste intervalo.

Quando a atmosfera absorve radiação terrestre ela se aquece e eventualmente irradia esta energia, para cima e para baixo, onde é novamente absorvida pela Terra. Portanto, a superfície da Terra é continuamente suprida com radiação da atmosfera e do Sol. Esta

energia será novamente emitida pela superfície da Terra e uma parte retornará à atmosfera que, por sua vez, reirradiará uma parte para a Terra e assim por diante. Este fenômeno extremamente importante é denominado efeito estufa.

## 2.8 Sensores

Para quantificar as grandezas atmosféricas na camada limite, utilizam-se diversos sensores que podem ser montados sobre o solo, mastros, torres, balões, aeronaves, etc.

As variáveis de maior interesse são: a velocidade do vento, temperatura, umidade, radiação e também os fluxos de "momentum", calor, massa, bem como os fluxos de umidade e  $CO_2$ .

Existem diversos sensores para diferentes medidas atmosféricas, portanto, faz-se necessário uma breve descrição dos principais sensores utilizados para estas medidas.

Realizando-se medidas de resposta rápida ou alta frequência da velocidade do vento e flutuações de escalares, podemos calcular os fluxos turbulentos diretamente a partir do produtos de suas componentes flutuantes (por exemplo,  $\overline{u'w'}$ ,  $\overline{u'\theta'}$ ). Se somente os gradientes das médias estão disponíveis, sobre uma superfície plana e homogênea, então os fluxos podem ser deduzidos a partir das relações de Monin-Obukhov (KAIMAL; FINNIGAN, 1994).

Portanto, de acordo com o estudo que se quer fazer, podemos utilizar sensores que medem as propriedades médias ou flutuantes da variável de interesse (no ar ou no solo). Os requisitos de medições dos dois são diferentes. Segundo Kaimal e Finnigan (1994), sensores para medir as propriedades médias o longo do tempo de um escoamento requerem um elevado grau de acurácia e estabilidade a longo prazo e devem ser capazes de fornecer boas medidas para períodos de 10 *min* e maiores, já os sensores para medir as propriedades turbulentas de um escoamento necessitam de uma resposta mais rápida, ou seja, o suficiente para cobrir toda a escala dos turbilhões que contribuem para o processo, mas a acurácia precisa apenas ser relativa, isto é, com respeito a qualquer medida arbitrária.

Para a obtenção dos fluxos turbulentos de  $CO_2$  e  $H_2O$  de um determinado ecossistema (agrícola ou natural, florestas, pradarias, desertos e oceanos) para estudos ecológicos ou de mudanças globais, utiliza-se MCV no qual são usados em conjunto um anemômetro sônico e um analisador de gás, cujo fluxo é obtido a partir da velocidade do vento vertical e da concentração do escalar em questão ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ).

### 2.8.1 Sensor de vento

Inúmeros instrumentos foram desenvolvidos para medir a velocidade do vento, entre eles temos os anemômetros de copo, os anemômetros de hélice, os anemômetros sônicos, etc. Será enfatizado o anemômetro sônico, uma vez que este foi utilizado para as nossas medidas.

O anemômetro tridimensional CSAT3 (*Campbell Scientific, Inc.*) é um anemômetro ultra-sônico desenvolvido para medir a velocidade do vento em três dimensões. Ele usa três pares de transdutores não ortogonalmente orientadas para sentir o vento horizontal. Cada par de transdutores transmite e recebe um sinal ultra-sônico para medir o efeito do vento entre os transdutores em energia mecânica de vibrações acústicas, detectando a velocidade e a direção do vento. Como a velocidade do som pode ser afetada pela temperatura, estes instrumentos podem funcionar como termômetros, embora a chuva seja responsável por variar a velocidade do som.

O anemômetro sônico, através de ondas sonoras, realiza medidas a alta frequência (várias medições por segundo) das três componentes da velocidade do vento (duas horizontais e uma vertical). A velocidade do som está diretamente relacionada com a densidade do ar, por exemplo, a temperatura e a umidade.

O CSAT3 pode ser usado para medir a velocidade média do vento horizontal e a direção ou flutuações turbulentas do vento horizontal e vertical. Encontrando a covariância entre o vento vertical e escalares, pode-se calcular diretamente o fluxo de calor sensível, calor latente e de dióxido de carbono.

Os transdutores do sônico são selados e não serão prejudicados quando molhados pela chuva, portanto, o CSAT3 vai continuar a fazer as medidas de vento em dias de chuva. Porém, como todos os anemômetros sônicos, se os transdutores forem obstruídos, o CSAT3 será incapaz de fazer medidas. Para minimizar os efeitos das gotas de chuva que poderão vir a escorres pelo braço dos transdutores, é colocado uma pequena rede cilíndrica que envolve a lateral de cada um dos transdutores, tendo por finalidade escorrer a gota para fora da cabeça do transdutor. É claro que, caso a chuva seja intensa, o registro das medidas fica prejudicado, pelo fato das gotas de chuva estarem cruzando o caminho entre os transdutores.

Um aspecto importante deste anemômetro, é a ausência de peças em movimento, necessitando de menos manutenção que os de hélice por exemplo, e os torna adequado para uso em climas e locais adversos, tais como estações meteorológicas, bóias, navios, etc.

### 2.8.2 Sensor de concentração de $CO_2$ e $H_2O$

Os gases mais importantes que se encontram na atmosfera, do ponto de vista biológico, são o vapor de água e o dióxido de carbono. A concentração média desses gases podem ser medidos com grande acurácia por um analisador de gás infravermelho, sendo mais conhecidos pela comunidade científica por IRGA (do inglês - *infrared gas analyzers*). O analisador de gás de caminho aberto modelo (LI-7500, LI-COR, Inc.), é um instrumento utilizado para realizar medidas simultâneas das concentrações de dióxido de carbono e vapor d'água presentes na atmosfera, fazendo a medida das concentrações de forma direta.

As medidas de concentrações de  $CO_2$  e  $H_2O$  são realizadas pela emissão de um feixe de luz infra-vermelha através de um caminho ótico aberto, por onde o fluxo de ar irá atravessar (ocorrerá absorção de comprimentos de onda centrados em  $4,26 \mu m$  e  $2,59 \mu m$  fornecendo as medidas de  $CO_2$  e  $H_2O$  respectivamente). Para aumentar a distância percorrida pela luz, com a finalidade de obter uma melhor precisão, há um espelho no final do percurso para refletir a luz de volta a base de emissão, onde há um detector que mede a absorção do feixe. Um filtro que elimina o espectro de absorção de outros elementos do ar, selecionará apenas a faixa espectral que corta a frequência que é sensível à absorção do  $CO_2$  e  $H_2O$ , sendo essa absorção da luz proporcional à concentração de  $CO_2$  e  $H_2O$  no ambiente.

### 2.8.3 Sensor de radiação

Os sensores de radiação solar global (total mais a difusa) e fotossinteticamente ativa (*Photosynthetically Active Radiation* - PAR), são semelhantes funcionalmente (fornecem uma corrente elétrica proporcional a radiação solar recebida). O sensor de radiação solar global é calibrado para medir a radiação total recebida, enquanto que o sensor de radiação fotossintética ativa é filtrado e calibrado para medir radiação fotossinteticamente ativa, ou seja, a radiação da faixa do visível do espectro eletromagnético.

Um sensor de radiação é formado basicamente por um fotodiodo de silício que irá responder á absorção de energia solar, gerando uma corrente elétrica proporcional à irradiância global. O elemento básico deste sensor é uma junção semicondutora do tipo  $p-n$ , formada por um material com deficiência de elétrons - semicondutor  $p$ , e outro material com excesso de elétrons – semicondutor  $n$ . Quando a radiação solar incidente nesta junção semicondutora  $p-n$  atinge o nível de energia capaz de excitar um elétron, este se torna livre, e devido ao campo formado pela zona de depleção (região da junção  $p-n$ ) este é acelerado, produzindo uma corrente elétrica proporcional a esta radiação.

O saldo radiômetro, como o nome já diz, fornece o saldo de radiação sobre uma determinada superfície, através da soma algébrica da entrada e saída de todas as ondas de radiação (radiação de onda curta e longa). A radiação de entrada consiste na radiação direta e difusa mais a irradiância da onda longa na atmosfera. A radiação de saída consiste em radiação solar refletida mais o componente de ondas terrestre. Este balanço é conhecido como a radiação líquida (total).

A face superior do sensor mede a energia solar e a energia infravermelha que é recebida de todo o hemisfério (campo de visão de 180 graus). A face inferior do sensor mede a energia recebida da superfície do solo. As duas leituras são subtraídas automaticamente e o resultado convertido para um sinal de saída simples. Esta saída representa a radiação líquida e é expressa em Watts por metro quadrado ( $Wm^{-2}$ ).

Este sensor é formado basicamente por um detector térmico, que consiste em várias termopilhas interligadas. A termopilha é composta por vários termopares ligados em série (junções em série de cobre e constantan), proporcionando um sensor que detecta uma diferença de temperatura altamente sensível e gera uma tensão de saída (o sensor propriamente dito é passivo e assim não o é necessária uma fonte de alimentação). A face superior e inferior do sensor estão ligadas às junções superiores e inferiores das termopilhas e dessa forma o sensor pode medir a diferença de temperatura entre as faces. Esta diferença de temperatura pode ser determinada com grande precisão (da ordem de 0,001 graus) e é proporcional à radiação líquida.

#### 2.8.4 Fluxo e umidade do solo

Uma variável importante para estudos envolvendo o sistema solo/água/planta/atmosfera, é a umidade volumétrica de água no solo dada em  $m^3m^{-3}$ . A sua determinação tem importância na dinâmica de solutos, calor, gases e da própria água no solo. Para isso é normalmente utiliza-se um reflectometer de conteúdo de água (o CS616, *Campbell Scientific, Inc.* é bastante utilizado), que foi projetado para medir o teor de água volumétrico de solos ou outros meios porosos. As informações da quantidade de água são derivadas da sensibilidade do sensor em relação a constante dielétrica do meio a ser medido. A medida da permissividade dielétrica aparente do solo é feita em frequências de microonda (MHz-GHz).

A constituição e o funcionamento deste tipo de sensor é específico para o modelo do instrumento. Este sensor (CS616) consiste de duas hastes de aço inoxidável, conectados a uma placa de circuito impresso. Um cabo blindado de quatro condutores é conectado à placa de circuito para fornecer energia, ativar a sonda e monitorar a saída dos pulsos. A placa de

circuito é encapsulada em epóxi. Os componentes eletrônicos de alta velocidade na placa de circuito são configurados como um multivibrador biestável. A saída do multivibrador está conectada às hastes da sonda que agem como uma onda guia. O tempo de viagem do sinal entre as hastes do sensor depende a permissividade dielétrica do material que cercam as hastes e a permissividade dielétrica depende do teor de água. Portanto, a frequência de oscilação do multivibrador é dependente do teor de água do meio a ser medidos. A saída do CS616 é essencialmente uma onda quadrada com amplitude de  $\pm 0,7$  volts. O período de saída da sonda varia de aproximadamente 14 microsegundos com as hastes expostas ao ar e de aproximadamente 42 microsegundos com as hastes completamente imersos na água. Uma equação de calibração converte esse período em conteúdo volumétrico de água. Estas informações foram obtidas a partir do manual do CS616, *Campbell Scientific, Inc.*.

Os fluxímetros ou placas medidoras de fluxo, são destinadas a medir o fluxo de calor no solo. Constitui-se uma placa isolante tendo em ambas as faces junções termoeletricas (junções de metais diferentes) correspondentes. A placa de fluxo de calor do solo utiliza termopilhas para medir o gradientes de temperatura através placa. O principio de funcionamento é semelhante ao saldo radiometro descrito anteriormente. O impulso desses pares termoeletricos é expresso pelo próprio fluxo de calor no solo.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Descrição do Sítio Experimental

O sítio experimental deste estudo está localizado no nordeste do Rio Grande do Sul (planalto médio) Figura 3.1, na Fundação Centro de Experimentação e pesquisa FECOTRIGO (FUNDACEP), Cruz Alta, RS, nas coordenadas: latitude  $28^{\circ}36'S$ , longitude  $53^{\circ}40'W$ , com altitude de 409 m. A vegetação original da região do sítio experimental era composta por floresta aberta de araucária e pastagens naturais formadas por gramíneas, com predomínio de *Paspalum notatum* Fluegge. A partir da década de 50 a região foi desmatada e convertida em lavouras comerciais, onde a sucessão trigo e soja foi cultivada em plantio convencional. O experimento foi instalado em 1985, com o objetivo de comparar sistemas de plantio direto e convencional e é conduzido até hoje.

A montagem experimental consiste de uma matriz de 40 m x 60 m com parcelas dispostas em pares, como mostrado nas Figuras 3.1 e 3.2. Experimentos com diferentes culturas são realizadas em cada par de parcelas uma com o sistema de Plantio Direto (PD), com o estabelecimento de culturas de inverno-verão, diretamente através dos resíduos culturais remanescentes sobre a superfície do solo e o outro com o sistema de Plantio Convencional (PC), o qual consiste de uma lavração com arado de discos, seguido de uma gradagem leve (OLIVEROS, 2008). Este experimento faz parte de uma grande área agrícola com mais de 200 hectares.

Os principais fatores determinantes para a realização do experimento neste sítio foram: a segurança do local; monitoramento diário do funcionamento da estação e principalmente o interesse e o financiamento pela FUNDACEP para o desenvolvimento das pesquisas. Desta forma, apesar da área de estudos ser reduzida, o experimento foi realizado sobre dois sistemas de plantio diferentes, uma vez que o local já possui um histórico de mais de 25 anos de pesquisas no solo nestes sistemas.

Os dados para este trabalho foram coletados em duas parcelas de sistemas de PC e PD com a seguinte rotação de 3 anos: Ano 1, ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.) misturado com aveia preta no inverno e milho (*Zea mays* L.) no Verão; Ano 2, trigo no inverno e soja no verão e Ano 3, aveia preta no inverno e soja no verão.

O milho cultivado no verão do ano 1 foi avaliado neste trabalho. O cultivar usado foi o milho Híbrido FUNDACEP PIONEIRO, híbrido simples, de ciclo precoce, de alto potencial



Figura 3.1: Localização do sítio experimental de Cruz Alta–RS (a figura não representa a época em que os dados foram obtidos para este trabalho).

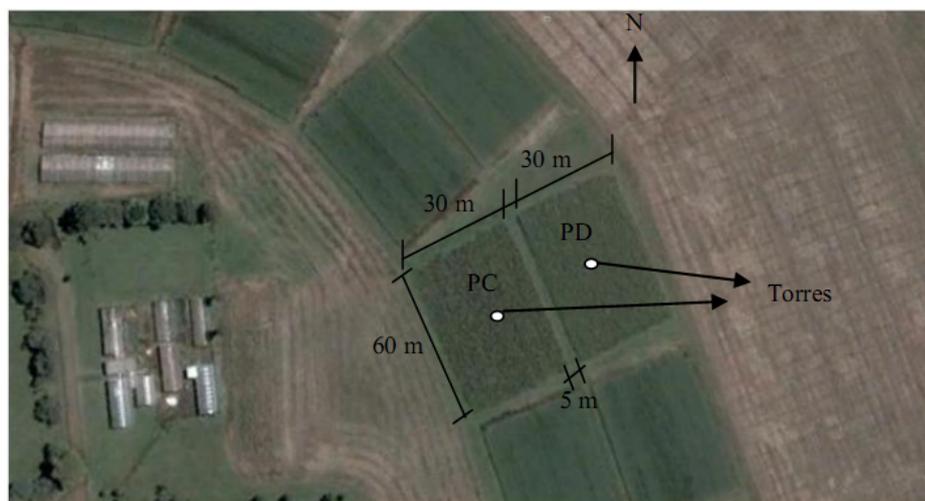


Figura 3.2: Representação das medidas das parcelas do sítio experimental de Cruz Alta–RS.

produtivo. O solo da área experimental pode ser classificado como *Rhodic Hapludox* (FAO) ou *Typic Haplorthox* (*US Soil Taxonomy*) ou ainda Latossolo vermelho distrófico típico, com textura fraco argilosa (EMBRAPA, 2005).

Em dezembro de 2006, o Laboratório de Micrometeorologia (Lumet) da UFSM, instalou uma estação micrometeorológica para realizar o monitoramento das trocas de massa e energia entre sistemas de diferentes culturas (inicialmente a soja) e a atmosfera. Uma segunda estação micrometeorológica foi instalada em novembro de 2009 no mesmo sítio, porém, para diferenciar da primeira, foi instalada em um sistema de plantio diferente o PC. Ambas as torres estão em operação até hoje e pertencem ao projeto Sulflux ([www.ufsm.br/sulflux](http://www.ufsm.br/sulflux)).

As medidas foram realizadas com duas estações micrometeorológicas (Figura 3.3 e 3.4), instaladas no centro de duas parcelas de milho na estação do verão no hemisfério sul (2010/2011), nas quais o sensor de vento foi apontado na direção Leste.

A cultura do milho teve início no dia 01 de outubro de 2010, quando foi realizado o plantio e o terminou no dia 05 de março de 2011, quando o milho foi colhido. Assim o período de cultura do milho teve duração de 156 dias. A contagem de tempo será dada como Dias Após o Plantio (DAP), assim, o primeiro dia será o DAP 01 correspondendo ao dia do plantio e DAP 156 será o dia da colheita.



Figura 3.3: Torre micrometeorológica com o sistema de covariância de vórtices instalada no sistema de plantio direto (PD) no sítio experimental Cruz Alta.



Figura 3.4: Torre micrometeorológica com o sistema de covariância de vórtices instalada no sistema de plantio convencional (PC) no sítio experimental Cruz Alta.

## 3.2 Sistemas de Medidas

### 3.2.1 Instrumentação

Os sensores para as medidas dos fluxos, que foram instalados nas duas parcelas, eram de mesmo modelo. Para medir as componentes do vento utilizou-se o anemômetro sônico tridimensional Campbell (CSAT3) e as medidas das concentrações de  $CO_2$  e  $H_2O$  foram realizadas com o analisador de gás infravermelho de caminho aberto LI-COR (LI-7500).

Os sensores foram instalados em duas torres de estrutura metálica com 5 metros de altura, dispostos em dois níveis. Em um nível foram instalado a 2,5 m da superfície do solo e no outro a 5 m. As medidas foram realizadas a uma taxa de 10 Hz. Os dados foram armazenados nesta mesma frequência. O registro/armazenamento dos dados foi realizada por registradores de dados (*DataLoggers*) da *Campbell Scientific Inc.*, um CR5000 no PD e um CR1000 no PC. Os *DataLoggers* enviavam os dados para um computador a cada 3 minutos.

O primeiro nível de sensores estava instalado desde o início do plantio (01/10/2010) em ambos os sistemas de plantio, e o segundo nível foi instalado 62 dias após o plantio (02/12/2010), quando a cultura estava com aproximadamente 1 metro de altura.

A torre instalada no PD, também tinha os seguintes sensores instalados: um saldo radiômetro-NET - modelo NR-Lite - Kipp&Zonen (4,7 m), um Piranômetro - modelo CMB6 - Kipp&Zonen

(5,0 m), um sensor de radiação fotossinteticamente ativa– modelo "PAR"LITE - Kipp&Zonen (1,2 m), dois fluxímetros de solo – modelo HMP01SC - Kipp&Zonen (−0,04 e −0,01 m), dois termômetros de solo modelos T108 (Temperature probe sensor) (−0,025 m) e TCAV (termopar tipo E) (−0,04 m), um sensor de conteúdo de água no solo – modelo CS616 (water content reflectometer) (de 0 – 0,3 m de profundidade). Na torre do PC também havia instalado um sensor de conteúdo de água no solo – modelo CS616 (water content reflectometer)(0 – 0,3 m de profundidade). Para as medidas do Índice de Área Foliar foi utilizado um LI-COR modelo Li-3000A Portable Area Meter.

O sensor de radiação fotossinteticamente ativa, foi colocado a 5 m de altura 62 dias após o plantio, para evitar que fosse coberto pela plantas de milho.

### 3.2.2 Método de Covariância dos Vórtices

Segundo Moncrieff et al. (1997) técnicas micrometeorológicas como o Método de Covariância dos Vórtices (MCV), são eficazes para a monitorização das trocas gasosas e de escalares entre a biosfera e a atmosfera.

Foi utilizado o MCV (também encontrada na literatura como sistema *eddy covariance* (BALDOCCHI; HICKS; MEYERS, 1988)) para a estimativa dos fluxos de  $CO_2$  que é a resultante da interação entre a atmosfera e o dossel da cultura do milho. Com esse método pode-se determinar o fluxo vertical de  $CO_2$ , usando o cálculo da correlação entre os desvios temporais de alta frequência da velocidade vertical do vento com os desvios temporais do escalar. A aplicação da eddy covariance é fundamentada na suposição de que os vórtices turbulentos, enquanto advectados através do sensor, por um escoamento estacionário e homogêneo, mantêm suas propriedades inalteradas (hipótese de Taylor).

### 3.2.3 Representatividade espacial do Sensor

Para determinar a cobertura do sensor ou *footprint* (como é comumente encontrado na literatura) da área de estudos, utilizou-se a equação para condições quase neutras (SCHUEPP et al., 1990) a seguir:

$$CNF(x_L) = \int_0^{x_L} \frac{U(z-d)}{u_* k x^2} \exp\left[-\frac{U(z-d)}{u_* k x}\right] dx = \exp\left[-\frac{U(z-d)}{u_* k x_L}\right], \quad (3.1)$$

Na equação 3.1,  $CNF$  é a contribuição cumulativa normalizada para a medição do fluxo (%);  $x_L$  é a distância da estação (m);  $U$  é a velocidade média do vento integrada ( $m s^{-1}$ );  $z$  é

a altura da medição ( $m$ );  $u_*$  é a velocidade de fricção ( $m s^{-1}$ );  $k$  é a constante de Von Karman (0,4) e  $d$  é o deslocamento do plano zero ( $m$ ).

De acordo com Montheith (1975), para plantas com altura entre 20 e 200  $cm$ , pode-se estimar  $d$  pela equação  $\ln d = 0,979 \ln h - 0,154$ , porém na prática podemos utilizar a aproximação  $d \approx 0,63h$ .

### 3.2.4 Tratamento dos dados

O procedimento utilizado para calcular as médias foi a média móvel. De acordo com Kaimal e Finnigan (1994), a média móvel geralmente é utilizada como filtro antes de aplicarmos as propriedades de Média de Reynolds. Em muitas situações, a média móvel (filtro passa-baixa), é aplicada à série temporal para subestimar os ruídos de fundo. A série filtrada pela média móvel é então subtraída do sinal original, resultando desta forma as flutuações (ZIMERMANN, 2005; SAKAI, 2000), assim as médias foram calculadas em blocos de 30 minutos, com avanços de 3 em 3 minutos.

A correção de webb (WEBB; PEARMAN; LEUNING, 1980) foi aplicada, uma vez que, quando são medidas as flutuações da densidade ou gradiente médio do constituinte do ar *in situ*, são necessárias as correções devido aos fluxos de calor sensível e latente.

Foi efetuada a rotação 3D nas componentes do vento, onde as componentes  $u$  e  $v$  do vento serão rotadas de modo a coincidir  $u$  com a direção do vento médio e  $v$  com a direção transversal (KAIMAL; FINNIGAN, 1994).

Na filtragem de dados, foram removidos os dados não físicos (*spikes*) que ocorrem principalmente devido à precipitação, aves que pousam no sensor ou muito próximo dele e mau funcionamento do sensor. Também foram removidos os dados noturnos com pouca turbulência, cujo desvio da velocidade vertical do vento  $\sigma_w < 0,15 m s^{-1}$ .

Nas análises apresentadas aqui, usaremos a convenção micrometeorológica para os fluxos, ou seja, valores positivos indicam fluxos de  $CO_2$  da vegetação para a atmosfera (respiração) e valores negativos indicam fluxos da atmosfera para a vegetação (absorção de  $CO_2$  pelo ecossistema - fotossíntese). Portanto, fluxos positivos ( $NEE > 0$ ) representam o efluxo de  $CO_2$  do ecossistema para a atmosfera, sendo assim, o GPP é sempre negativo, e  $R_e$  é sempre positivo.

O NEE, GPP e  $R_e$  calculados de meia em meia hora possuem unidade de  $\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ , e foram transformados em  $g C m^{-2} d^{-1}$  pelo fator 1,0368 para determinar os valores diários de NEE, GPP e  $R_e$ . Quando integrado ao longo do tempo esses valores geram fluxos sazonais

e anuais acumulativos.

A metodologia utilizada segue a seção 2.6 onde o NEE diurno é separado em GPP e  $R_e$ . Descreve-se o GPP e a  $R_e$  como funções empíricas de variáveis meteorológicas. As lacunas de dados de 30 minutos foram preenchidas obtendo as funções que descrevem o GPP e  $R_e$  para as diferentes fases fenológicas da cultura. Os algoritmos utilizados foram escritos em, Fortran 90 (gfortran), QtiPlot, Gnuplot e Octave 3.0.1.

Falhas nos dados com tempo menor que 2 horas foram preenchidos por interpolação simples, enquanto que para falhas maiores que 2 horas e menores que 4 dias utilizou-se o método da variação diurna média (*Mean Diurnal Variation – MDV*) (FALGE et al., 2001), esse método preenche a lacuna de um determinado horário utilizando a média de 7 dias sucessivos para o mesmo horário. Para lacunas maiores que 4 dias, utiliza-se funções empíricas de variáveis meteorológicas para estimar o GPP e a  $R_e$  durante o dia (FALGE et al., 2001; LASSLOP et al., 2010). Para o sítio de Cruz Alta, a maior lacuna foi de dois dias no sistema de PD.

O cálculo para determinar a quantidade de carbono contido no grão ( $C_{gr}$ ,  $g C m^{-2}$ ), foi similar ao utilizado por Hollinger, Bernacchi e Meyers (2005, 2006):

$$C_{gr} = \left(1 - \frac{W_g}{100}\right) f_C Y, \quad (3.2)$$

Nesta equação,  $W_g$  é o teor de umidade do grão (13% para o milho),  $f_C$  é a fração de carbono no grão (0,447 para o milho), e  $Y$  é o produtividade ou rendimento da cultura em  $g m^{-2}$ .

### 3.2.5 Medidas fenológicas

As medidas do Índice de Área Foliar (IAF), foram realizadas por uma equipe de estudantes do Laboratório de Micrometeorologia (L $\mu$ met). As medidas tiveram início a partir do dia 07 de novembro (36<sup>o</sup> dia após o plantio), quando as plantas estavam com aproximadamente 30 *cm* de altura. Foram realizadas um total de 8 medidas com intervalos de 10 a 15 dias cada. As medidas foram feitas em 5 plantas de milho (sempre nas mesmas), nos dois sistemas de plantio (fazendo-se posteriormente a média das cinco plantas) com um sensor de área foliar LI-COR modelo Li-3000A.

As medidas de biomassa das plantas de milho foram realizadas pela FUNDACEP, que consistia em extrair a planta do solo e pesar todas as suas partes de folha, caule, espiga, pendão, e massa total verde e depois era realizada a desidratação da planta e então medida a

massa seca destas partes. Foram feitas um total de 6 medidas de biomassa.

### 3.2.6 Intercomparação de sensores

Foi realizada uma intercomparação entre os sensores anemômetros sônicos (CSAT3) e também entre os analisadores de gás (Li-7500).

O sítio experimental de Cruz Alta, continha duas torres com dois níveis de sensores de medidas micrometeorológicas (2,5 m e 5 m), assim, intercomparou-se 4 anemômetros sônicos tridimensionais (CSAT3D) e 4 analisadores de gás infravermelho de caminho aberto (LI7500). Na Figura 3.5, mostramos a configuração dos sensores durante a comparação entre os mesmos (CSAT-3D e LI-7500). A intercomparação ocorreu após o término do ciclo da cultura do milho dos dois sistemas de plantio PC e PD e teve duração de 14 dias. O resultado da intercomparação esta no Apêndice A.

Na intercomparação verificou-se que os sensores estavam com uma boa calibração, uma vez que dois anemômetros sônicos e dois analisadores de gás eram novos, e que os dados analisados tiveram uma boa correlação (ver Apêndice A), dando assim, confiabilidade na comparação dos dados analisados para este trabalho.

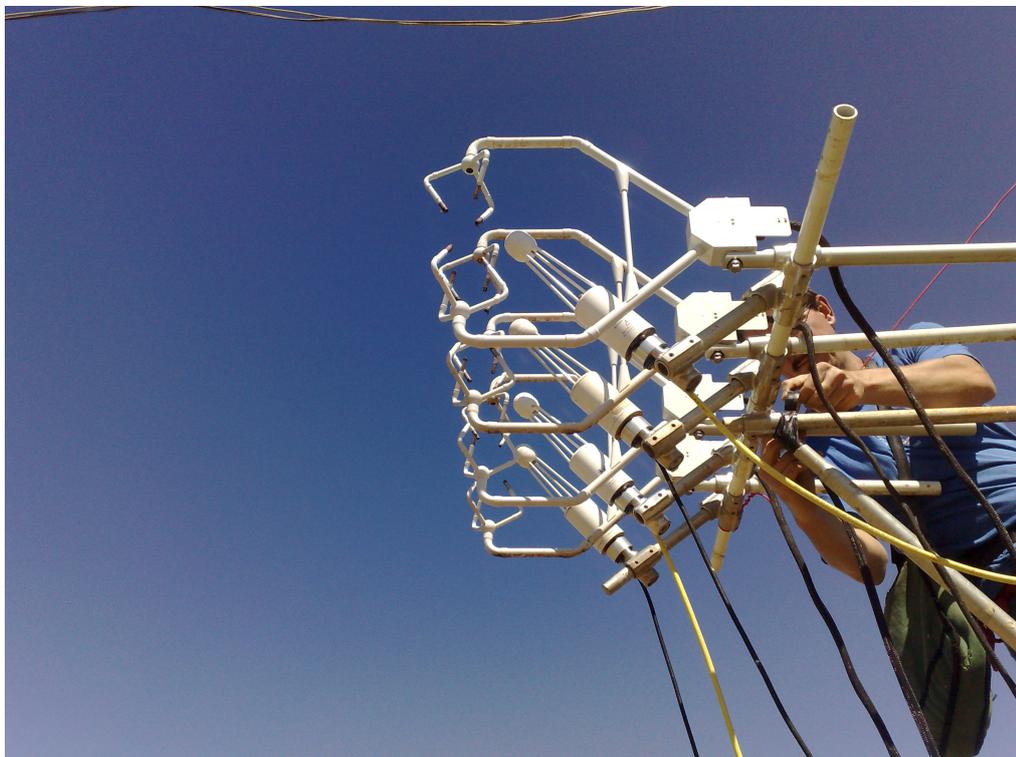


Figura 3.5: Ilustração da intercomparação de sensores no Sítio experimental Cruz Alta.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Condições climáticas

Para um melhor entendimento dos resultados obtidos neste trabalho, é necessário fazer uma análise das condições climáticas de todo o período do experimento durante a cultura do milho. Nas figuras seguintes, apresentamos as condições de tempo no período do estudo para o sítio experimental de Cruz Alta. Os dados de temperatura do ar e precipitação foram obtidos de uma estação automática do INMET (2012), localizada a cerca de 400 m do sítio experimental. Já as demais variáveis foram medidas nas estações micrometeorológicas que estavam sobre a cultura do milho.

A Figura 4.1, apresenta a evolução da média diária da temperatura do ar para todo o período do experimento. A temperatura média teve seu máximo de 26,75 °C a partir da metade do mês de dezembro, no dia após o plantio 79 (DAP 79), que também corresponde á metade do período do cultivo. Na Figura 4.2, podemos ver que a temperatura média mensal durante o período da cultura do milho ficou acima da normal climatológica (1961-1990) nos meses de outubro, janeiro e fevereiro e abaixo em novembro e dezembro, sendo o mês de janeiro o que apresentou a temperatura média mais alta e o mês de outubro apresentou a temperatura média mais baixa.

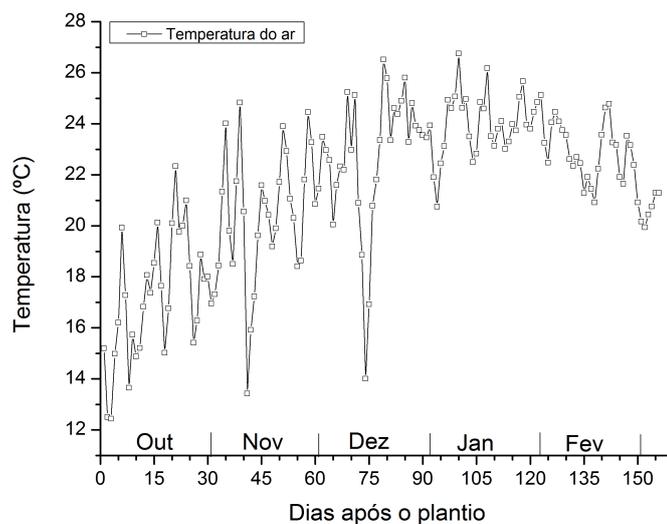


Figura 4.1: Média diária da temperatura do ar para o período da cultura do milho no sítio Cruz Alta.

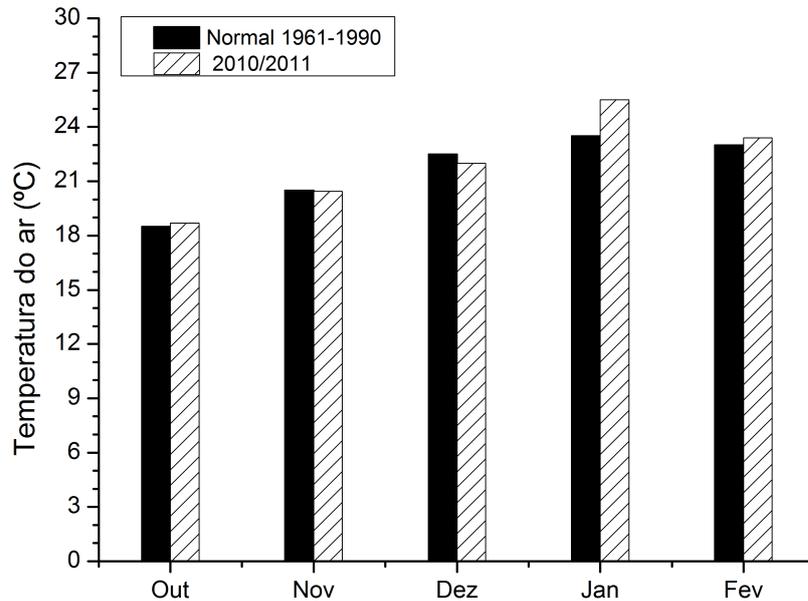


Figura 4.2: Média mensal da temperatura do ar e da normal climatológica (1961-1990) para o período da cultura do milho no sítio de Cruz Alta.

A Figura 4.3 mostra a precipitação para os 156 dias da cultura e a umidade volumétrica de água no solo para a profundidade de 0 a 30 *cm* para os dois sistemas de plantio PC e PD.

A precipitação ficou bem distribuída ao longo do período da cultura, apresentando um aumento no final do estudo, destacando-se os dias DAP 73, onde foi registrada a maior precipitação com 91,4 *mm* e nos dia 128 e 131 com 76,8 e 84 *mm* respectivamente. O período máximo de dias consecutivos sem chuva foram de 9 dias (DAP 31 a 39) e 11 dias (DAP 41 a 51). A umidade do solo ficou entre 0,26 a 0,42  $m^3m^{-3}$  para o PC com a média de 0,37  $m^3m^{-3}$  e entre 0,29 a 0,45  $m^3m^{-3}$  para o PD com a média de 0,40  $m^3m^{-3}$ , (com os sensor não calibrados, porém intercomparados entre si), sendo que o PD sempre esteve mais úmido durante todo o período do experimento, o que é explicado pela função da palhada no plantio direto, que protege a superfície do solo da ação direta dos raios solares, reduzindo a temperatura e a evaporação, mantendo, conseqüentemente, maior quantidade de água no solo. Após a chuva, a umidade do solo diminui rapidamente.

A Figura 4.4 apresenta a comparação da precipitação medida em Cruz Alta com a normal climatológica de 1961 a 1990. Observa-se que a precipitação mensal ficou abaixo da normal climatológica em três dos cinco meses do experimento (outubro, novembro e janeiro), sendo que em outubro de 2010 e janeiro de 2011 a precipitação ficou muito a baixo da normal,

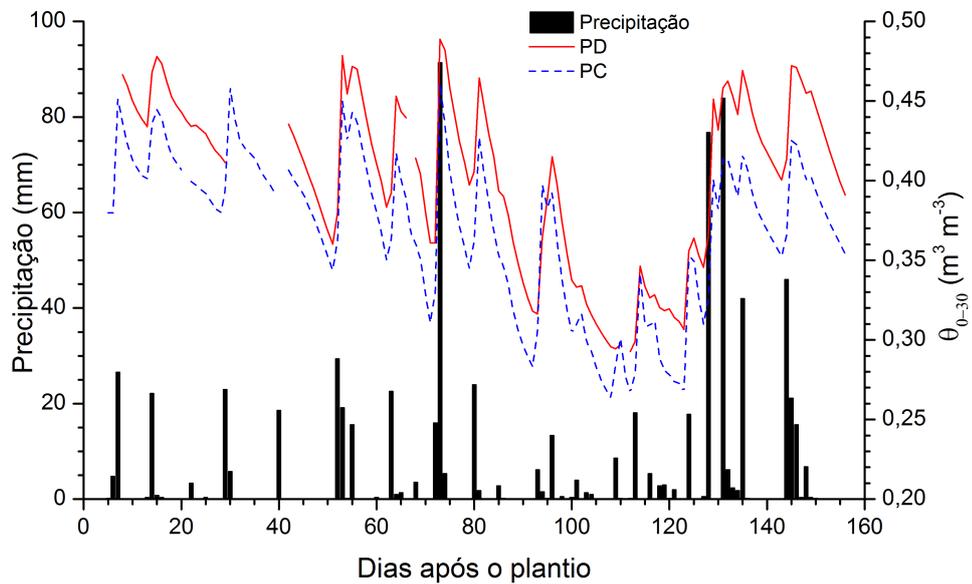


Figura 4.3: Média diária da precipitação e umidade volumétrica de água no solo ( $\theta_{0-30}$ ) de 0 a 30 cm.

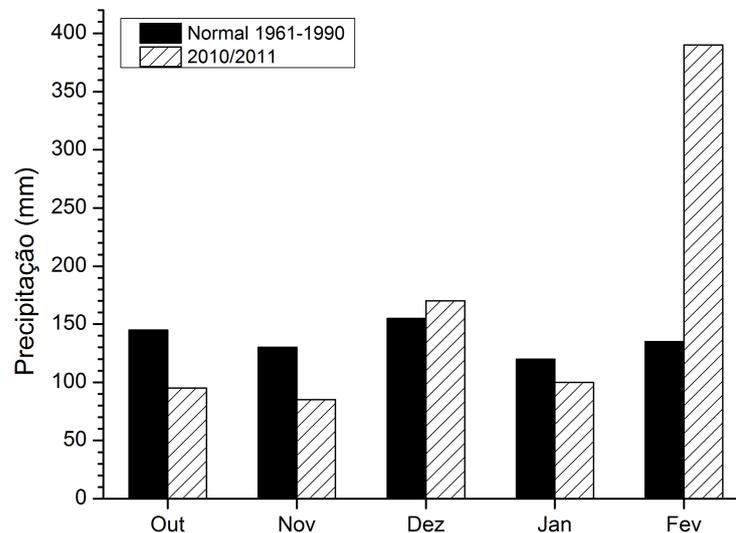


Figura 4.4: Média mensal da precipitação e da normal climatológica (1961-1990) para o período da cultura do milho no sítio de Cruz Alta.

praticamente choveu a metade do esperado para esses dois meses. Os meses de dezembro de 2010 e fevereiro de 2011 ficaram acima da normal climatológica, sendo que no mês de fevereiro a chuva registrada foi quase três vezes mais do que o esperado.

A radiação solar foi medida em watt por metro quadrado. Fez-se a integração das curvas diárias da radiação solar, que fornece a área total sob a curva, representando a energia diária em megajoule por metro quadrado. Na Figura 4.5 estão representados a evolução da radiação solar global incidente e da radiação fotossintética ativa (PAR). A radiação global e PAR apresentaram o valor máximo em torno do dia DAP 75, início da fase reprodutiva do milho, com a radiação solar global atingindo  $33,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e a radiação PAR  $14,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .

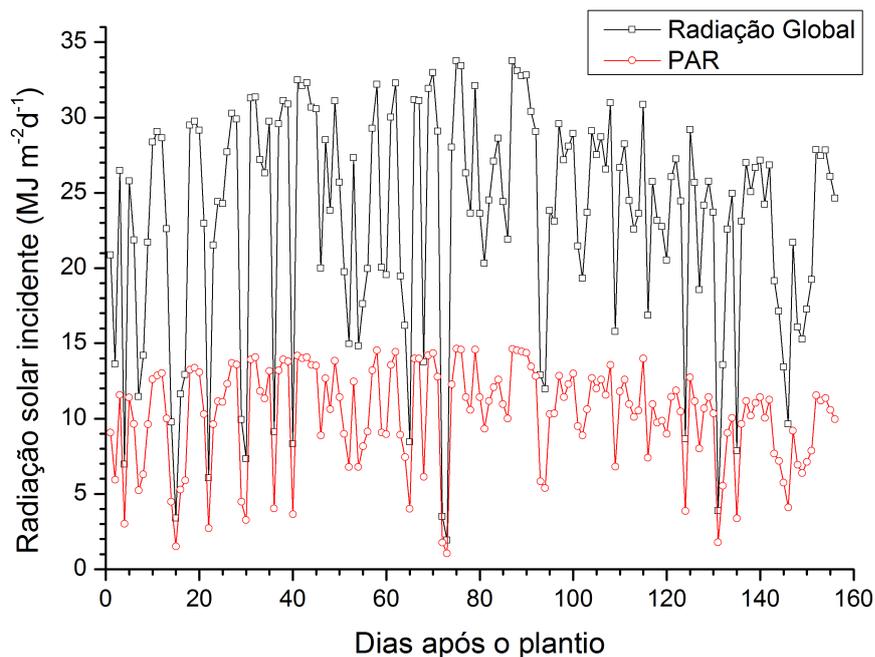


Figura 4.5: Variação da radiação solar global e fotossinteticamente ativa (PAR) no Sítio experimental Cruz Alta

Os dados do regime de ventos foram avaliados para toda a cultura e por fases, a fim de avaliar a influência do vento em cada uma das quatro fases evolutivas do milho, bem com a direção a partir da qual a torre esta recebendo as informações das quantidades medidas. As medidas foram tomadas a  $2,5 \text{ m}$  e posteriormente a  $5 \text{ m}$  (conforme seção 3.2.1) na torre micrometeorológica instalada sobre o PC (resultado semelhante se obteve para o PD). A divisão destas fases está apresentada na seção 4.4. Portanto, o regime de ventos para a região do experimento, será analisado por “rosas de ventos” para cada uma das quatro fases (vegetativa jovem (VJ) (DAP 1-43), vegetativa adulta (VA) (DAP 44-84), reprodutiva (R) (DAP 85-115) e senescência (S) (116-156)) e de toda a cultura do milho para todo o período do experimento de Cruz Alta.

Como podemos ver nas Figuras 4.6 até 4.10, o comprimento de cada “braço” aumenta de acordo com o aumento da frequência (%) de ocorrência de ventos em determinada direção.

Os valores de velocidades estão expressos em  $m s^{-1}$  e se alternam de acordo com a legenda de cores apresentada nas figuras.

A frequência média do vento em relação a velocidade e direção, para o período de toda a cultura do milho, esta ilustrado na Figura 4.6, mostrando que os ventos de SE (18%) e SSE (17%) foram os mais freqüentes. Porém ventos provenientes do setor S também foram importantes por apresentar velocidades altas. As velocidades de 1 a 3  $m s^{-1}$  foram predominantes no período do experimento.

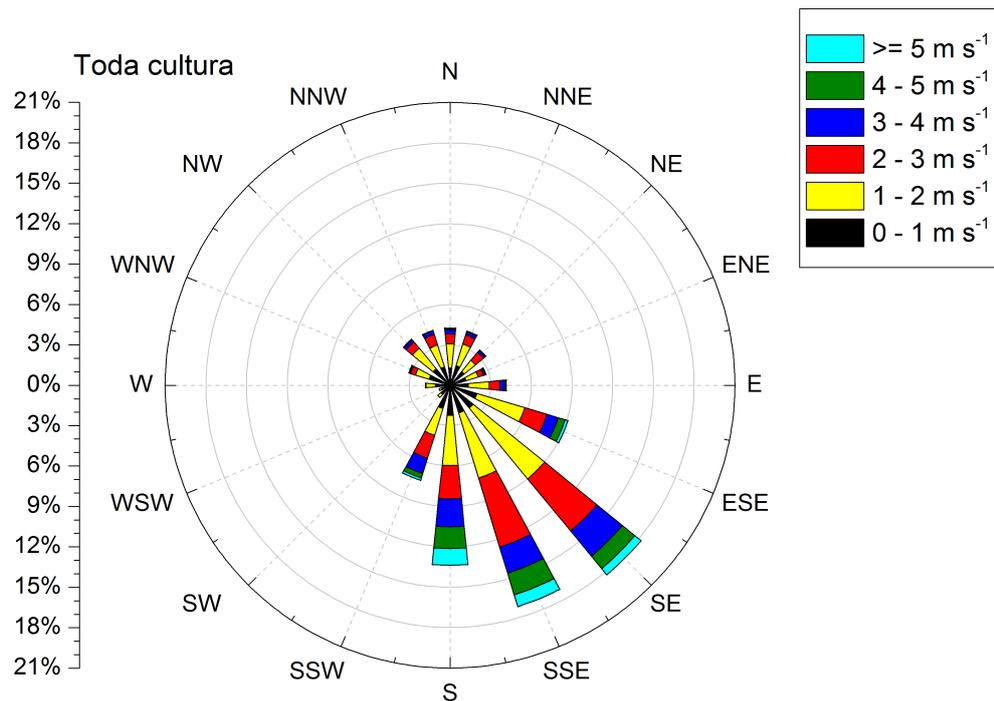


Figura 4.6: Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção (%), para o período de toda cultura do milho no sítio de Cruz Alta .

Na fase VJ, Figura 4.7, a direção predominante dos ventos foi de S (16,5%) e SSW (15%), com as velocidades mais altas de S. Os setores SE e SSE também foram importantes, por terem apresentado ventos com velocidades acima de 3  $m s^{-1}$  (mais da metade maior do que 3  $m s^{-1}$ ).

Na fase VA, Figura 4.8, verificamos que os ventos de SSE (17%), S (15%) e SE (14,8%) foram os mais freqüentes. Com as velocidades mais altas de SSE e S.

Na fase R, Figura 4.9, os ventos de SE (25%) e SSE (21%) foram os mais freqüentes, com predominância de ventos com velocidades de até 3  $m s^{-1}$  (cerca de 97%). Nesta fase a variabilidade direcional e da intensidade dos ventos foi menor.

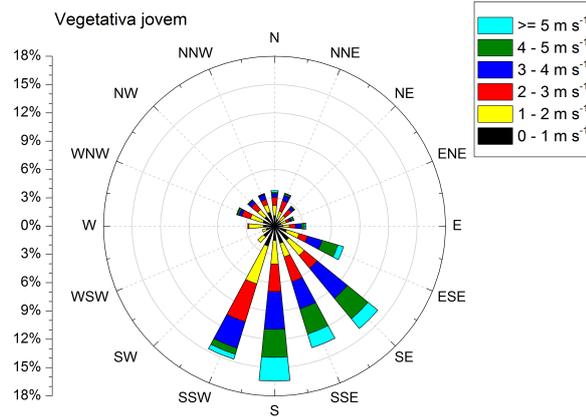


Figura 4.7: Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção (%), para fase vegetativa jovem (VJ) da cultura do milho, no sítio de Cruz Alta.

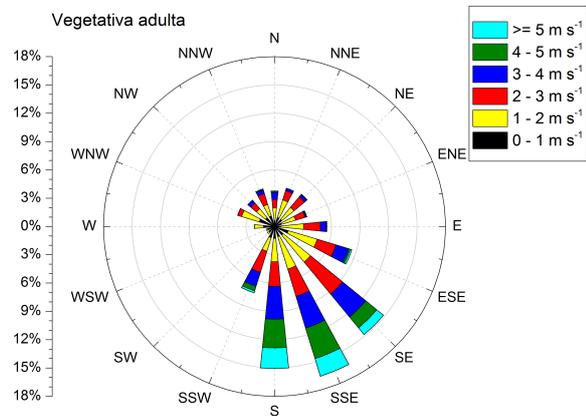


Figura 4.8: Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção (%), para fase vegetativa adulta (VA) da cultura do milho, no sítio de Cruz Alta.

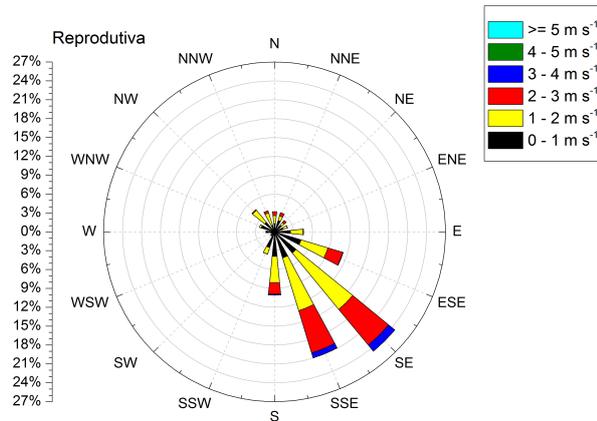


Figura 4.9: Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção (%), para fase reprodutiva (R) da cultura do milho, no sítio de Cruz Alta.

Na fase S, Figura 4.10, assim como na fase R, os ventos de SE (21%) e SSE (19%) foram os mais freqüentes e os ventos predominantes tiveram velocidades de até  $3 \text{ m s}^{-1}$  (cerca de 97%).

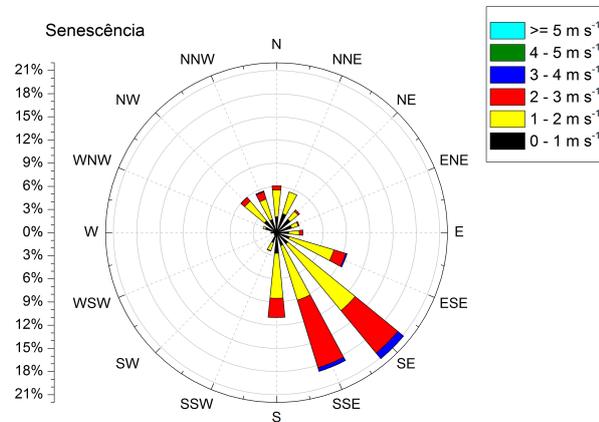


Figura 4.10: Rosa dos ventos - Frequência média do vento em relação a velocidade e direção (%), para fase senescência (S) da cultura do milho, no sítio de Cruz Alta.

As análises por fases mostraram que durante a cultura do milho os ventos mais intensos ocorreram nas fases VJ e VA. As direções predominantes foram SE e SSE (exceto para VJ). O setor (quadrante) entre ESE e SSW apresentou a predominância das frequências da velocidade e direção dos ventos, ou seja, para a fase VJ cerca de 64% dos ventos vem deste setor, na VA 61%, na R 70% e na Senescência 62%.

## 4.2 Representatividade espacial do sensor para o MCV

Para determinar a cobertura dos sensores para o MCV no sítio experimental de Cruz Alta, utilizou-se a equação 3.1.

As Figuras 4.11 e 4.12 representam a contribuição relativa do fluxo medido no período de toda a cultura do milho e também para cada uma das fases do PD e PC respectivamente, ou seja, o eixo horizontal indica quanto cada distância (a partir do sensor) contribui para o fluxo total medido.

Integrando-se as contribuições do fluxo pela distância, obtém-se a contribuição total a partir do sensor, conforme os gráficos das Figuras 4.13 e 4.14. Pode-se ver que conforme a cultura de milho se desenvolve em ambos os sistemas de plantio, a cobertura do sensor varia. Assim, para toda a cultura, 80% da contribuição na medida dos fluxos compreende a uma distância de aproximadamente 100 m da estação.

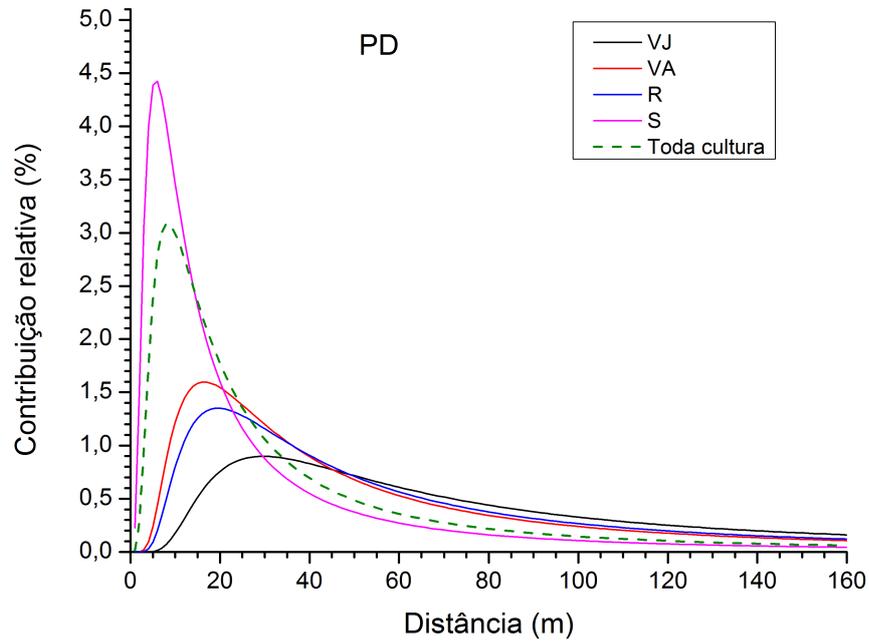


Figura 4.11: Representação da contribuição relativa do fluxo para toda a cultura e para as quatro fases fenológicas da cultura do milho para o Plantio Direto (PD) no sítio de Cruz Alta.

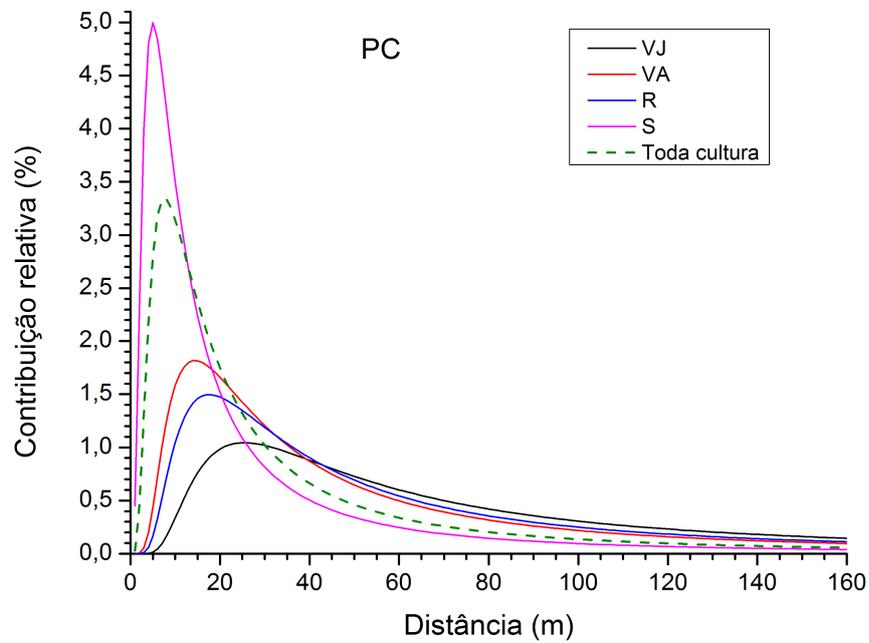


Figura 4.12: Representação da contribuição relativa dos fluxos para toda a cultura e para as quatro fases fenológicas da cultura do milho para o Plantio Convencional (PC) no sítio de Cruz Alta.

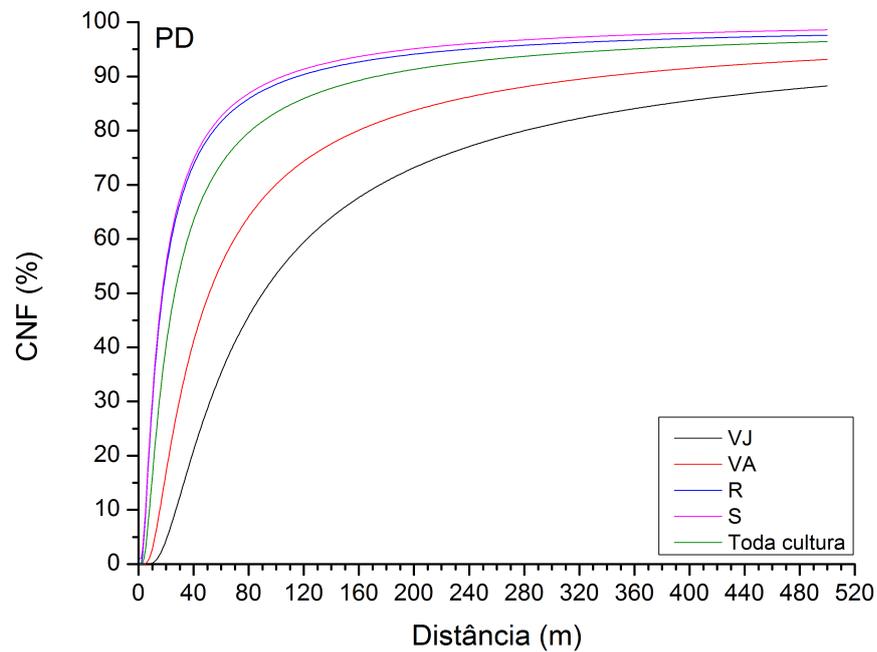


Figura 4.13: Representação da contribuição cumulativa normalizada para os fluxos medidos (CNF) para toda a cultura e para as quatro fases fenológicas da cultura do milho para o Plantio Direto (PD) no sítio de Cruz Alta.

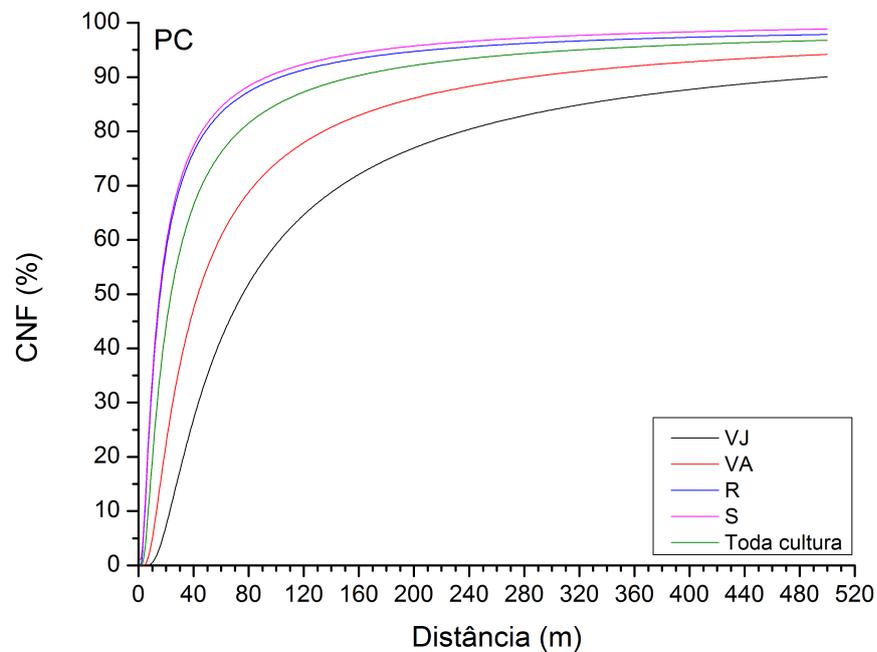


Figura 4.14: Representação da contribuição cumulativa normalizada para os fluxos medidos (CNF) para toda a cultura e para as quatro fases fenológicas da cultura do milho para o Plantio Convencional (PC) no sítio de Cruz Alta.

De acordo com a Figura 4.15, podemos observar que o PC tem uma representatividade de aproximadamente 67% e o PD 64% para uma distância de 40 m da torre de medida.

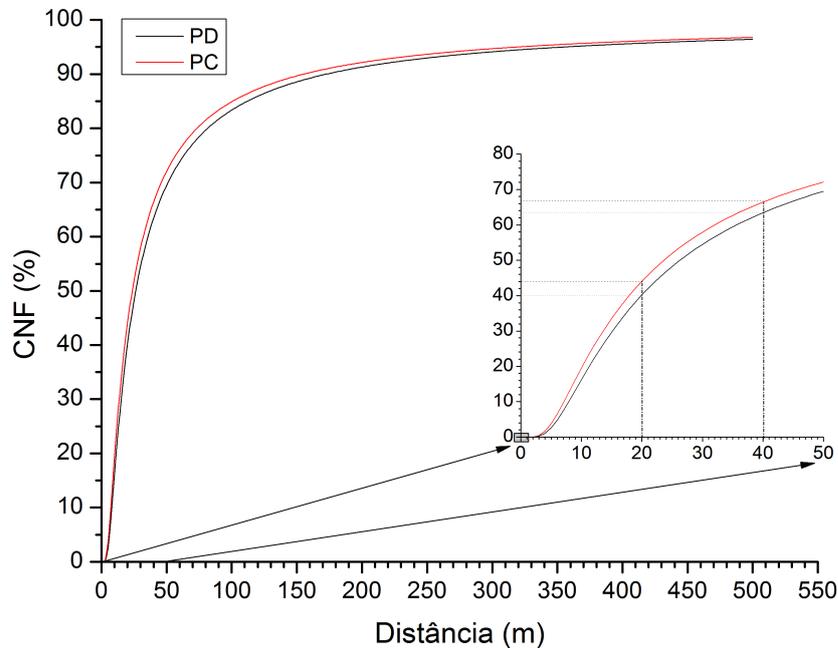


Figura 4.15: Representação da comparação da contribuição cumulativa normalizada para os fluxos medidos (CNF) para toda a cultura do milho para o Plantio Direto (PD) e para o Plantio Convencional (PC) no sítio de Cruz Alta, com destaque para os primeiros 40 m.

### 4.3 Fluxo de dióxido de carbono ( $CO_2$ )

A Figura 4.16 mostra a evolução do fluxo de  $CO_2$  para todo o período da cultura do milho no experimento de Cruz Alta. Nesta figura, as curvas dos dois sistemas de plantio (PD e PC) estão sobrepostas. A representação é feita com médias de meia em meia hora e sem dados preenchidos.

Os fluxos de  $CO_2$  vão desde valores positivos de aproximadamente  $15 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ , até valores negativos de aproximadamente  $-45 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$  em ambos sistemas de plantio.

Pode-se observar que no início da cultura (primeiros 40 dias), o fluxo médio apresenta valores mais positivos, isto é, o processo de respiração é maior que o processo da fotossíntese, uma vez que neste período a planta está se desenvolvendo mais lentamente. A partir do dia 43 após o plantio, o fluxo aumenta rapidamente até haver uma estabilização no crescimento da planta. E por volta do dia 80 o fluxo deixará de aumentar e ficará em torno de  $-40$

$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  por cerca de 30 dias e depois volta a diminuir rapidamente, devido ao processo de senescência da planta, ou seja, as folhas das plantas estão secando e desta forma a capacidade de realizar fotossíntese diminui.

Pode-se observar que a partir do dia 40, a parte positiva do fluxo, começa a aumentar lentamente até atingir  $10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  por volta do dia 135 e depois volta a diminuir.

Observa-se também que o fluxo apresenta valores positivos maiores no PC na primeira metade da cultura e na outra metade o PD apresenta valores positivos maiores.

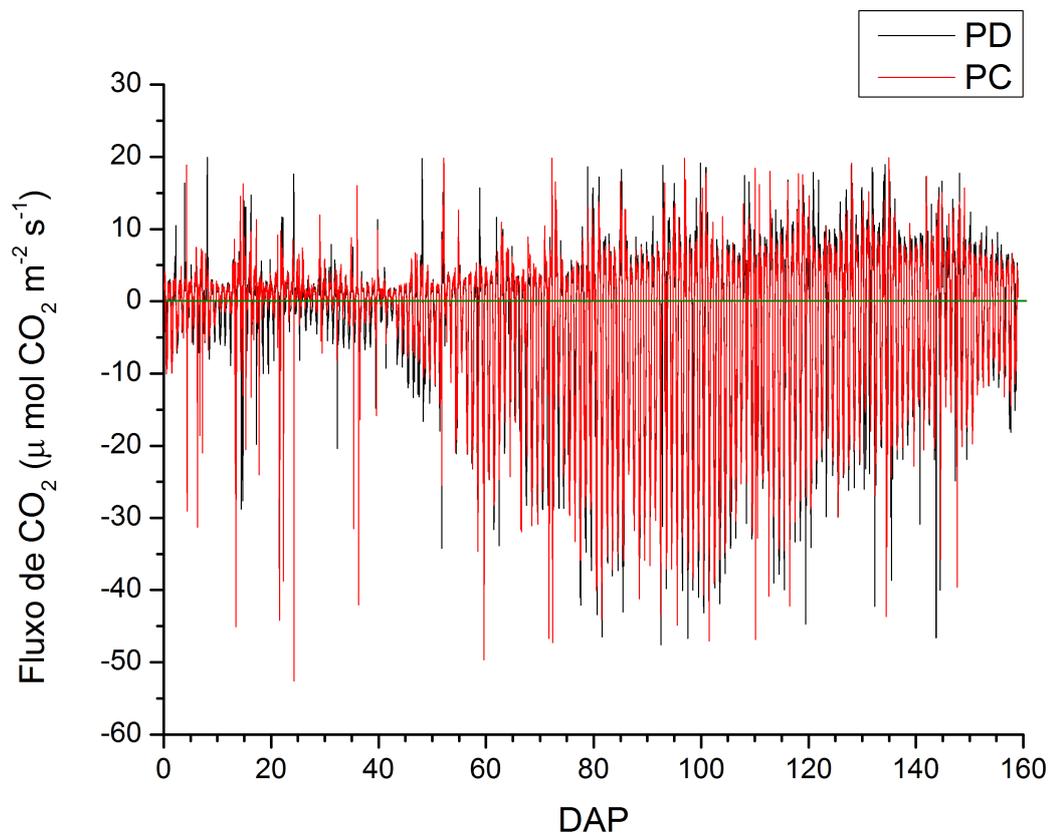


Figura 4.16: Fluxo de  $\text{CO}_2$  com médias de 30 minutos para os dois sistemas de plantio PD e PC da cultura do milho, no sítio de Cruz Alta.

A Figura 4.17 é semelhante a figura anterior, porém para uma melhor visualização da evolução do fluxo de  $\text{CO}_2$  o ciclo da cultura (para os dois sistemas de plantio) foi dividido em quatro fases (ver seção 4.4).

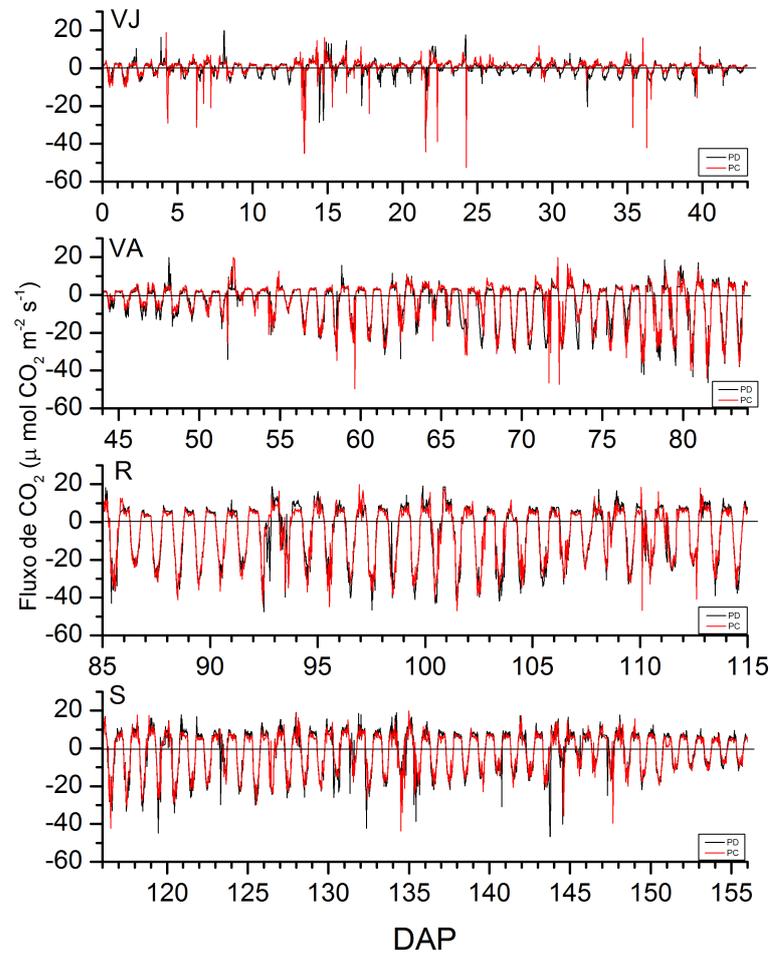


Figura 4.17: Fluxo de  $\text{CO}_2$  para cada uma das quatro fases (VJ, VA, R e S), com médias de 30 minutos para os dois sistemas de plantio PD e PC da cultura do milho, no sítio de Cruz Alta.

#### 4.4 Biomassa e índice de área foliar

O ciclo da cultura do milho pode ser caracterizado em função do número de dias desde a sementeira até a maturidade fisiológica ou a colheita. Para um melhor entendimento da evolução fenológica de uma determinada cultura é dividida em etapas ou estágios evolutivos. No experimento de Cruz alta, o milho atingiu o estágio vegetativo 13 (V13) e o reprodutivo (R6) em ambos sistemas de plantio, isto é, a planta apresentou 13 folhas completamente desenvolvidas e teve o desenvolvimento completo das espigas.

Os fatores ambientais tais como as variações na disponibilidade térmica, radiação solar, conteúdo de água, fertilidade do solo e fotoperíodo exercem grande influência sobre o de-

envolvimento fenológico do milho. O desenvolvimento de uma planta, pode ser analisada pelo equilíbrio entre relação emissão e absorção. Em um determinado momento uma mesma planta pode cumprir o papel de fonte, mas em outro pode ser um sorvedouro. De uma forma simples, pode-se dizer que as folhas são os principais sorvedouros de carbono e as espigas os principais armazenadores de carbono (uma vez que o milho será retirado e transportado para outra região).

Para o nosso estudo, o ciclo da cultura de 156 dias foi dividido em 4 fases seguindo Poething (2003) e Jans et al. (2010), como mostrado na Figura 4.18. Obviamente, uma caracterização fenológica da cultura por estádios permite maior detalhamento na descrição do ciclo da planta, em relação a utilização das fases, já que as fases envolvem um período de tempo maior. Porém para o nosso estudo será suficiente a divisão apresentada.

A evolução do índice de área foliar (IAF), e da altura da planta, estão representados na Figura 4.18. Nesta mesma figura também estão indicados as fases da cultura (vegetativa jovem, vegetativa adulta, reprodutiva e senescência).

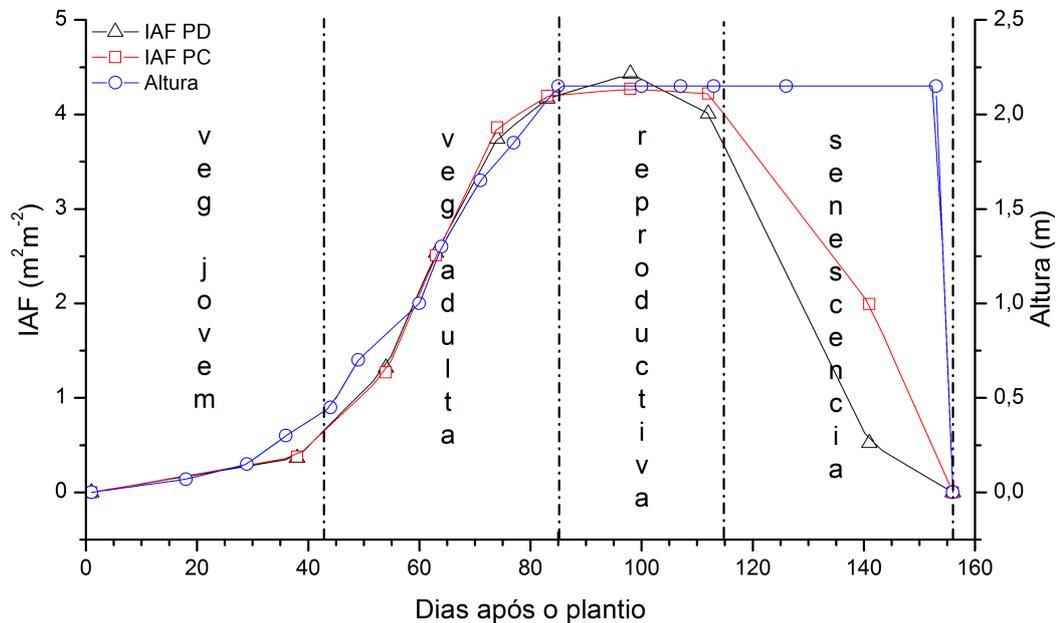


Figura 4.18: Fases fenológicas, altura média dos dois sistemas e medidas do Índice de Área Foliar das plantas de milho para os dois sistemas de plantio PD e PC para toda a cultura no sítio Cruz Alta.

A primeira fase, vegetativa jovem (VJ), teve início no dia do plantio e foi até quando a planta apresenta 4 folhas (DAP 1-43) conforme Figura 4.18. Nessa fase o fluxo de  $CO_2$  diário é positivo (não havendo absorção de carbono (Figuras 4.16 e 4.17)) comportando-

se como fonte de  $CO_2$  e o IAF é muito baixo, uma vez que a altura média da planta é de aproximadamente 0,45 m.

Na segunda fase, vegetativa adulta (VA) (DAP 44-84), verifica-se um rápido aumento do IAF (Figura 4.18) até atingir  $4,19 m^2 m^{-2}$  para o PC e  $4,17 m^2 m^{-2}$  para o PD e a liberação de  $CO_2$  também aumentará significativamente (Figuras 4.16 e 4.17) passando de emissor para absorvedor, a altura média das plantas chegará ao seu máximo 2,15 m e permanecerá até a colheita para ambos os sistemas de plantio.

Na terceira fase, a reprodutiva (R) (DAP 85-115), o IAF praticamente não muda e o pico máximo medido foi de  $4,27 m^2 m^{-2}$  PC e  $4,43 m^2 m^{-2}$  PD no DAP 98 e é nesta fase que a planta floresce e as espigas se desenvolvem e o fluxo de  $CO_2$  atingirá seu máximo de absorção, para voltar a diminuir.

Na última fase, a senescência (S) (DAP 116-156), as espigas amadurecem e o IAF decresce rapidamente para  $1,99 m^2 m^{-2}$  e  $0,52 m^2 m^{-2}$  para o PC e PD respectivamente, que é o resultado da senescência, sendo que o fluxo de  $CO_2$  diminui, voltando a ser positivo e passa a ter comportamento de fonte de  $CO_2$ .

A evolução das medidas de massa seca da folha e a total para os dois sistemas de plantio PD e PC, estão representados na Figura 4.19.

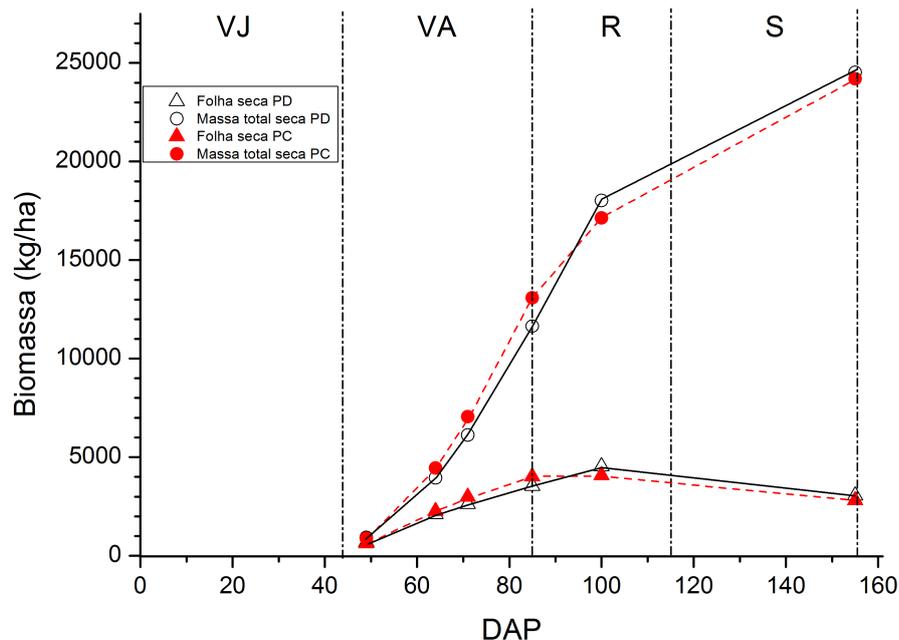


Figura 4.19: Medidas de massa seca da folha e massa total seca da planta do milho para o plantio direto (PD) e convencional (PC) durante o experimento de Cruz Alta.

Os dois sistemas apresentam valores bem próximos, prevalecendo o maior valor para o PD tanto na folha seca como na massa total seca. Verifica-se que os valores máximos medidos de massa seca da folha foram durante a fase reprodutiva do milho, onde a planta atinge sua altura máxima e IAF máximo. Ao final da cultura, massa total seca atingiu o valor de 24,514 toneladas de massa seca total por hectare ( $2,45 \text{ kg m}^{-2}$ ) para o PD e 24,185 toneladas de massa seca total por hectare ( $2,41 \text{ kg m}^{-2}$ ) para PC.

A produtividade média para os dois sistemas de plantio foi:  $9231 \text{ kg ha}^{-1}$  ( $153,9 \text{ sc ha}^{-1}$ ) no PC e  $9749 \text{ kg ha}^{-1}$  ( $162,5 \text{ sc ha}^{-1}$ ) no PD. A produtividade média para o estado do Rio Grande do sul para a mesma safra (2010/2011) foi de  $5255 \text{ kg ha}^{-1}$ .

#### 4.5 Determinação do filtro de $\sigma_w$

Na análise dos dados noturnos, é necessário determinar um valor limite de  $\sigma_w$  (ou  $u_*$ ) para quando há pouca turbulência. A Figura 4.20 mostra a relação entre o fluxo de  $CO_2$  noturno e o desvio da velocidade do vento vertical  $\sigma_w$ , obtido a partir dos dados do PC (resultado semelhante obteve-se para o PD). Segundo Acevedo et al. (2009), o uso de  $\sigma_w$  na filtragem de dados pode melhor representar a taxa de respiração, pois numa série de tempo específica (por exemplo, 30 min),  $\sigma_w$  apresenta menor variabilidade que  $u_*$ . Assim, conforme o gráfico, o limite de dados noturnos do fluxo de  $CO_2$  é para dados onde  $\sigma_w < 0,15$ .

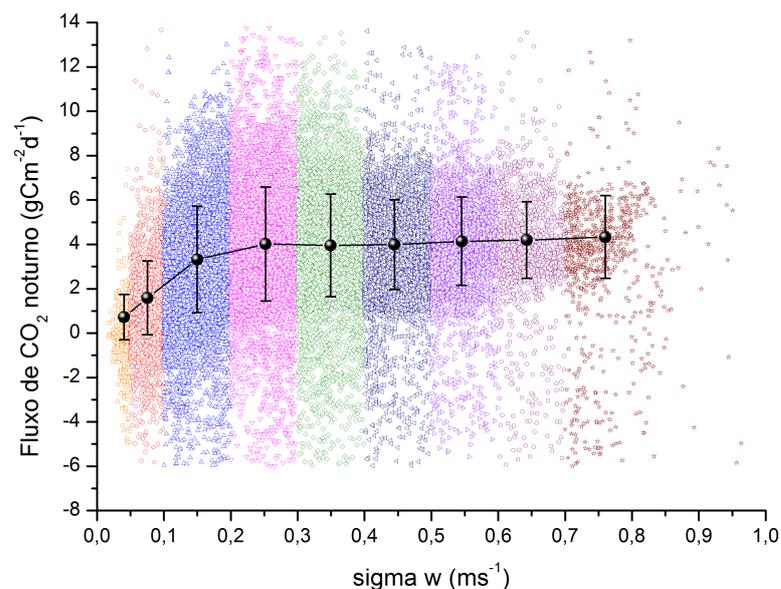


Figura 4.20: Relação do fluxo de  $CO_2$  noturno (NEE) com o desvio da velocidade vertical do vento ( $\sigma_w$ ), onde as cores indicam as diferentes classes de magnitude do  $\sigma_w$ .

#### 4.6 Separação do fluxo de $CO_2$ em GPP, NEE e $R_e$

O método padrão para o particionamento do fluxo de NEE medido, ou seja, para determinar os seus principais componentes GPP e  $R_e$ , baseia-se em dados noturnos de NEE (que é igual a respiração do ecossistema total durante a noite) e extrapola a respiração ao período diurno (REICHSTEIN et al., 2005).

Os métodos utilizados para o particionamento dos fluxos em NEE, GPP e  $R_e$ , geralmente também são utilizados para preencher dados faltantes. No particionamento do fluxo e no preenchimento de dados faltantes, são necessárias as medidas do NEE e das variáveis ambientais medidas no local (temperatura de ar ou do solo e radiação fotossinteticamente ativa - PAR).

Os métodos de preenchimento de falhas, nos dados obtidos pelo MCV, foram desenvolvidos principalmente para obter o NEE anual de diversos ecossistemas. Para o preenchimento dos dados faltantes (*gap filling*) devido ao mau funcionamento dos sensores, falta de energia, precipitação, sujeira, pouca turbulência, etc., utilizou-se o método para o preenchimento destes dados faltantes ou não físicos descrito na seção 2.6. Vários trabalhos estão sendo realizados para que o sistema seja descrito de forma mais correta possível (LASSLOP et al., 2010; MOFFAT et al., 2007; FALGE et al., 2001).

Segundo Baldocchi (2003), as falhas nas séries de dados são inevitáveis quando são construídos registros de fluxos medidas pelo MCV de longo prazo, e o índice de rejeição dos dados no período de um ano é de aproximadamente 35% (FALGE et al., 2001). Para os 156 dias analisados neste trabalho, o total de dados desprezados após os tratamentos foram 22% para a estação do PD e 15% para a estação do PC.

O fluxo de  $CO_2$  noturno descrito como uma função da temperatura do ar é apresentado nas Figuras 4.21 e 4.22 para o sistema de PD e PC respectivamente. Os pontos representam médias diárias dos fluxos noturnos (radiação global  $< 4 W m^{-2}$ ).

A relação exponencial com a temperatura do ar explicou a maior parte da variância observada ( $r_{PD}^2 = 0,65$  e  $r_{PC}^2 = 0,67$ ). Assim como observado por Jans et al. (2010), não pode distinguir-se nenhum efeito das diferentes fases fenológicas.

Os picos das emissões encontrados foram de  $8 - 9 \mu mol m^{-2} s^{-1}$  e  $7 - 8 \mu mol m^{-2} s^{-1}$  para o PD e PC respectivamente, um pouco menor que os  $9 - 11 \mu mol m^{-2} s^{-1}$  encontrados por Verma et al. (2005) para o milho de sequeiro e os  $10 - 11 \mu mol m^{-2} s^{-1}$  encontrados por Jans et al. (2010), também milho de sequeiro.

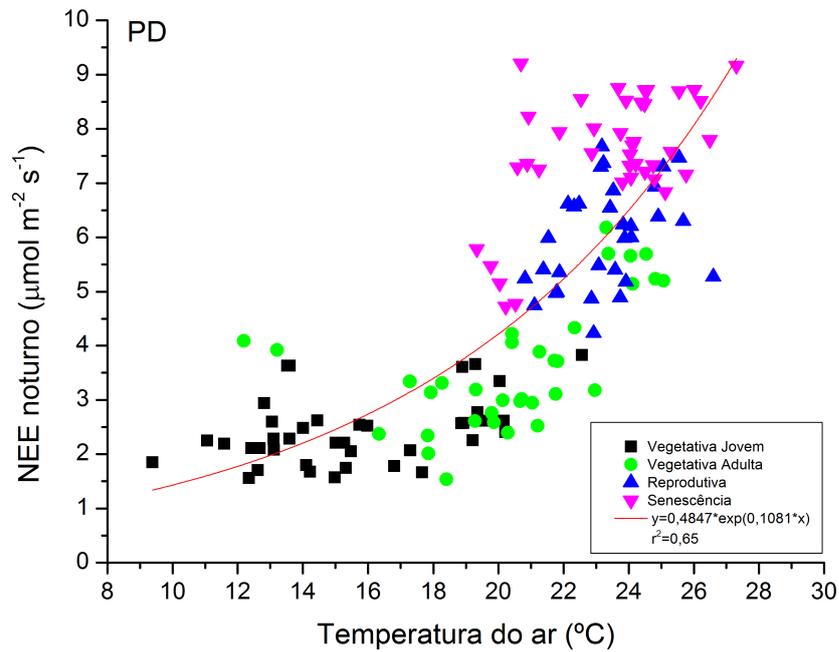


Figura 4.21: Resposta do NEE noturno com a temperatura do ar para as diferentes fases fenológicas no sistema de plantio direto.

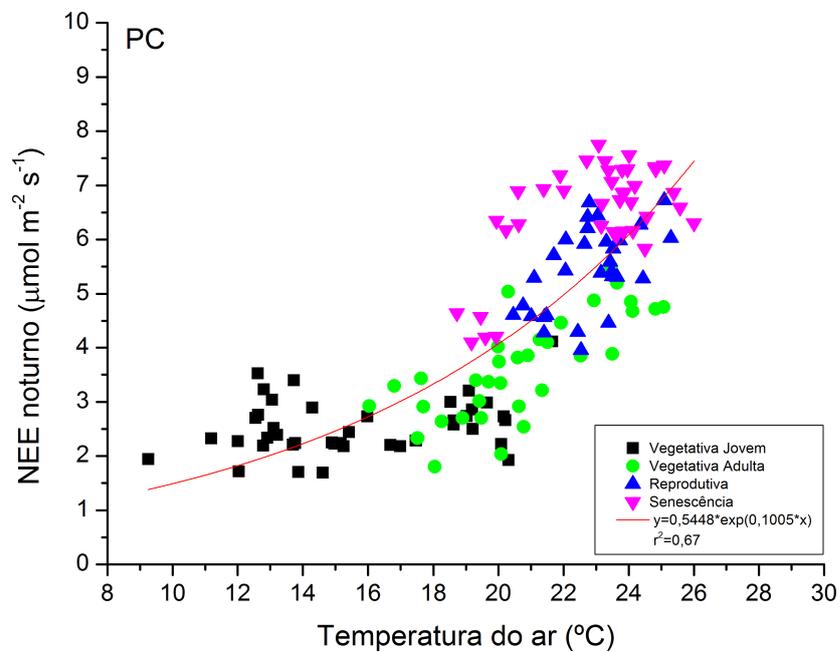


Figura 4.22: Resposta do NEE noturno com a temperatura do ar para diferentes as fases fenológicas no sistema de plantio convencional.

A taxa de respiração para os dados diurnos foram estimados utilizando os parâmetros equação 2.17 para períodos de 15 dias. A relação com a Temperatura do ar encontrado aqui foi usada para preencher as lacunas dos dados noturnos, conforme especificado na seção 2.6.

A resposta do fluxo de  $CO_2$  diurno com relação à radiação fotossinteticamente ativa - PAR para as diferentes fases fenológicas no sítio experimental de Cruz Alta estão apresentadas nas Figuras 4.23 e 4.24 para os sistemas de PD e PC respectivamente.

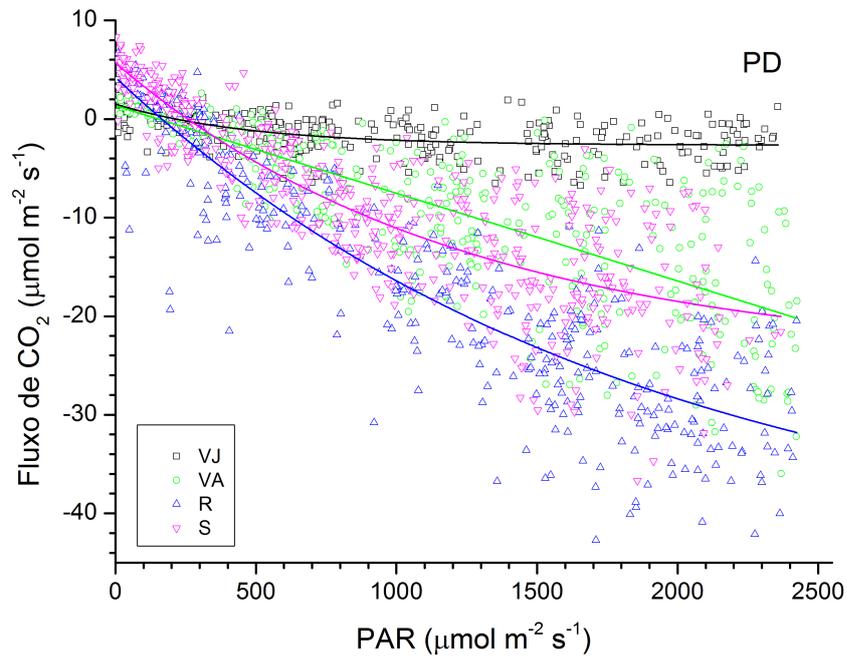


Figura 4.23: Resposta do NEE diurno com a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) para as diferentes fases fenológicas no sistema de plantio direto.

Nenhuma indicação de saturação da luz no dossel foi encontrada nas fases vegetativa adulta, reprodutiva e senescência no PD e PC. As Figuras 4.23 e 4.24 mostram que há uma resposta aproximadamente linear para a radiação PAR nestas fases fenológicas. Isto também foi observado por Jans et al. (2010), Suyker et al. (2004) e Baldocchi (1994).

Na fase vegetativa jovem o fluxo de  $CO_2$  é positivo (isto é, em média não há captura líquida) e a resposta do fluxo de  $CO_2$  com a radiação PAR nesta fase mostrou uma relação curvilínea e uma saturação da luz em ambos os sistemas de plantio. Nas fases VA e S observa-se uma resposta da luz com valores bem próximos para ambos os sistemas de plantio. A resposta na fase reprodutiva (PD e PC) foi diferente (mais negativa), provavelmente devido ao maior IAF. Portanto, a absorção de carbono líquido foi aumentando conforme a cultura foi se desenvolvendo, chegando ao máximo na fase Reprodutiva e depois voltou a diminuir

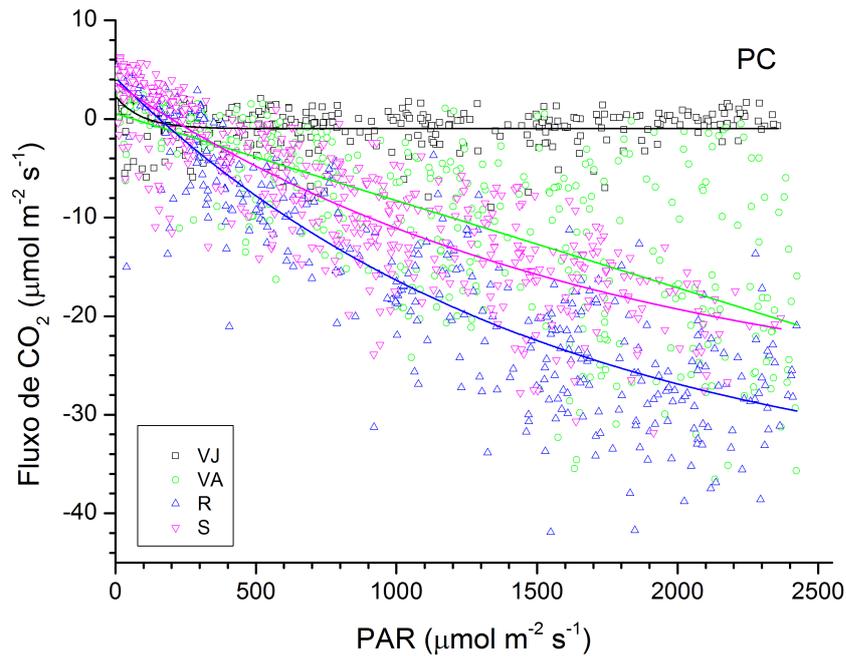


Figura 4.24: Resposta do NEE diurno com a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) para diferentes fases fenológicas no sistema de plantio convencional.

até a colheita das culturas do PD e PC.

Assim, a fim de preencher as lacunas grandes nos dados de fluxo do período diurno, uma função hiperbólica retangular de resposta a luz foi usada conforme Falge et al. (2001) e Reichstein et al. (2005). Para dados de NEE faltantes durante o dia, a equação 2.25 foi utilizada, onde os parâmetros foram estimados para períodos de 15 dias.

#### 4.7 Evolução do $GPP$ , da $R_e$ e do $NEE$ na cultura do milho

A seguir serão apresentados as distribuições diárias do  $GPP$ ,  $R_e$  e  $NEE$  para o período da safra do milho de 2010/2011, para os sistemas de PD e PC no sítio experimental de Cruz Alta - RS.

A Figura 4.25, mostra a distribuição diária do  $GPP$  durante a safra do milho. Verifica-se que no início do cultivo, na fase VJ, o  $GPP$  apresenta valores em torno de  $-2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para o PD e um pouco menor para o PC. Na fase VA o  $GPP$  aumenta consideravelmente atingindo valores em torno de  $-14 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para o PD e  $-13 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  no PC. Na fase R, o valor do  $GPP$  fica mais constante, em média  $-12 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em ambos os sistemas. Na ultima fase S, o  $GPP$  diminui até  $-5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , apresentando valores um pouco

maiores para o PD, quando então no dia DAP 156 a safra foi colhida. Os máximos valores de GPP para o experimento foram verificados na fase R, atingindo  $-14,81 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $-13,07 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  no PD e PC respectivamente.

Os resultados obtidos neste estudo, foram menores que os encontrados na literatura conforme podemos ver na Tabela 4.1. Onde Turner et al. (2003) para PD de sequeiro e Suyker et al. (2005) para o PD irrigado obtiveram o valor máximo no GPP de  $-27 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em seus respectivos sítios de estudo, enquanto que Jans et al. (2010) para o PC de sequeiro e Béziat, Ceschia e Dedieu (2009) no PC irrigado encontraram  $-24,7 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $-19,6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  respectivamente.

Esta diferença pode ser devido a variedade do milho, tipo de solo, clima e principalmente o footprint do sítio experimental.

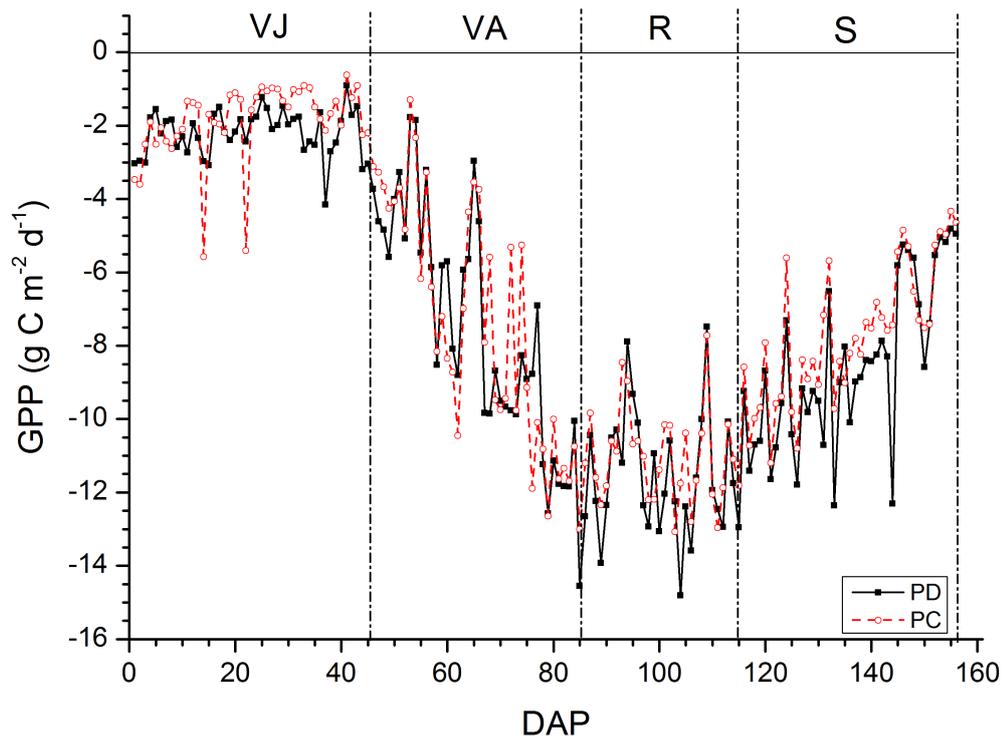


Figura 4.25: Distribuição da produção primária bruta (GPP), para dois sistemas de plantio de milho, direto (PD) e convencional (PC), para o sítio de Cruz Alta – RS.

Na Figura 4.26, está representada a evolução do GPP para cada uma das quatro fases da cultura, de cima para baixo VJ, VA, R e S. Podemos ver que o PD apresentou em média os valores maiores de GPP para as fases VJ, R e S e na fase VA os dois sistemas apresentam valores semelhantes.

Tabela 4.1: Artigo de referência, GPP máximo ( $g C m^{-2} d^{-1}$ ),  $R_e$  máximo ( $g C m^{-2} d^{-1}$ ), NEE máximo ( $g C m^{-2} d^{-1}$ ), ano das observações micrometeorológicas e localização com latitude, longitude e país do sítio experimental. Comparações para diferentes formas de cultivo do milho, plantio direto e plantio convencional de sequeiro e irrigado.

Artigo de referência	PD (sequeiro)						
	$GPP_{max}$	$R_{e_{max}}$	$NEE_{max}$	Ano	Latitude	Longitude	País
Turner et al. (2003)	-27	—	—	1999	40°00'N	88°17'W	EUA
Verma et al. (2005)	—	11	-17	2001	41°10'N	96°26'W	EUA
Verma et al. (2005)	—	9	-15	2003	41°10'N	96°26'W	EUA
Hollinger et al. (2005)	—	—	-13,5	1997	40°00'N	88°17'W	EUA
Hollinger et al. (2005)	—	—	-18,5	1999	40°00'N	88°17'W	EUA
Hollinger et al. (2005)	—	—	-12,5	2001	40°00'N	88°17'W	EUA
<b>Cruz Alta</b>	-14,81	9,08	-10	2011	28°36'S	53°40'W	Brasil
PD (irrigado)							
Suyker et al. (2005)	-27	13	-17	2002	41°09'N	96°28'W	EUA
Verma et al. (2005)	—	—	-17	2001	41°09'N	96°28'W	EUA
Verma et al. (2005)	—	13	-17	2002	41°09'N	96°28'W	EUA
Verma et al. (2005)	—	—	-15	2003	41°09'N	96°28'W	EUA
PC (sequeiro)							
Jans et al. (2010)	-24,7	16,6	-17	2007	51°59'N	05°38'E	Holanda
Baker/Griffis (2005)	—	—	-14	2003	—	—	EUA
<b>Cruz Alta</b>	-13,07	7,56	-8,86	2011	28°36'S	53°40'W	Brasil
PC (irrigado)							
Béziat et al. (2009)	-19,6	11	-10,2	2006	43°49'N	01°23'E	França
Alberti et al. (2010)	—	—	-18,1	2007	46°00'N	13°01'E	Itália
Alberti et al. (2010)	—	—	-17,8	2008	46°00'N	13°01'E	Itália

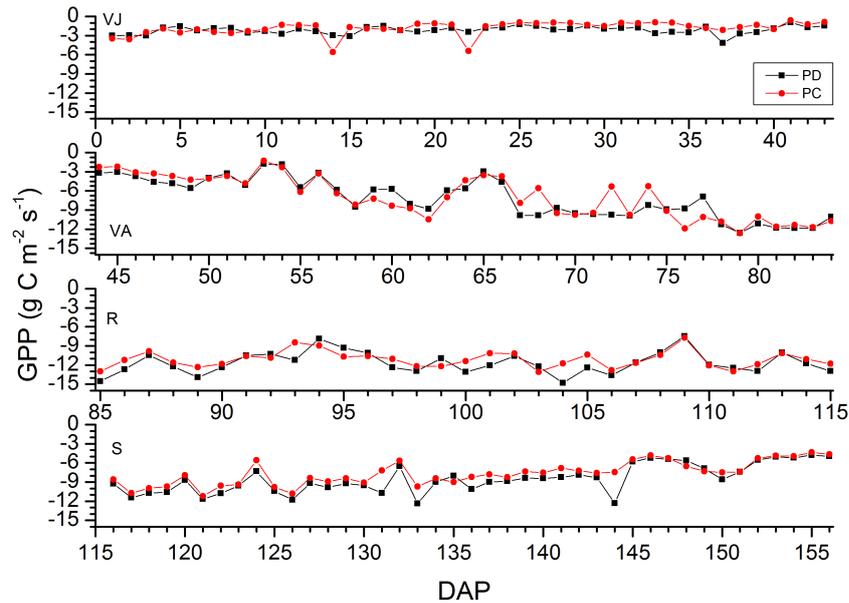


Figura 4.26: Distribuição da produção primária bruta (GPP) para quatro fases da cultura do milho, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC): vegetativo jovem (VJ), vegetativo adulto (VA), reprodutiva (R), e senescência (S).

Na Figura 4.27, está representada a distribuição da respiração do ecossistema durante a safra do milho. Na fase VJ, os valores da  $R_e$  chegaram aproximadamente até  $4 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e foram maiores do que  $1,5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , sendo maior para o PC. Na fase VA, os valores da  $R_e$  aumentam gradativamente para os dois sistemas, onde inicialmente o PC apresenta maiores valores, enquanto que no final desta fase o PD tem maior  $R_e$ . No PD a  $R_e$  atinge  $6,20 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e no PC  $5,26 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Na fase R a respiração do ecossistema continua a aumentar, porém mais lentamente, e o PD tem valores maiores que o PC. Na fase S os valores de  $R_e$  atingem  $9,08 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $7,56 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  no PD e PC respectivamente, sendo os maiores valores da safra do milho, e a partir daí, a  $R_e$  diminui, chegando a  $4,90 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $4,40 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para o PD e PC respectivamente no dia da colheita, que é resultado da senescência da planta, ou seja, as plantas começam a secar.

Conforme a Tabela 4.1, Verma et al. (2005) obteve  $9$  e  $11 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para a PD de sequeiro e Suyker et al. (2005) obteve  $13 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para o PD irrigado. Jans et al. (2010) no PC de sequeiro e Béziat, Ceschia e Dedieu (2009) no PC irrigado encontram  $16,6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $11 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  respectivamente.

Na Figura 4.28, está representada a evolução da respiração do ecossistema para cada uma das quatro fases da cultura. Podemos observar que a  $R_e$  é maior para o PC na fase VJ e na maior parte da VA. A partir do DAP 76 (fase VA), o PD passa a apresentar uma maior  $R_e$ ,

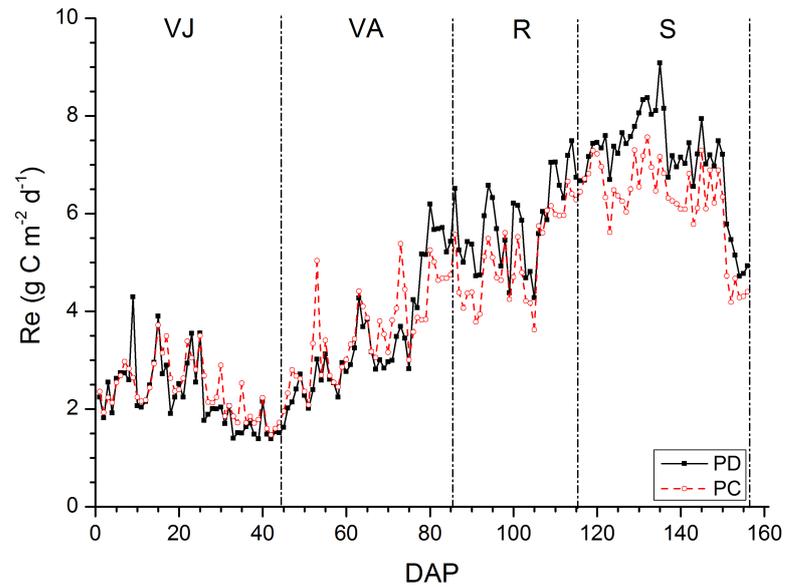


Figura 4.27: Distribuição da respiração total do ecossistema ( $R_e$ ), para dois sistemas de plantio de milho, direto (PD) e convencional (PC), para o sítio de Cruz Alta – RS.

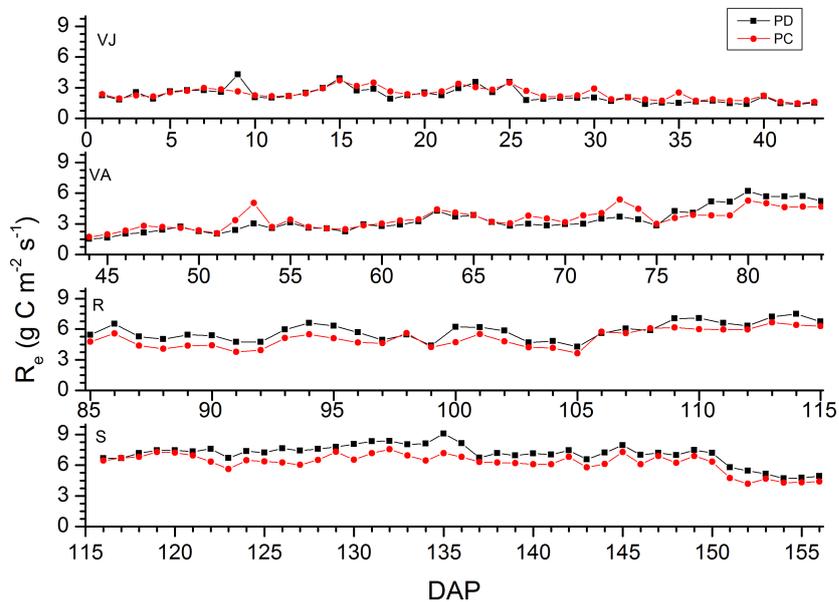


Figura 4.28: Distribuição da respiração total do ecossistema ( $R_e$ ), para quatro fases da cultura do milho, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC): vegetativo jovem (VJ), vegetativo adulto (VA), reprodutiva (R), e senescência (S).

que também pode ser observado nas fases R e S da cultura.

Analisando-se a Figura 4.18 observa-se que o IAF começa a diminuir mais cedo no

PD (aproximadamente DAP 100) do que no PC e pela Figura 4.19 observamos que o PD apresenta uma maior quantidade de massa seca (a partir do DAP 92) em relação ao PC. Assim, no PD as plantas apresentam menos folhas verdes para a realização da fotossíntese e conseqüentemente (aumento das folhas secas) há um aumento da respiração do ecossistema.

A distribuição do NEE nos dois sistemas de plantio da cultura do milho, esta representada nas Figuras 4.29 e 4.30. No início da cultura, na fase VJ, o PC apresenta valores positivos em toda a fase, e o PD tem predomínio de valores positivos, porém no final da fase o fluxo diurno já inverte. Na fase VA, o fluxo de  $C - CO_2$  aumenta negativamente (aumenta a absorção) chegando a  $-9,13 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $-8,25 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para o PD e PC respectivamente. Na fase R a tendência do NEE é se manter com pouca variação, porém há uma diminuição do NEE. Os máximos valores foram de  $-10 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $-8,86 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  nos dias DAP 104 e 103 para o PD e PC respectivamente. Na senescência, a absorção de  $C - CO_2$  diminui, voltando a liberar  $C - CO_2$ .

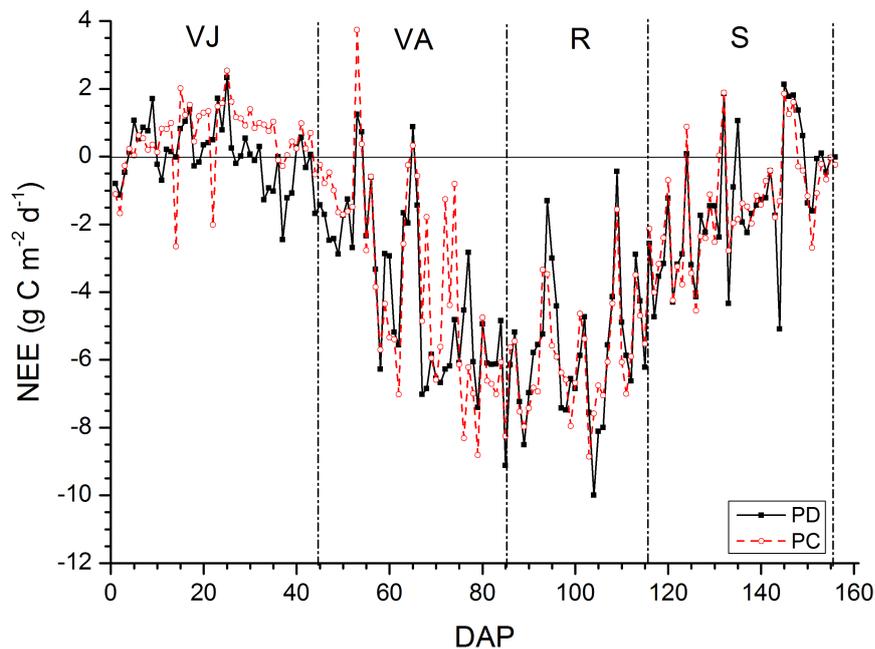


Figura 4.29: Distribuição da troca líquida do ecossistema (NEE), para dois sistemas de plantio de milho, direto (PD) e convencional (PC), para o sítio de Cruz Alta – RS.

Conforme a Tabela 4.1, foram encontrados valores máximos de NEE para o PD de sequeiro que variam de  $-12,5 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (HOLLINGER; BERNACCHI; MEYERS, 2005) até  $-17 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (VERMA et al., 2005) e para o milho irrigado sob PD de  $-15 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (VERMA et al., 2005) a  $-17 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (VERMA et al., 2005;

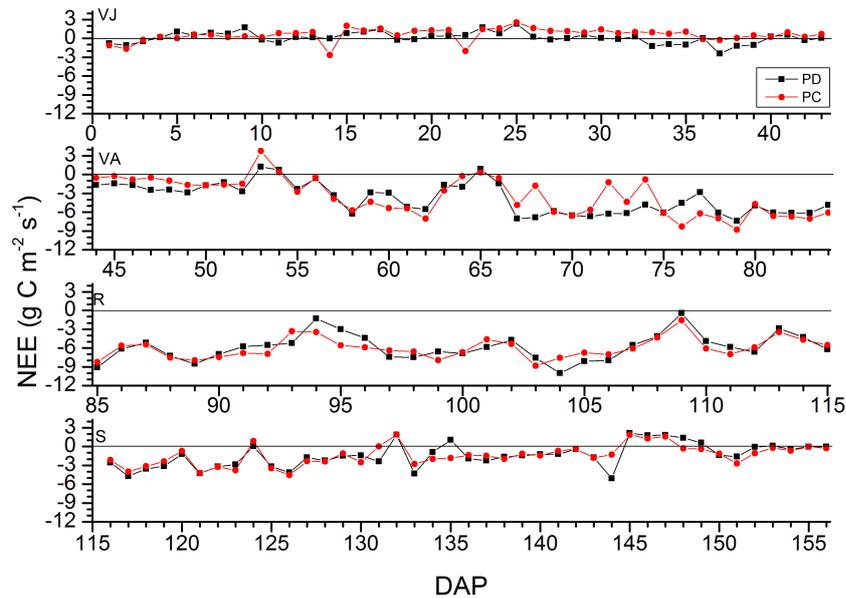


Figura 4.30: Distribuição da troca líquida do ecossistema (NEE), para quatro fases da cultura do milho, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC): vegetativo jovem (VJ), vegetativo adulto (VA), reprodutiva (R), e senescência (S).

SUYKER et al., 2005). No PC de sequeiro, (BACKER; GRIFFIS, 2005) e (JANS et al., 2010) obtiveram valores de  $-14 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e  $-17 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  respectivamente e para o PC irrigado (BÉZIAT; CESCHIA; DEDIEU, 2009) obteve  $-10,2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e (ALBERTI et al., 2010) encontrou valores de  $-17,8$  e  $-18,1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ .

As Figuras 4.31 até 4.35 apresentam as informações sobre a troca de carbono acumulada (GPP,  $R_e$  e NEE) para ambos os sistemas de plantio.

Como verifica-se nas Figuras 4.31 e 4.32, os valores do GPP,  $R_e$  e NEE são maiores para o PD. Os valores acumulados de GPP foram  $-1095 \text{ g C m}^{-2}$  e  $-1023 \text{ g C m}^{-2}$ , de  $R_e$   $705 \text{ g C m}^{-2}$  e  $661 \text{ g C m}^{-2}$  e de NEE  $-390 \text{ g C m}^{-2}$  e  $-362 \text{ g C m}^{-2}$  para o PD e PC respectivamente. Embora o PD emita mais carbono na forma de respiração que o PC, ele absorve mais carbono pela fotossíntese que o PC, desta forma, para o ciclo do milho, o PD absorve  $28 \text{ g C m}^{-2}$  a mais que o PC.

A comparação com outras referências de valores acumulados de GPP,  $R_e$  e NEE obtidos no experimento de Cruz Alta, apresenta-se na Tabela 4.2.

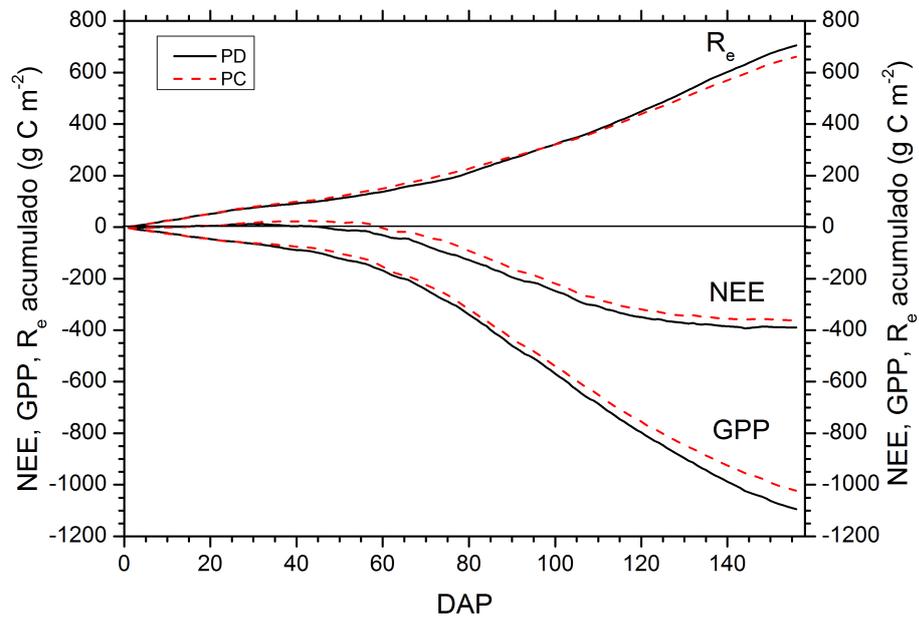


Figura 4.31: Distribuição acumulada da produção primária bruta (GPP), da respiração do ecossistema ( $R_e$ ) e da troca líquida do ecossistema (NEE), para os sistemas de plantio de milho, direto (PD) e convencional (PC), para o sítio de Cruz Alta – RS.

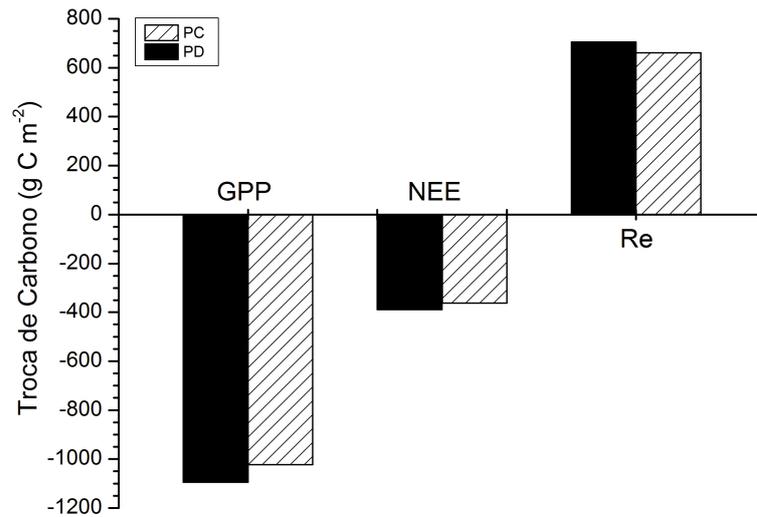


Figura 4.32: Distribuição acumulada da troca de carbono, para os sistemas de plantio de milho, direto (PD) e convencional (PC), para o sítio de Cruz Alta – RS.

Para o PD irrigado durante a cultura do milho, Suyker et al. (2005) e Verma et al. (2005) encontraram os valores acumulados de GPP de  $-1744 \text{ g C m}^{-2}$  e  $-1800 \text{ g C m}^{-2}$  respectivamente e para o PD de sequeiro Verma et al. (2005) obteve  $-1550 \text{ g C m}^{-2}$ . No PC irrigado, Alberti et al. (2010) encontrou  $-1471 \text{ g C m}^{-2}$  para todo o ano de 2007 e  $-1148 \text{ g C m}^{-2}$  para todo o ano de 2008 e Jans et al. (2010) obteve o valor anual de  $-1794 \text{ g C m}^{-2}$  para o PC de sequeiro em 2007.

Tabela 4.2: Artigo de referência, GPP,  $R_e$ , e NEE acumulados ( $\text{g C m}^{-2}$ ), ano das observações micrometeorológicas e período no qual correspondem os valores acumulados. Comparações para diferentes formas de cultivo do milho.  $PD_i$ = plantio direto irrigado,  $PD_s$ = plantio direto de sequeiro,  $PC_i$ = plantio convencional irrigado e  $PC_s$ = plantio convencional de sequeiro.

Artigo de referência	Sistema	$GPP_a$	$R_{e_a}$	$NEE_a$	Ano	Período
Suyker et al. (2005)	$PD_i$	-1744	1154	-590	2002	cultura
Verma et al. (2005)	$PD_i$	-1800	1120	-680	2001	cultura
Verma et al. (2005)	$PD_s$	-1570	870	-700	2001	cultura
Hollinger et al. (2005)	$PD_s$	—	—	-733	1997	cultura
Hollinger et al. (2005)	$PD_s$	—	—	-880	1999	cultura
Hollinger et al. (2005)	$PD_s$	—	—	-702	2001	cultura
Hollinger et al. (2005)	$PD_s$	—	—	-532	1997	anual
Hollinger et al. (2005)	$PD_s$	—	—	-692	1999	anual
Hollinger et al. (2005)	$PD_s$	—	—	-505	2001	anual
<b>Cruz Alta</b>	$PD_s$	-1095	705	-390	2010/11	cultura
Alberti et al. (2010)	$PC_i$	-1471	—	-473	2007	anual
Alberti et al. (2010)	$PC_i$	-1148	—	-343	2008	anual
Béziat et al. (2009)	$PC_i$	—	—	$-186 \pm 42$	2006	anual
Baker/Griffis (2005)	$PC_s$	—	—	-290	2003	anual
Jans et al. (2010)	$PC_s$	-1794	1197	-597	2007	anual
<b>Cruz Alta</b>	$PC_s$	-1023	661	-362	2010/11	cultura

Para os valores acumulados de  $R_e$  no PD irrigado, Suyker et al. (2005) e Verma et al. (2005) encontraram  $1154 \text{ g C m}^{-2}$  e  $1120 \text{ g C m}^{-2}$  respectivamente no período da cultura e Verma et al. (2005) obteve  $870 \text{ g C m}^{-2}$  para o PD de sequeiro. Para o PC de sequeiro, Jans et al. (2010) encontrou o valor de  $1197 \text{ g C m}^{-2}$  no valor acumulado na  $R_e$  para o período de um ano.

Os valores do NEE acumulado para o PD irrigado encontrados por Suyker et al. (2005) e Verma et al. (2005) para o período da cultura do milho foram de  $-590 \text{ g C m}^{-2}$  e  $-680 \text{ g C m}^{-2}$ . Para o PD de sequeiro, Verma et al. (2005) obteve  $-700 \text{ g C m}^{-2}$  e Hollinger, Bernacchi e Meyers (2005) obtiveram  $-733 \text{ g C m}^{-2}$ ,  $-880 \text{ g C m}^{-2}$  e  $-702 \text{ g C m}^{-2}$  para os anos de 1997, 1999 e 2001 respectivamente. Hollinger, Bernacchi e Meyers (2005) definiram o início do período da cultura a partir do dia em que o NEE passa de fonte de carbono para sumi-

douro de carbono, equivalente ao início da fase VA do sítio de Cruz Alta. Para estes mesmos anos, Hollinger, Bernacchi e Meyers (2005), encontraram  $-532 \text{ g C m}^{-2}$ ,  $-692 \text{ g C m}^{-2}$  e  $-505 \text{ g C m}^{-2}$  respectivamente para um ano de análise.

Os valores do NEE acumulado para o PC irrigado encontrados por Alberti et al. (2010) foram de  $-473 \text{ g C m}^{-2}$  e  $-343 \text{ g C m}^{-2}$  para os anos de 2007 e 2008 respectivamente. E Béziat, Ceschia e Dedieu (2009) encontrou  $-186 \pm 42$  para o ano de 2006 (neste ano o milho foi cortado para a silagem quando o milho atingiu a fase adulta). Para o PC de sequeiro, Backer e Griffis (2005) e Jans et al. (2010) obtiveram  $-597 \text{ g C m}^{-2}$  e  $-290 \text{ g C m}^{-2}$  respectivamente para o período de um ano.

Na Figura 4.33, observa-se claramente que o GPP acumulado é maior para o PD em todas as fase evolutivas do milho, resultando numa maior produção primária bruta no sistema de plantio direto quando comparado ao sistema de plantio convencional. A maior produção primária bruta ocorre nas fases R e S.

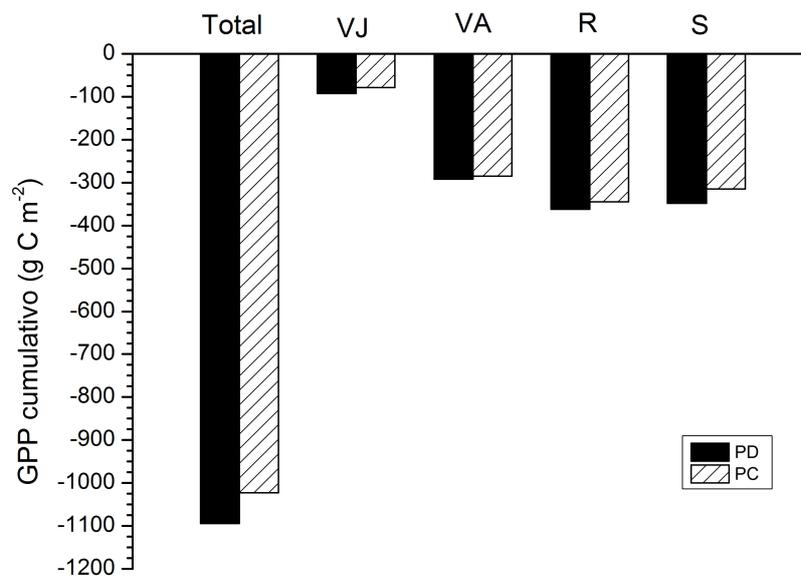


Figura 4.33: Distribuição cumulativa do GPP, para os sistemas de plantio de milho, direto (PD) e convencional (PC), para quatro fases da cultura do milho, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC): vegetativo jovem (VJ), vegetativo adulto (VA), reprodutiva (R), e senescência (S).

Na Figura 4.34, nota-se que a respiração do ecossistema acumulado para todo o ciclo da cultura do milho é maior no PD, porém nas fases VJ e VA, a respiração é maior no sistema de PC e nas fases R e S a respiração é maior no PD. A maior respiração do ecossistema é observado no final da cultura, na fase S.

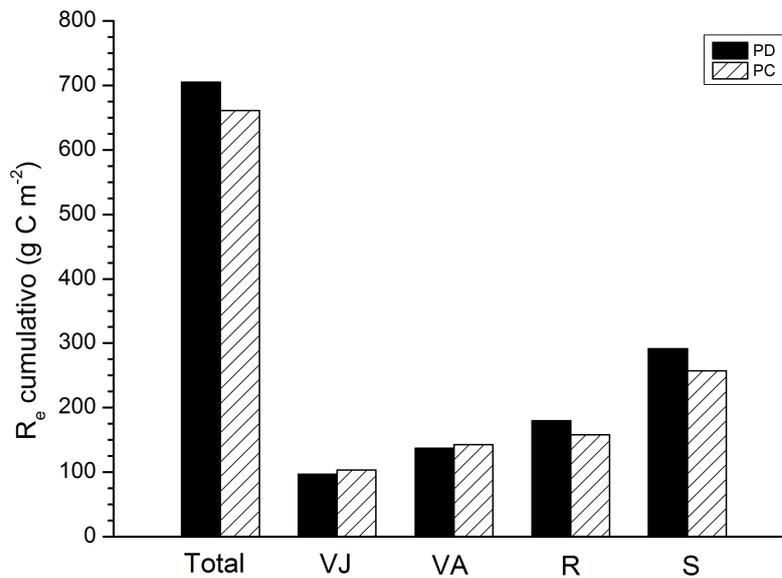


Figura 4.34: Distribuição cumulativa da  $R_e$ , para quatro fases da cultura do milho, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC): vegetativo jovem (VJ), vegetativo adulto (VA), reprodutiva (R), e senescência (S).

Na Figura 4.35, verifica-se que o NEE acumulado para a cultura do milho resultou maior no PD do que no PC. Na análise por fases, podemos ver que na fase VJ, o PC liberou cerca de  $24,7 \text{ g C m}^{-2}$  enquanto que o PD apenas  $4,3 \text{ g C m}^{-2}$ , ou seja, o PC emitiu 6 vezes mais  $C - CO_2$  do que o PD. Na fase VA, o PD absorveu  $154,9 \text{ g C m}^{-2}$  e o PC  $142,4 \text{ g C m}^{-2}$ , mostrando que o PD absorveu mais carbono nesta fase. Nas demais fases os dois sistemas apresentaram um comportamento semelhante.

Portanto, para o ciclo da cultura do milho, a maior diferença do NEE para os dois sistemas de plantio se dá no início da cultura, isto é, na fase VJ e na fase VA. De acordo com (PES et al., 2011), no período do preparo do solo para o plantio da cultura, o solo libera mais  $C - CO_2$  no PC do que no PD, devido aos distúrbios físicos do solo, com o rompimento dos agregados, que ocorre durante o revolvimento e a incorporação de resíduos de culturas, que aumenta o contato resíduo-solo no PC. Podendo justificar porque o PC liberou cerca de 6 vezes mais  $C - CO_2$  do que o PD na fase VJ.

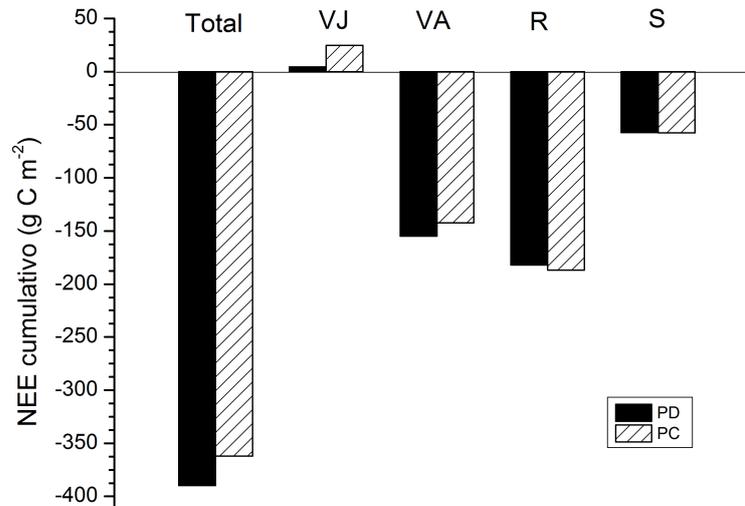


Figura 4.35: Distribuição cumulativa do NEE, para quatro fases da cultura do milho, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC): vegetativo jovem (VJ), vegetativo adulto (VA), reprodutiva (R), e senescência (S).

De acordo com as resultados, o sistema de PD absorve mais  $C - CO_2$  do que o PC, isto se deve principalmente devido a forma como cada sistema é manejado antes de realizar-se o plantio, uma vez que no PC o solo é revolvido, e a matéria orgânica que estava sobre o solo é incorporado a ele. Assim a cobertura do solo será menor e desta forma a radiação solar incide diretamente sobre o solo e conseqüentemente a temperatura do solo será maior e a sua umidade será menor, bem como haverá maior contato do resíduo com o solo, portanto haverá maior liberação de carbono orgânico devido a maior atividade microbiana (COSTA, 2005; PES et al., 2011), com maior liberação de  $C - CO_2$  para a atmosfera.

No PD, como os resíduos da cultura ficam sobre o solo, ficando com uma maior cobertura, com isso o solo terá menor temperatura uma vez que o solo está protegido pelos resíduos, assim o solo irá reter maior quantidade de umidade, tendo este sistema uma menor liberação de carbono orgânico, devido a menor atividade microbiana (COSTA, 2005; PES et al., 2011) e portanto a liberação de  $C - CO_2$  para a atmosfera será menor.

O NEE cumulativo a partir do dia 01 de outubro de 2010 a 05 de março de 2011 mostra que os sistemas de plantio direto e convencional, são sorvedouros de carbono (Figura 4.31). O ecossistema só pode ser considerado um sumidouro de carbono se o NEE total do sistema apresentar uma maior absorção líquida de carbono do que aquele presente no grão. Isto se deve pelo fato de que o grão é transportado do campo, dessa forma para uma contabilidade

mais precisa de carbono, é necessário que o carbono contido no grão seja subtraído do NEE acumulado.

O carbono removido pelo grão (equação 3.2) foi de  $-379 \text{ g m}^{-2}$  no PD e  $-359 \text{ g m}^{-2}$  no PC. Portanto, após ser contabilizado o carbono contido no grão, o PD resulta em um absorvedor de carbono de  $11 \text{ g C m}^{-2}$  e o PC de  $3 \text{ g C m}^{-2}$ , o que equivale a  $110 \text{ kg C ha}^{-1}$  no PD e  $30 \text{ kg C ha}^{-1}$  no PC. A alta produtividade do milho no sítio experimental de Cruz Alta ( $9749 \text{ kg ha}^{-1}$  no PD e  $9231 \text{ kg ha}^{-1}$  no PC), teve contribuição significativa na contabilidade do carbono removido pelo grão, pois conforme o levantamento feito pela Conab (2012), a produtividade do milho para o Rio Grande do Sul foi de  $5255 \text{ kg ha}^{-1}$  para a safra 2010/2011 (mesmo período do experimento).

## **5 CARACTERIZANDO O PAPEL RELATIVO DAS BAIXAS FREQUÊNCIAS E DOS PROCESSOS TURBULENTOS NA CAMADA LIMITE NOTURNA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES DE DOIS PONTOS DAS COMPONENTES DO VENTO**

A presença de correlações espaciais entre elementos de fluido remotas em movimento turbulento é uma das características mais importantes que definem este processo além da sua contraparte molecular. Tais correlações são responsáveis por colocar difusão turbulenta como a forma dominante de transporte de escalares e espécies vetoriais dos fluxos geofísicos. Como consequência, a determinação das escalas de comprimento típico que caracterizam tais correlações espaciais é essencial para a construção de parametrizações fisicamente realistas de coeficientes de troca de calor, umidade, momento e concentrações de contaminantes.

A análise de correlações em dois pontos entre as componentes da velocidade do vento observadas em diferentes locais tem sido usado largamente para fornecer informações sobre a estrutura tridimensional do fluxo turbulento. Tal procedimento tem sido aplicado a dados observacionais obtidos em túneis de vento usando anemometria de fio quente (SHAW et al., 1995; HUTCHINS; MARUSIC, 2007) ou velocimetria de imagem de partículas (PIV - *particle image velocimetry*) (GANAPATHISUBRAMANI et al., 2005; HUTCHINS; MARUSIC, 2007) e conjuntos de dados numéricos, originado a partir de simulações numéricas diretas (DNS - *direct numerical simulations*) (ZHOU; ADRIAN; BALACHANDAR S. KENDALL, 1999) e simulações de grandes turbilhões (LES - *large eddy simulations*) (SU; SHAW; PAW, 2000; CAELOTTO, 2002).

Recentemente Hutchins et al. (2012) realizaram uma análise detalhada das correlações de dois pontos observadas na camada limite atmosférica, mostrando que seus resultados estão em concordância quando comparados com dados atualmente conhecidos originados a partir do laboratório. Estudos observacionais anteriores de correlações de dois pontos na camada limite atmosférica enfatizaram a função de coerência espacial e como decai com a separação espacial entre os dois pontos (PANOFSKY et al., 1974; TONG; WYNGAARD, 1996; SCHLEZ; INFELD, 1998).

Os estudos citados acima, concentram-se na estrutura turbulenta do fluxo. Por esta razão, eles geralmente filtram qualquer forçante de grande escala sobre as componentes do vento.

Isso é particularmente importante quando dados da camada limite atmosférica são uti-

lizados. Com essa motivação, Hutchins et al. (2012) filtrando processos em grande escala que apareceram como a média sobre uma matriz horizontal de sensores e, além disso, considerados apenas os dados obtidos em estabilidade atmosférica quase neutra. A importância das baixas frequências, processos não turbulentos na camada limite atmosférica, tem sido cada vez mais reconhecida nos últimos anos (MAHRT, 2009). Na verdade, esses processos são conhecidos por afetar o balanço total de escalares de modo que sua consideração melhora o fechamento do balanço (ACEVEDO; MAHRT, 2010; KIDSTON et al., 2010). Particularmente, os processos de baixa frequência têm um papel importante na camada limite noturna muito estável.

No presente estudo, dados da camada limite atmosférica noturna são usados para fornecer informações sobre as correlações espaciais horizontais e verticais das três componentes do vento. A análise se concentra em temas específicos, não totalmente dirigidos por estudos observacionais anteriores de correlações de dois pontos na camada limite atmosférica. O primeiro é a dependência da correlação com a intensidade da turbulência. O segundo e mais relevante aspecto analisado no que se refere a dependência da escala de tempo das correlações de dois pontos. Isso é feito usando a decomposição de multiresolução, uma técnica que permite identificar a contribuição de eventos que acontecem em diferentes escalas temporais de um dado sinal.

Essa análise permite identificar como diferentes estruturas de fluxo contribuem para as correlações de dois pontos observadas. Isto é particularmente relevante na camada limite atmosférica noturna, pois diversos processos, tais como intermitência turbulenta (SUN et al., 2004; ACEVEDO et al., 2006), meandro (ANFOSSI; DEGRAZIA; GOULART, 2005; MAHRT, 2007; DEGRAZIA et al., 2008), ondas de gravidade (LALAS; EINAUDI, 1976; NAPPO, 2002) e outros podem coexistir, originando relevantes fluxos de baixa frequência, às vezes, também considerados como fluxos de mesoescala ou submeso (MAHRT, 2009; BELUSIC; GUTTLER, 2010).

O trabalho está estruturado da seguinte forma. Na seção 1, os dados são descritos, e as técnicas de análise são apresentados. A seção 2 é dedicada à análise das correlações de dois pontos na direção vertical, e na seção 3 são descritos aqueles obtidos na direção horizontal. Em cada caso, a análise começa com a dependência da correlação com a intensidade da turbulência e, em seguida, sua decomposição de escala de tempo é realizada e discutida. Na seção 3, autocorrelações também são analisados e comparados para as correlações horizontais de dois pontos usando a hipótese de Taylor.

## 5.1 Observações e Métodos

### 5.1.1 Dados

Duas torres micrometeorológicas foram instaladas em dois campos de plantações de milho, em Cruz Alta, região sul do Brasil ( $28^{\circ}36'S$ ;  $53^{\circ}40'W$ ), como parte de um projeto que visa à comparação dos fluxos de carbono das plantações. As torres foram separadas horizontalmente por  $45\text{ m}$  e em cada um delas observações foram tomadas a  $2,5$  e  $5\text{ m}$  de altura a partir da superfície (Figura 5.1), totalizando 4 pontos de observações, onde as três componentes do vento foram amostrados a  $10\text{ Hz}$  através de anemômetros sônicos CSAT3 (*Campbell Scientific, Inc.*).

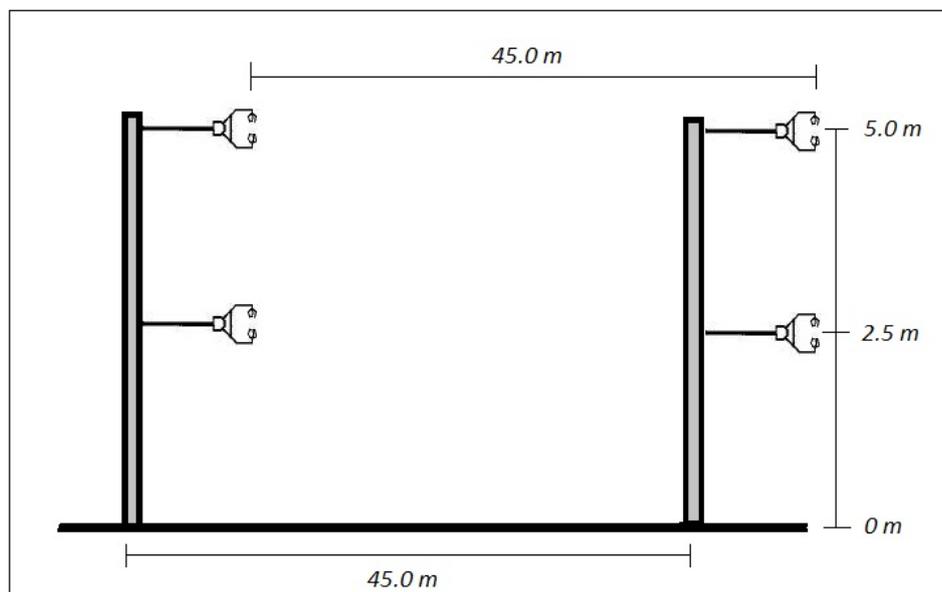


Figura 5.1: Diagrama esquemático mostrando as duas torres de observações, os locais dos sensores e as respectivas distâncias horizontal e vertical.

Um total de 94 dias de observações foram realizadas, a partir do dia 02 de dezembro de 2010 a 5 de Março de 2011. O período noturno utilizado para esta análise foi considerado iniciando as 2100 LST e terminando as 0500 LST, escolhido para evitar os períodos de transição da noite e da manhã. Uma análise da qualidade dos dados foi realizada. Noites foram descartados por diferentes motivos, tais como chuva, falta de energia, ou outros que causaram dados inconsistentes. Se alguma inconsistência ocorreu durante uma parte de uma determinada noite, aquela noite foi descartada totalmente.

Os resultados descritos neste estudo referem-se a 73 noites que passaram pelo controle de qualidade. Os quatro anemômetros sônicos utilizados foram intercomparados antes e depois do experimento e nenhum viés ou deslocamento (*offset*) foram encontrados.

### 5.1.2 Metodologia

A escala escolhida para classificar a intensidade de turbulência ao longo do estudo foi o  $\sigma_w$ , o desvio padrão das perturbações do vento vertical. A razão é que  $\sigma_w$  é uma quantidade turbulenta pura, quase não sendo afetada por processos meteorológicos de grande escala. Outras grandezas, tais como a velocidade de fricção ou a energia cinética turbulenta dependem muito mais de fenômenos de baixa frequência, e é possível que eles não refletem apenas a intensidade da turbulência (ACEVEDO et al., 2009).

Três noites específicas foram escolhidas como estudo de casos, cada uma com intensidade de turbulência diferentes (Figura 5.2). A noite começando em 24 de Janeiro de 2011, com intensidade turbulenta muito baixa ( $\sigma_w = 0,12 \text{ m s}^{-1}$ ), será considerada, ao longo do estudo, como a "noite calma", enquanto 14 de dezembro de 2010 ( $\sigma_w = 0,31 \text{ m s}^{-1}$ ) é chamada de "noite intermediária", e 29 de dezembro de 2010 ( $\sigma_w = 0,69 \text{ m s}^{-1}$ ) é a "noite turbulenta".

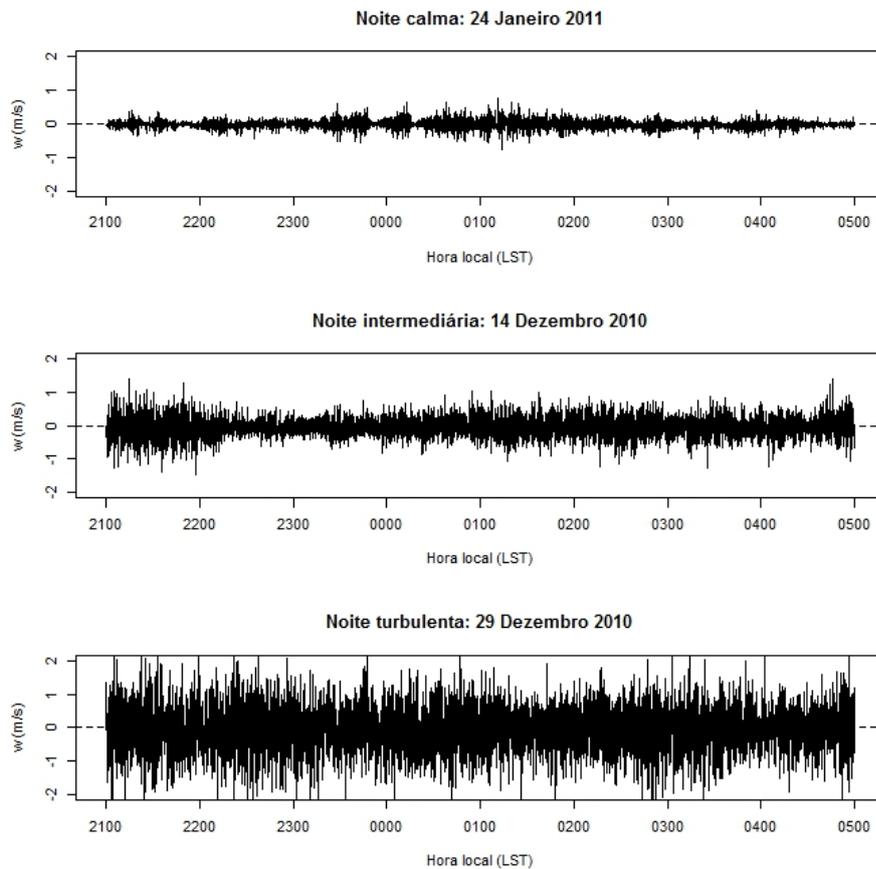


Figura 5.2: Série temporal da velocidade vertical no nível superior da torre 1 ao longo das diferentes noites escolhidas para estudos de casos, de acordo com a definição acima de cada painel.

As duas componentes horizontais do vento foram giradas em relação ao vento médio. A direção do vento média é referida em todo o estudo, como a direção longitudinal e a direção

lateral é perpendicular a este. A rotação do vento foi aplicado em duas formas diferentes. Para a análise da dependência da correlação na intensidade da turbulência (secções 5.2.1 e 5.3.1), a rotação do vento foi aplicada separadamente para cada intervalo de 5 *min*, afim de maximizar a coincidência da componente longitudinal com a direção do vento médio. Nenhuma outra forma de filtragem de dados foi aplicado, pois identificar a contribuição dos processos de baixa frequência para as correlações de dois pontos foi um dos propósitos do estudo.

No estudo de casos (secções 5.2.2 e 5.3.2), o vento foi girado apenas uma vez durante toda a noite, como a motivação principal por trás da análise é compreender como a importância das contribuições de baixa frequência varia conforme a noite se torna mais turbulenta.

Uma vez que as rotações do vento foram realizadas, séries de tempo do vento longitudinal ( $u$ ), transversal ( $v$ ) e séries da componente vertical do vento ( $w$ ) estão disponíveis para cada noite. Neste estudo, correlações verticais  $R_{ii}$  referem-se ao coeficiente de correlação entre duas séries de tempo tomado em pontos separados verticalmente (separação de 2,5 *m*, Figura 5.1), enquanto correlações horizontais  $R_{ii}$  são determinadas de série de tempo medido em pontos separados na horizontal (separação de 45 *m*, Figura 5.1)). Na maioria das análises, os coeficientes de correlação são tomados durante toda a noite, usando a série de tempo de 8 *h*. Só na última subsecção, onde funções de autocorrelação são comparados com os coeficientes de correlação horizontais usando a hipótese de Taylor, séries de tempo de 30 *min* também foram usadas.

A decomposição dos coeficientes de correlações em suas escalas de tempo típico é feita usando a decomposição de multiresolução (MALLAT, 1989). Esta técnica permite a decomposição de sinais temporais diretamente em escalas de tempo dos eventos individuais, em oposição aos métodos de decomposição mais clássicos, tais como a decomposição de Fourier, onde os sinais são decompostos em funções periódicas. Uma vantagem adicional da decomposição de multiresolução é que a soma do espectro de multiresolução ( $S_{ii}$ ) para todas as escalas de tempo é igual a variância, da mesma forma, a soma do coespectro de multiresolução ( $C_{ii}$ ) para todas as escalas de tempo é igual a covariância. Portanto, o coeficiente de correlação pode ser inteiramente reconstruído das saídas de multiresolução como  $C_{ii}/(S_{i1}^{1/2}S_{i2}^{1/2})$ , onde os índices 1 e 2 referem-se a séries de tempo obtidas em diferentes pontos de observações.

O processo de decomposição consiste em dividir a série em metades, determinando a média dentro de cada metade e removê-la. Em seguida, cada metade é novamente dividida em metades, cada média é removida e o procedimento começa de novo. Em cada escala de

tempo, dado pelo tamanho das metades consideradas, o espectro de multiresolução é dado pela variância com respeito à média correspondente do intervalo. Assim, se duas diferentes séries temporais são considerados, as covariâncias entre perturbações de diferentes séries para uma dada escala de tempo dá o coespectro de multiresolução para aquela escala de tempo. Uma descrição detalhada do método pode ser encontrada em Howell e Mahrt (1997) e em Vickers e Mahrt (2003).

Neste trabalho, a apresentação dos coespectros de multiresolução é feita de forma normalizada. Quando eles são mostrados como "coeficientes de correlação", eles são meramente normalizados pelos espectros de multiresolução para que a sua soma seja igual ao coeficiente de correlação original. Quando os coespectros de multiresolução são mostrados como um "correlação normalizada", isto significa que eles foram divididos pelo coeficiente de correlação, de modo que eles devem ser adicionados a 1.

## 5.2 Correlações Verticais

### 5.2.1 Dependência da intensidade de turbulência

A simples análise dos coeficientes de correlação de dois pontos entre as séries de tempo para a noite inteira fornece algumas informações importantes sobre a estrutura espacial das flutuações turbulentas. Para as três componentes do vento, os coeficientes de correlação para deslocamentos verticais são geralmente maiores do que aquelas obtidas através de distâncias horizontais, como era esperado, dada a maior proximidade vertical entre os pontos de observação em relação à sua separação horizontal.

As correlações de dois pontos verticais das componentes de vento lateral turbulento ( $R_{vw}$ ) é muito mais dependente em  $\sigma_w$  do que as do longitudinal ( $R_{uu}$ ) e as componentes verticais ( $R_{ww}$ ) (figura 5.3). De fato, enquanto que o  $R_{uu}$  médio para separações verticais permanece entre 0,3 e 0,4 para toda a gama de intensidades de turbulência considerados e o  $R_{ww}$  médio varia apenas entre 0,2 e 0,25,  $R_{vw}$  diminui a partir de 0,3 até o limite de baixas turbulências para abaixo de 0,1 com a condição de totalmente turbulento.

Estudos anteriores mostraram que  $R_{uu}$  decai mais lentamente com a distância vertical do que o faz  $R_{ww}$  (SHAW et al., 1995), suportando a constatação de que  $R_{ww}$  é menor do que  $R_{uu}$  para as medições tomadas na mesma separação vertical. Além disso, há alguma concordância quantitativa com os resultados de (SHAW et al., 1995), no sentido de que a distância vertical em que  $R_{uu}$  decai para 0,4 é o mesmo sobre o qual  $R_{ww}$  decai a 0,2. Este fato indica que essa distância vertical (aproximadamente 2h em seu estudo, onde h é a altura

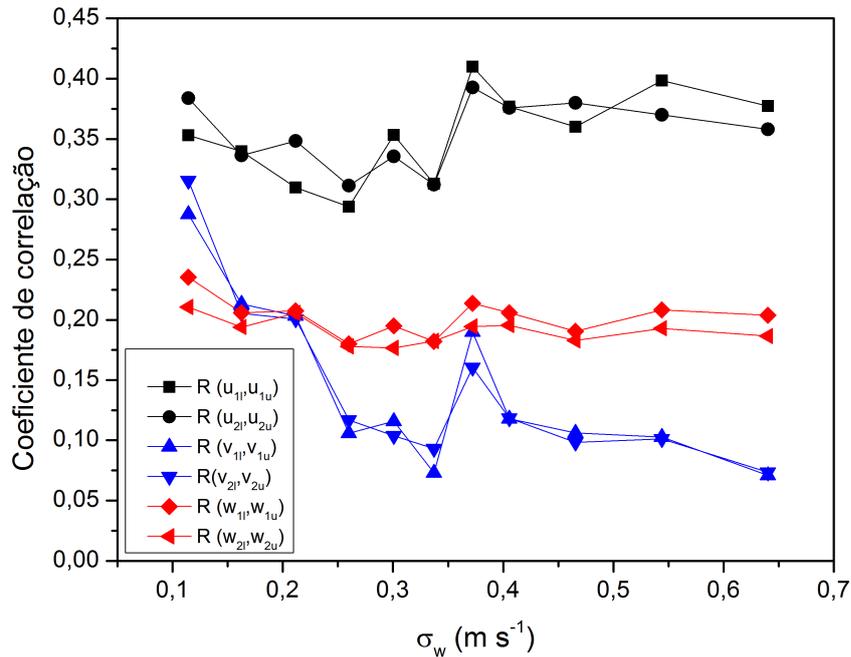


Figura 5.3: Coeficientes de correlação verticais em função da escala de intensidade de turbulência  $\sigma_w$ . Cada linha indica uma componente ou Torre diferente, como indicado pela legenda. Na legenda,  $u$  representa a componente streamwise,  $v$  é o spanwise e  $w$  é a componente vertical. Índices de 1 ou 2 indicam as duas torres e índices  $u$  ou  $l$  representam os níveis superiores ou inferiores, respectivamente.

do dossel experimento) é equivalente ao deslocamento de 2,5 m na vertical considerada aqui.

As correlações  $R_{vv}$  de dois pontos das componentes do vento lateral, por outro lado, mostram uma forte dependência da intensidade da turbulência. Hutchins et al. (2012) mostrou que  $R_{vv}$  decai muito fortemente com a separação vertical, tornando-se negativo a uma altura de  $0,15\delta$ , onde  $\delta$  é a distância de escala, assume-se como 60 m. No entanto, o fato de que  $R_{vv}$  só depende da intensidade de turbulência não pode ser explicado unicamente por supondo que  $\delta$  varia com intensidade de turbulência, uma vez que contraria o que foi encontrado para as outras duas componentes.

### 5.2.2 Decomposição de escala

Para investigar esta aparente contradição, a seguir consideremos a dependência da correlação dos ventos turbulentos na escala de tempo. As três noites com intensidades de turbulência diferentes (calmas, intermédias e turbulentas) descritas na seção 5.1 são consideradas nesta análise.

Mesmo quando a série de tempo durante toda a noite é considerado sem qualquer tipo de

filtragem, as correlações verticais das componentes verticais do vento  $R_{vv}$  é muito semelhante entre as três noites, sempre perto 0,2 (figura 5.4). Isso é uma consequência do movimento reduzido de baixa frequência na direção vertical, de modo que a correlação total para as noites inteiras reflete predominantemente os processos turbulentos. No entanto, diferenças significativas podem ser observadas entre as noites.

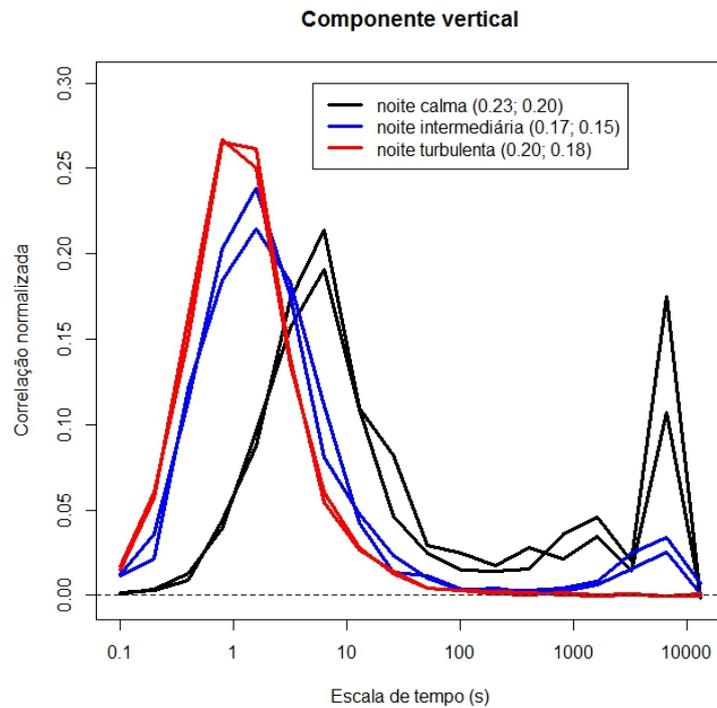


Figura 5.4: Coespectro de multiresolução de correlação das componentes do vento vertical medido em dois pontos separados verticalmente em cada uma das Torres, normalizadas pela correlação observada em cada caso, dado na legenda. Cada cor representa uma noite diferente, tal como identificado na legenda. Para cada noite, as duas linhas diferentes indicam os resultados de cada uma das torres. Os números na legenda representam as correlações de dois pontos, em cada caso.

Na noite turbulenta, nenhuma correlação de baixa frequência existe, e as correlações são causadas pelo sinal turbulento apenas (figura 5.4, linhas vermelhas). À medida que a intensidade da turbulência diminui, um pico de baixa frequência torna-se cada vez mais importante.

Na noite intermediária, a maior parte da correlação é causada por movimentos turbulentos, mas um pico menor de baixa frequência ocorre em escalas de tempo perto de 5000 s (figura 5.4, linhas azuis).

Finalmente, na noite calma (figura 5.4, linhas pretas), as correlações de baixa frequência tornam-se quase tão importante quanto as turbulentas. Uma diferença adicional que diz respeito aos picos das correlações da turbulência, que acontecem em escalas de tempo con-

sideravelmente maiores (perto de 8 s) na noite calma do que nas duas mais turbulenta (abaixo de 1 s), indicando que uma escala de tempo diminui com a intensidade da turbulência.

O papel do movimento de baixa frequência em correlações observadas e sua dependência sobre a intensidade da turbulência é melhorada quando as correlações da componente longitudinal do vento, são considerados (figura 5.5). Esta é uma consequência dos processos de grande escala, sendo mais intenso na horizontal do que na direção vertical. Como consequência, a quase totalidade durante a noite calma é causada por baixa frequência de movimento (figura 5.5, linhas pretas), enquanto que na noite intermédia, a porção de baixa frequência é ainda dominante, embora um pico turbulento, a uma escala de tempo perto de 10s, é perceptível (figura 5.5, as linhas de azul).

O movimento turbulento só domina a correlação da componente longitudinal durante a noite turbulenta (figura 5.5, linhas vermelhas), com um pico acontecendo em uma escala de tempo um pouco menor do que o correspondente pico turbulento observado na noite intermediária. No entanto, mesmo no meio da noite totalmente turbulenta, ainda há alguma contribuição de baixa frequência para  $R_{uu}$ .

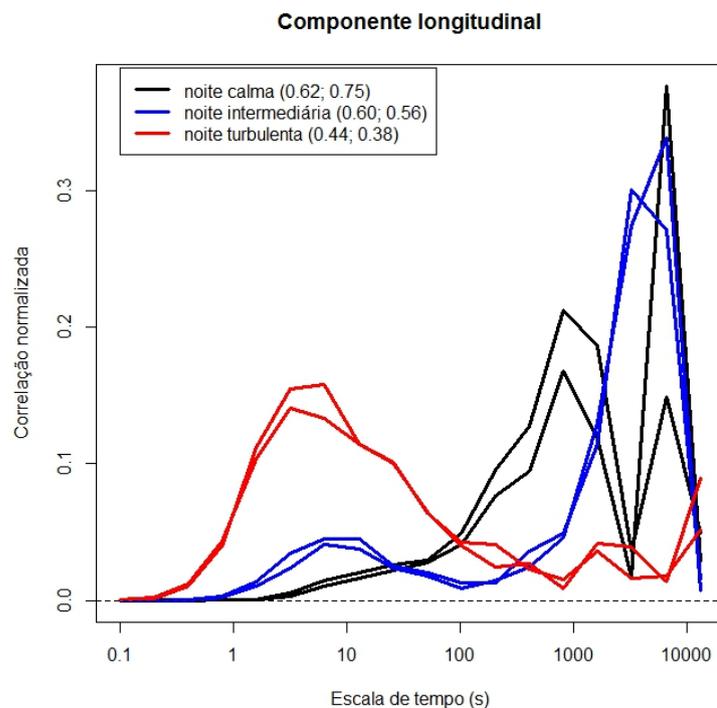


Figura 5.5: Mesmo que na figura 5.4, mas para a componente longitudinal

Para escalas de tempo grandes, o comportamento da correlação da componente lateral  $R_{vv}$  é semelhante a  $R_{uu}$ , com correlações de baixa frequência mais intensas quando há atividade menos turbulenta (figura 5.6). No entanto, a componente lateral mostra um comporta-

mento distinto em pequenas escalas turbulentas, caracterizada por uma série de correlações negativas para as escalas de tempo muito pequeno. De fato, o intervalo de turbulência  $R_{vv}$  tem tanto uma porção negativa como uma porção positiva. Sendo tal comportamento mais evidente na noite turbulenta (figura 5.6, linhas vermelhas), mas na verdade ocorre em todas as noites (figura 5.7), sendo mascarado pelas maiores correlações de baixa frequência em ambas as noites intermediárias e calmas.

O intervalo negativo é tão intenso na noite turbulenta, que a correlação  $R_{vv}$  diminui com a intensidade de turbulência, mostrado na figura 5.3, pelo menos parcialmente pode ser atribuída a ele. Não é claro o que tal intervalo de pequenas escalas de tempo com correlação negativos de  $R_{vv}$  significa, mas Hutchins et al. (2012) mostra que  $R_{vv}$  torna-se negativo em distâncias de separação vertical de  $0,15\delta$ . No presente caso, a correlação ainda é positiva, porque a parte positiva de correlação domina sobre o negativo, indicando que a distância sobre a qual é avaliada a correlação é menor que  $0,15\delta$ . O resultado, portanto, permite especular que a correlação negativa para separações maiores que  $0,15\delta$  é uma consequência do intervalo negativo tornando-se cada vez mais importante à medida que aumenta a separação, e eventualmente dominando sobre a parte positiva. Sob intensidades de turbulência mais fracas, a contribuição do intervalo negativo para  $R_{vv}$  perde importância e é deslocado para escalas de tempo um pouco maiores (figura 5.7).

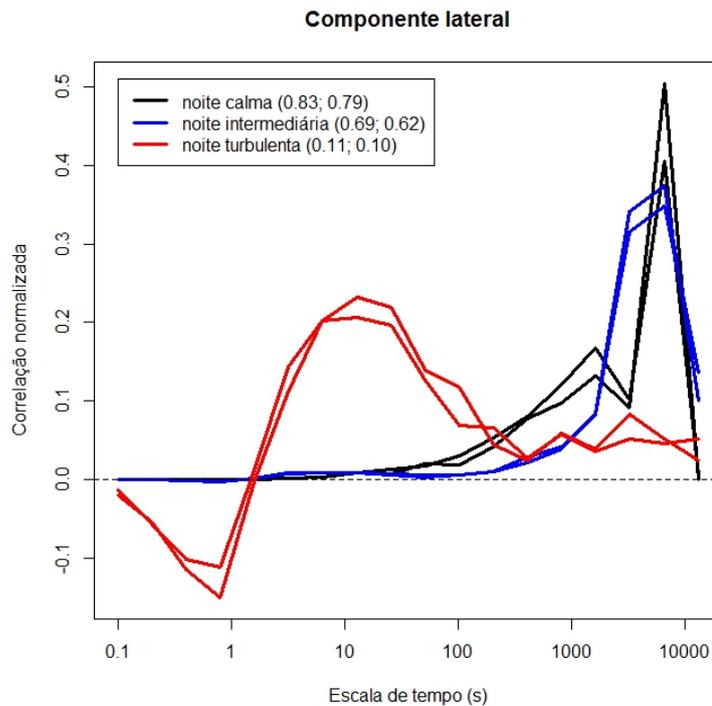


Figura 5.6: Mesmo que na figura 5.4, mas para a componente lateral

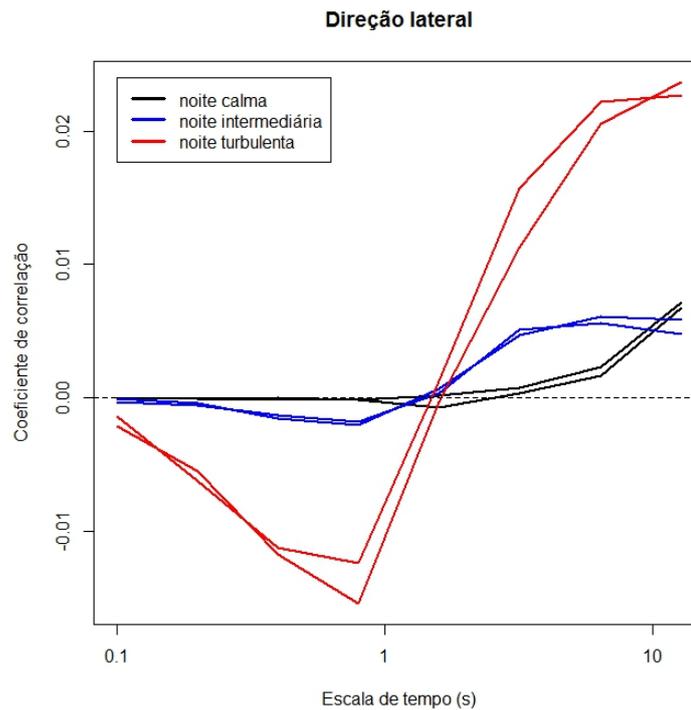


Figura 5.7: Mesmo que na figura 5.6, mas para apenas uma pequena escala de tempo. Aqui os coespectros não são normalizados pela correlação total

### 5.3 Correlações Horizontais

#### 5.3.1 Dependência da intensidade de turbulência

Quando separações horizontais são consideradas, as correlações das três componentes do vento tem uma dependência relevante sobre a intensidade da turbulência (figura 5.8), sempre diminuindo à medida que fica mais turbulento. Além disso, em todos os casos, as correlações obtidas em 5 m são maiores do que aquelas obtidas no nível da observação inferior de 2,5 m. Em geral, as correlações a 5 m são duas vezes maiores do que as obtidas com 2,5 m. Das três correlações,  $R_{vv}$  é a maior e  $R_{ww}$  é o menor, mas todos eles mostram algum grau de correlação mesmo nas condições mais turbulentas. O único caso para os quais as observações nos dois locais podem ser considerados como não correlacionados é quando as velocidades verticais são considerados para o nível mais baixo. Nesse caso,  $R_{ww}$  é muito próximo de zero para  $\sigma_w$  de 0,25 ou maior.

As correlações relatadas na Figura 5.8 são significativamente maiores do que as encontradas por outros estudos sobre correspondentes grandes distâncias horizontais. Ambos Shaw et al. (1995) e Hutchins et al. (2012) mostraram que as correlações de dois pontos das três componentes do vento já decaiu abaixo 0,1 para as distâncias horizontais equivalentes aos

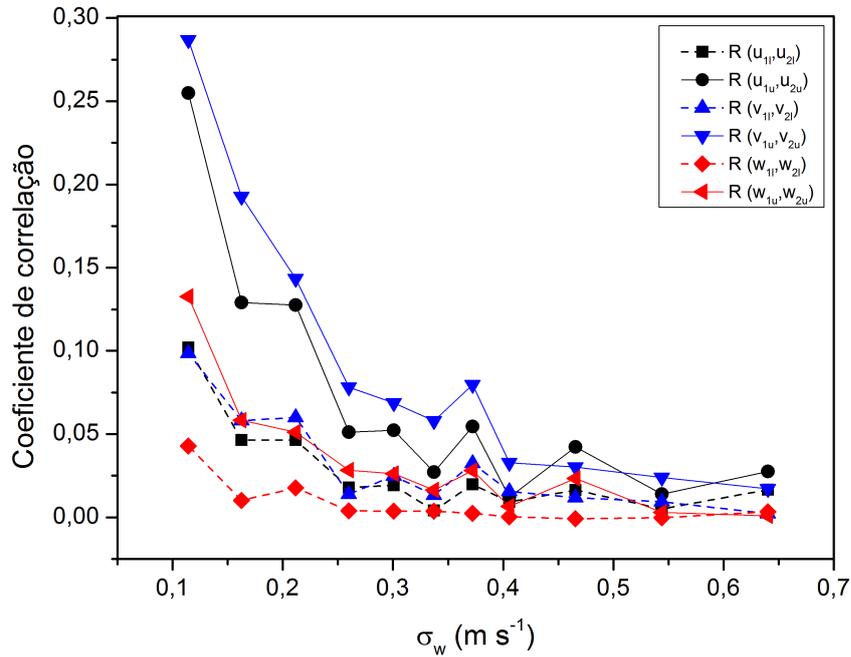


Figura 5.8: O mesmo que na figura 5.3, mas para as correlações horizontais.

45 m considerado no presente estudo. Embora a escala de distância  $\delta$  seja incerta no presente estudo, essa comparação é possível quando ela é realizada em termos do decaimento da correlação observada na direção vertical.

Conforme relatado na Figura 5.3,  $R_{uu} \approx 0,4$  e  $R_{ww} \approx 0,2$  para uma separação vertical de 2,5 m. A separação horizontal é 18 vezes maior do que a uma vertical, de modo que a correlação horizontal deve ser comparada com as encontradas em outros estudos para uma distância horizontal de 18 vezes a distância vertical onde os respectivos estudos encontraram  $R_{uu} \approx 0,4$  e  $R_{ww} \approx 0,2$ . Shaw et al. (1995) e Hutchins et al. (2012) relatam correlações de dois pontos muito pequeno de qualquer componente de vento ao longo de uma distância horizontal, levando à conclusão de que apenas os valores para noites totalmente turbulentas, correspondente aos mostrados no limite máximo de na Figura 5.8 são comparáveis aos encontrados por esses autores. É importante, portanto, abordar o que provoca o aumento das correlações horizontais das três componentes do vento em baixas condições de turbulência e uma óbvia especulação é que eles são causados pelo movimento de baixa frequência. Para investigar este assunto, na próxima seção a decomposição de escala das correlações horizontais é apresentada.

### 5.3.2 Decomposição de escala

A decomposição de multiresolução das correlações de dois pontos sobre as distâncias horizontais é mostrado na Figura 5.9, para as três noites escolhidos como estudos de casos. Os coeficientes de correlação (dentro da legenda) mostram claramente que as correlações diminuíam significativamente à medida que fica mais turbulento. Em particular, os coeficientes de correlação bastante grandes das componentes longitudinal e lateral ocorreram para as noites calmas e intermediárias. Estas eram maiores do que aqueles relatados na Figura 5.7, os valores médios para pequenos  $\sigma_w$ , e essa diferença está associada à falta de filtragem nos estudos de caso, causando correspondentemente maiores correlações de baixa frequência.

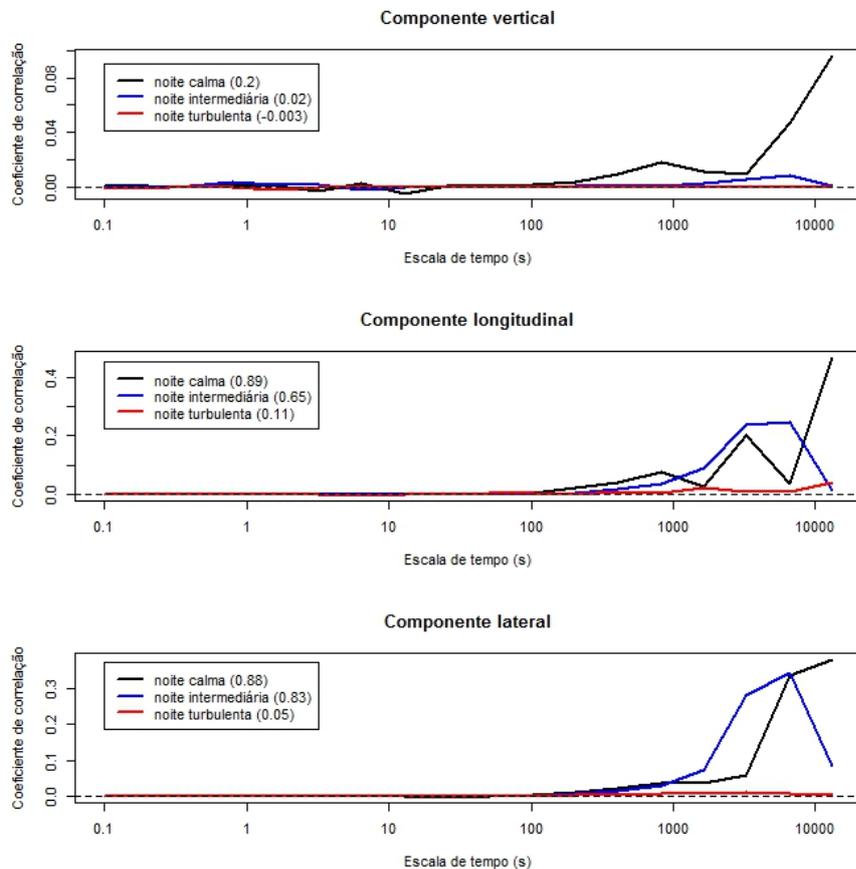


Figura 5.9: Coespectro de multiresolução de correlação para as componentes vertical (painel superior), longitudinal (painel central) e lateral (painel inferior) do vento, medido em dois pontos separados horizontalmente no nível superior de cada uma das torres. Cada linha de cor representa uma noite diferente, como determinado pelas legendas. Os números nas legendas representam as correlações de dois pontos em cada caso.

Este resultado é corroborado pelo facto de que as correlações horizontais das três componentes do vento são dominadas por troca de baixa frequência. Para a componente vertical (geralmente não afetado por contribuições de baixa frequência), a correlação total é significa-

tivamente menor do que para os duas componentes horizontais, e as correlações significativas só ocorram durante a noite calma.

Portanto, processos de baixa frequência aumentam as correlações horizontais em grande parte. Estes tipos de processos são tradicionalmente filtrados em estudos que visam descrever o fluxo turbulento sozinho, mas eles podem ser importantes para outros processos geofísicos, tais como a produção de fluxos relevantes de momentum, energia ou escalares (MAHRT, 2009; ACEVEDO; MAHRT, 2010). Hutchins et al. (2012) referem-se a tais movimentos de baixa frequência como "fenômenos relacionados com o clima". Os presentes resultados confirmam que elas afetam principalmente as correlações de dois pontos, mas também que eles só existem para as intensidades de turbulência baixa ou intermediária. Em condições totalmente turbulentas, mesmo as correlações de dois pontos não filtradas, aproximam aqueles relatados por estudos anteriores em condições controladas.

### 5.3.3 Autocorrelação e Hipótese de Taylor

Os baixos valores das correlações horizontais discutidos na seção 5.3.1 e relatado por estudos anteriores sobre equivalentes grandes distâncias (SHAW et al., 1995; HUTCHINS et al., 2012) indicam que, a tal distância, o campo de vento não tem memória das propriedades do fluxo turbulento de escala. Na verdade, apenas os de maior escala, processos de baixa frequência mostram qualquer correlação sobre tais grandes distâncias horizontais, como mostrado na seção 5.3.2. As propriedades estatísticas do campo turbulento, por outro lado, podem ser conservadas durante maiores escalas horizontais, apesar da falta de correlação entre a série de tempo. Tal hipótese é testada no presente seção.

Para isso, as correlações horizontais medidas entre cada componente de vento são comparados com autocorrelações obtidos em uma das torres, considerando um intervalo de tempo  $\tau$  de,  $\tau = \Delta x / \bar{v}$  em que  $\Delta x$  é a distância horizontal entre as torres e  $\bar{v}$  é o componente de vento média na direção da linha que liga ambas as torres. Esta idéia baseia-se na hipótese de Taylor, que diz "... a interpretação de uma série temporal em um ponto espacial como um registro espacial na direção de onde o vento está soprando" (WYNGAARD, 2010).

Para o componente vertical do vento, a comparação pode ser realizada para a série de tempo noturna, como há pouco movimento de baixa frequência, nesta direção. A concordância é bastante satisfatória (Figura 5.10), sendo melhor no nível vertical superior do que no inferior, onde os pontos estão mais espalhados. Além disso, a pior concordância ocorre para os menores coeficientes de correlação.

Para as componentes do vento horizontal, uma análise semelhante usando uma série de

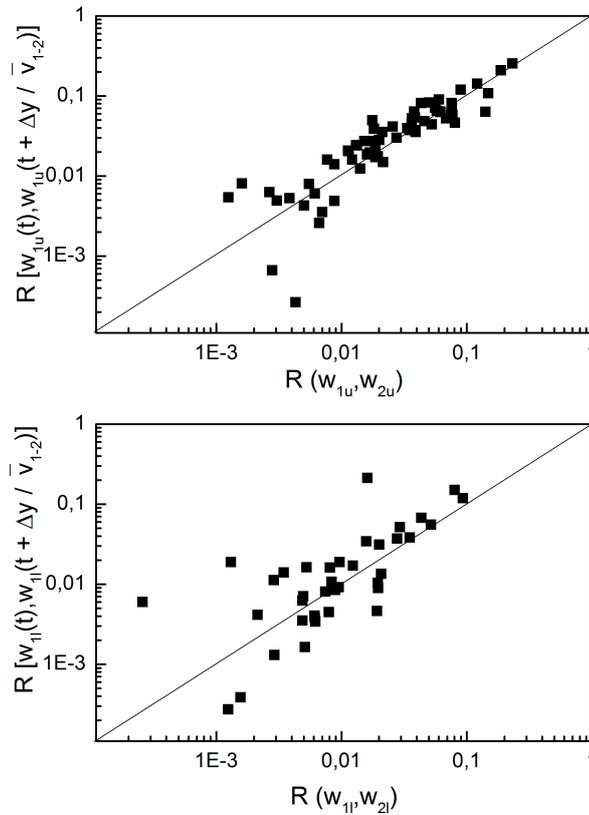


Figura 5.10: Comparação entre as correlações de dois pontos horizontais da componente vertical do vento (eixo horizontal) e a autocorrelação obtidos na torre 1, para um intervalo de tempo, dada pelo quociente entre a distância horizontal e a componente do vento médio na direção que liga as duas torres (eixo vertical). O painel superior mostra os resultados para o nível superior e parte inferior do painel é de nível inferior.

tempo de 8 h conduz a um acordo muito pobre, induzida pelo fato de que as autocorrelações são mais influenciadas por perturbações de baixa frequência do que as correlações de dois pontos. Para evitar essa influência, realizou-se a comparação das componentes do vento horizontal de série de tempo de 30 min. Fazendo isto, uma melhor concordância ocorre entre as correlações de dois pontos e as autocorrelações desfasados (Figura 5.11). Os pontos estão mais espalhados no nível inferior do que na superior, como foi observado para a direção vertical. Além disso, não houve diferença significativa entre os resultados para a direção longitudinal (figura 5.11, os painéis esquerdos) e aqueles para a direção lateral (figura 5.11, os painéis da direita).

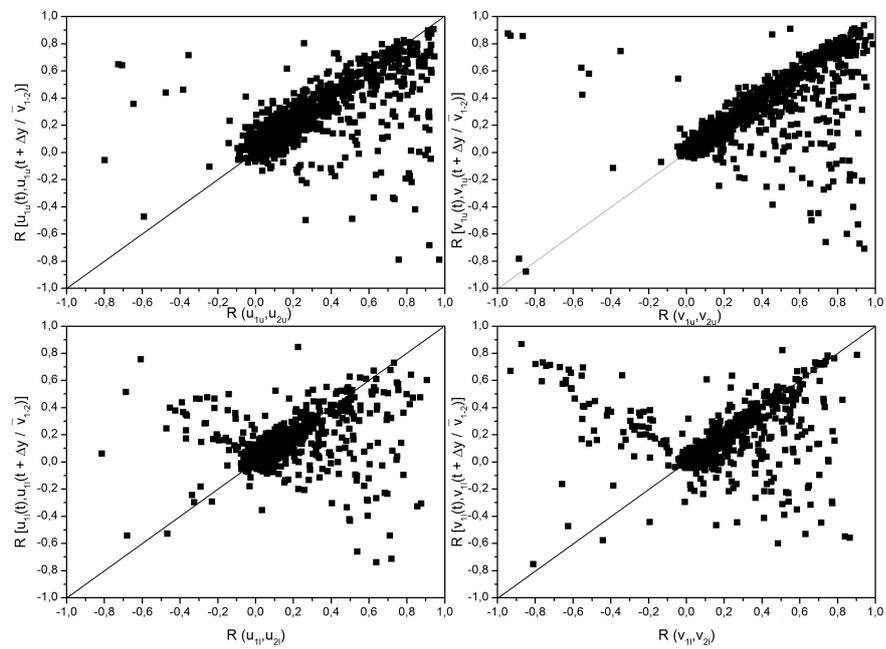


Figura 5.11: O mesmo que na figura 5.10, mas para as componentes longitudinal (painéis da esquerda) e componente lateral (painéis da direita).

## 6 CONCLUSÕES

Nesta tese, foram apresentados dois estudos específicos de grande importância para o meio científico.

No primeiro, fez-se um estudo comparativo entre os dados observados de duas estações micrometeorológicas instaladas em dois sistemas de plantio de milho, sendo uma no sistema de plantio direto (PD) e outra no sistema de plantio convencional (PC). O sítio experimental localiza-se no município de Cruz Alta no Sul do Brasil.

No segundo, realizou-se um estudo da caracterização do papel relativo das baixas frequências e dos processos turbulentos na camada limite noturna através da análise de correlações em dois pontos das componentes do vento.

Foram analisados a produção primária bruta (GPP), a respiração do ecossistema ( $R_e$ ) e a troca líquida do ecossistema (NEE) para o período da cultura do milho, que teve duração de 156 dias. Também realizou-se uma análise para quatro fases de desenvolvimento da cultura: a vegetativa jovem (VJ), a vegetativa adulta (VA), a reprodutiva (R) e a senescência (S).

A partir dos resultados encontrados conclui-se que:

- A produção primária bruta acumulada para todo o ciclo do milho é maior no PD do que no PC. A GPP é maior no PD em todas as fases.
- A respiração do ecossistema acumulada para todo o ciclo do milho é maior no PD. Nas fases VJ e VA a  $R_e$  é maior no PC e nas fases R e S a  $R_e$  é maior no PD.
- O NEE acumulado para todo o ciclo do milho é maior no PD, ou seja, o PD absorveu mais  $C - CO_2$  do que PC.
- A fase VJ liberou  $C - CO_2$  em ambos os sistemas de plantio, com uma maior liberação no PC e nas fases VA, R e S houve absorção de  $C - CO_2$ , sendo maior no PD na fase VA e um pouco maior no PC nas fases R e S.
- Embora o PD emita mais carbono na forma de respiração do que o PC, ele absorve mais  $C - CO_2$  pela fotossíntese que o PC, o equivalente a  $280 \text{ kg ha}^{-1}$  a mais.
- A maior diferença entre os dois sistemas de plantio ocorre na primeira metade do ciclo da cultura, isto é, nas fases VJ e VA. A primeira fase, a vegetativa jovem, funciona como fonte de carbono e a vegetativa adulta, como sorvedouro de carbono.

- Quando contabilizado a retirada do carbono contido no grão, o PD e o PC atuaram com dreno de  $C - CO_2$ , porém o PC absorveu uma quantidade menor.

- Enquanto o índice de área foliar, no início da cultura do milho, é menor do que  $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , a cultura comporta-se como fonte de  $C - CO_2$ , quando a partir de então passa a ser sorvedouro de  $C - CO_2$ . Passando novamente a fonte de  $C - CO_2$  no final da cultura, quando as folhas da planta já estão secas, por volta das últimas duas semanas da cultura antes da colheita, quando o IAF volta a ficar menor do que  $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ .

A partir da contabilidade da quantidade de carbono removido pelo grão, que esta diretamente associado com a produtividade da cultura, o teor de umidade do grão quando este é colhido e também da fração de carbono contida no grão, a cultura do milho pode variar a quantidade de carbono que é absorvida ou liberada no final do ciclo de avaliação.

Quando são realizados estudos sobre culturas agrícolas, é importante fazer uma análise por fases, pois as características do sistema vão se alterando conforme a cultura evolui, sendo que neste trabalho diferenças significativas foram encontradas em cada fase analisada, principalmente no regime dos ventos que implica a cobertura dos sensores, na evolução do fluxo de  $CO_2$ , no IAF, na biomassa, no GPP máximo diário,  $R_e$  máxima diário e NEE máximo diário e também no GPP,  $R_e$  e NEE acumulados.

As diferenças nos resultados quando comparados a outros sítios se deve: variedade do milho, tipo de solo, clima e principalmente o *footprint* do sítio experimental.

Ainda que o sítio experimental não seja o ideal, encontrou-se uma diferença entre os dois sistemas, uma vez que as duas estações estavam recebendo informações da mesma cultura ao redor da estação quando as medidas vinham de fora da área de estudos.

A análise desenvolvida no segundo estudo, com base em medições realizadas em apenas 4 locais é bastante simplista, especialmente quando comparado com outros que usam conjuntos de sensores muito maiores ou modernas técnicas observacionais. Tal limitação constitui uma restrição para uma análise detalhada do campo turbulento. Este não é, contudo, o foco principal do presente trabalho. Aqui, a matriz de sensores simplificado tem sido utilizada para quantificar o papel de processos de grande escala, identificada para graus de liberdade de baixa frequência. Isto conseguiu-se através da análise da dependência de correlações de dois pontos sobre a intensidade de turbulência e de sua decomposição de escala. Conclusões importantes do estudo foram:

- ★ Processos de baixa frequência dominam as correlações de dois pontos em condições de vento fraco. Quando a turbulência está totalmente desenvolvida, os movimentos de baixa

freqüência são quase inteiramente suprimidos;

★ Correlações verticais de dois pontos da componente lateral do vento são negativas no limite de escala de tempo muito baixa. Isto sugere que as correlações negativas da componente lateral observado por Hutchins et al. (2012) para uma dada distância de separação estão presentes em distâncias menores, mas apenas para os pequenos turbilhões;

★ As propriedades estatísticas do campo turbulento são preservadas horizontalmente ao longo de distâncias para os quais as correlações de dois pontos já foram largamente reduzidos.

Estudos analíticos anteriores (OETTL et al., 2005; GOULART et al., 2007; BELUSIC; GUTTLER, 2010) mostraram que modos de baixa frequência dominam o movimento da camada limite atmosférica, quando a difusão de turbulência é reduzida. Assim, a turbulência intensa atenua a baixa frequência, os movimentos submeso. Os presentes resultados impõem a caracterização do processo como um estado de coexistência, onde a turbulência e os movimentos de baixa frequência são complementares uns aos outros, que os dois fenômenos possivelmente podem coexistir em um padrão misto, mas, normalmente, como presentemente mostrado, um tende a dominar o outro.

Como perspectivas futuras, seria indicado fazer um estudo para um período de pelo menos um ano sobre a cultura do milho e em uma área maior, para contabilizar o intervalo do pousio; medidas do fluxo de  $CO_2$  do solo, para entender melhor a diferença dos dois sistemas de plantio, principalmente no início da cultura; determinar os valores do teor de umidade do grão bem como a fração de carbono do milho, para o sítio em estudo, para um melhor resultados no cálculo do carbono retirado pelo grão; contabilizar a quantidade de carbono utilizado nas máquinas agrícolas, pelo uso de combustíveis fósseis durante a realização do plantio, no revolvimento da terra e na colheita da safra nos dois sistemas de plantio, a fim de obter um melhor resultado do NEE anual do cultivo do milho, para assim fazer uma estimativa a nível regional e até nacional da quantidade de carbono anual que um cultivar de milho absorve ou libera.

## BIBLIOGRAFIA

- ACEVEDO, O. C.; MAHRT, L. Systematic vertical variation of mesoscale fluxes in the nocturnal boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 135, p. 19–30, 2010.
- ACEVEDO, O. C. et al. Intermittency and the exchange of scalars in the nocturnal surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 119, p. 41–55, 2006.
- ACEVEDO, O. C. et al. Is friction velocity the most appropriate scale for correcting nocturnal carbon dioxide fluxes? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1–10, 2009.
- ALBERTI, G. et al. Changes in  $CO_2$  emissions after crop conversion from continuous maize to alfafa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 136, p. 139–147, 2010.
- ANFOSSI, D.; DEGRAZIA, G.; GOULART, A. An analysis of sonic anemometer observations in low wind speed conditions. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 114, p. 179–203, 2005.
- AUBINET, M. et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. **Advances in Ecological Research**, v. 30, p. 113–175, 2000.
- BACKER, J. M.; GRIFFIS, T. J. Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 128, p. 163–177, 2005.
- BALDOCCHI, D. D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed  $C_3$  (wheat) and an open  $C_4$  (corn) crop. II.  $CO_2$  exchange and water use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 67, p. 291–321, 1994.
- BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, p. 479–492, 2003.
- BALDOCCHI, D. D. et al. Fluxnet, a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 83, p. 2415–2434, 2001.
- BALDOCCHI, D. D.; HICKS, B. B.; MEYERS, T. P. A spectral and lag correlation analysis of turbulence in a deciduous forest canopy. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 45, p. 31–58, 1988.
- BALDOCCHI, D. D.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Characteristics of air flow above and within soybean canopies. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 25, p. 43–54, 1983.
- BELUSIC, D.; GUTTLER, I. Can mesoscale models reproduce meandering motions? **Quart. J. Meteorol. Soc.**, v. 103, p. 553–565, 2010.
- BONAN, G. B. Atmosphere-biosphere exchange of carbon-dioxide in boreal incoming, solar radiation and daily maximum and minimum temperatures. **Journal of Geophysics Research**, v. 14, p. 7301–7312, 1991.

BROCK, F. V.; RICHARDSON, S. J. *Meteorological measurement system*. Oxford: University Press, 2001.

BUSINGER, J. Evaluation of the accuracy with which dry deposition can be measured with current micrometeorological techniques. **Journal of Applied Meteorology**, v. 25, p. 1100–1124, 1986.

BÉZIAT, P.; CESCHIA, E.; DEDIEU, G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in south west france. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1628–1645, 2009.

CAELOTTO, P. Two-point properties of atmospheric turbulence very close to the ground: comparison of a high resolution les with theoretical models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 104, p. 381–410, 2002.

CONAB. *Companhia Nacional de Abastecimento*. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 17 jul. 2012.

COSTA, F. de S. **Estoques de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtropical brasileiro**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 128p, 2005.

DEGRAZIA, G. A. et al. Turbulence dissipation rate derivation for meandering occurrences in a stable planetary boundary layer. **Atmosph Chem Phys**, v. 8, p. 1713–1821, 2008.

EMBRAPA. *EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2005. 374 p.

FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, p. 43–69, 2001.

FARKAS, C. et al. Methodologies. In: \_\_\_\_\_. London New York: Springer Science+Business Media B.V., 2011. (**Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective**), p. 65–89.

FOKEN, T. *Micrometeorology*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008. 308 p.

FOKEN, T.; ONCLEY, S. P. Results of the workshop ‘instrumental and methodical problems of land surface flux measurements’. **Bull Amer Meteorol Soc**, v. 76, p. 1191–1193, 1995.

GANAPATHISUBRAMANI, B. et al. Investigation of large-scale coherence in a turbulent boundary layer using two-point correlations. **J Fluid Mech**, v. 524, p. 57–80, 2005.

GOERGEN, R. et al. Separação do fluxo de  $CO_2$  em respiração e assimilação para uma cultura de soja no sul do brasil. **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2010. Belém, Amazônia e o Clima.

GOULART, A. G. O. et al. Theoretical considerations of meandering winds in simplified conditions. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 125, p. 279–287, 2007.

- HOLLINGER, S. E.; BERNACCHI, C. J.; MEYERS, T. P. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, p. 59–69, 2005.
- HOLLINGER, S. E.; BERNACCHI, C. J.; MEYERS, T. P. Corrigendum to "carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States [Agric. For. Meteorol. 130 (2005) 59-69]". **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 136, p. 88–89, 2006.
- HOWELL, J. F.; MAHRT, L. Multiresolution flux decomposition. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 83, p. 117–137, 1997.
- HUTCHINS, N. et al. Towards reconciling the large-scale structure of turbulent boundary layers in the atmosphere and laboratory. **Boundary-Layer Meteorology**, 2012. In press, Doi: 10.1007/s10546-0129735-4.
- HUTCHINS, N.; MARUSIC, I. Evidence of very long meandering features in the logarithmic region of turbulent boundary layers. **J Fluid Mech**, v. 579, p. 1–28, 2007.
- INMET. *INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA*. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 27 abr. 2012.
- IPCC, Summary for Policymakers. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 25 jul. 2011.
- ISO. *Statistics-vocabulary and symbols-Part1: probability and general statistical terms. International Organization for Standardization*. Geneva, Switzerland: ISO 3435-1, 1993. 61 p.
- JANS, W. W. P. et al. Carbon exchange of a maize (*Zea mays* L.) crop: Influence of phenology. **Agricultural, Ecosystems and Environment**, v. 139, p. 316–324, 2010.
- KAIMAL, J.; FINNIGAN, J. *Atmospheric Boundary Layer Flows-Their Structure and Measurement*. New York: Oxford University Press, 1994. 289 p.
- KIDSTON, J. et al. Energy balance closure using eddy covariance above two different land surfaces and implications for  $CO_2$  flux measurements. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 136, p. 193–218, 2010.
- LALAS, D. P.; EINAUDI, P. On the characteristics of gravity waves generate by atmospheric shear layers. **J Atmosf Sci**, v. 33, p. 1248–1259, 1976.
- LASSLOP, G. et al. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. **Global Change Biology**, v. 16, p. 187–208, 2010.
- LEE, X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 91, p. 39–49, 1998.
- LEE, X.; MASSMAN, W.; LAW, B. *Handbook of Micrometeorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 250 p.
- LLOYD, J.; TAYLOR, J. A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional Ecology**, v. 8, p. 315–323, 1994.

- MAHRT, L. Weak-wind mesoscale meandering in the nocturnal boundary layer. **Environment Fluid Mech**, v. 7, p. 331–347, 2007.
- MAHRT, L. Characteristics of submeso winds in the stable boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 130, n. 1, p. 1–14, 2009.
- MALLAT, S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. **IEEE. Trans. Pattern. Anal. Machine Intell**, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989.
- MASSMAN, W. J.; LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 121–144, 2002.
- MAUDER, M. et al. The energy balance experiment ebex-2000. Part II: Intercomparison of eddy covariance sensors and post-field data processing methods. **Boundary-Layer Meteorol**, v. 123, p. 29–54, 2007.
- MCCREE, K. J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. **Agricultural Meteorology**, v. 10, p. 443–453, 1972. Amsterdam.
- MOFFAT, A. M. et al. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, p. 209–232, 2007.
- MONCRIEFF, J. et al. Trace gas exchange over terrestrial ecosystems: Methods and perspectives in micrometeorology. **Experimental Botany**, p. 1113–1142, 1997.
- MONTHIEITH, J. L. **Vegetation and Atmosphere: Principles** . Volume 1. London: Academic Press, 1975. 298 p.
- MORAES, O. L. L. **Meteorologia e poluição atmosférica: teoria, experimentos e simulação** . Santa Maria: Facus-UFSM, 2010. 240 p.
- NAPPO, C. **An introduction to atmospheric gravity waves** . San Diego California: Academic Press, 2002. 279 p.
- OETTL, D. et al. A new hypothesis on meandering atmospheric flows in low wind speed conditions. **Atmos. Environ**, v. 39, p. 1739–1748, 2005.
- OLIVEROS, L. F. C. **Emissões de CO<sub>2</sub> do solo sob preparo convencional e plantio direto em latossolo vermelho do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 20-31, 2008.
- PANOFISKY, H. A. et al. Two-point velocity statistics over lake Ontario. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 7, p. 309–321, 1974.
- PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidade vegetal**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 33 p. (Boletim Técnico, 114).
- PES, L. Z. et al. The primary sources of carbon loss during the crop-establishment period in a subtropical Oxisol under contrasting tillage system. **Soil & Tillage Research**, v. 117, p. 163–171, 2011.
- POETHING, R. S. Phase change and the regulation of development timing in plants. **Science**, v. 301, p. 334–336, 2003.

- RADIN, B. **Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo tomateiro cultivado em diferentes ambientes**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 4-28, 2002.
- REICHSTEIN, M. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1424–1439, 2005.
- SAKAI, R. K. **Observational study of turbulent exchange between the surface and canopy layer over several forest types**. Tese (Doutorado) — University at Albany, State University of New York, New York, USA, 128p, 2000.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. *Fisiologia vegetal*. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1994. 758 p.
- SCHLEZ, W.; INFELD, D. Horizontal two-point coherence for separation greater than the measurement height. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 87, p. 459–480, 1998.
- SCHUEPP, P. H. et al. Footprint predictions of scalar fluxes from analytical solution of the diffusion equation. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 50, p. 355–373, 1990.
- SHAW, R. H. et al. A wind tunnel study of air flow in waving wheat: Two-point velocity statistics. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 76, p. 349–376, 1995.
- STULL, R. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988. 637 p.
- SU, H. B.; SHAW, R. H.; PAW, U. K. T. Two point correlation analysis of neutrally stratified flow within and above a forest from large eddy simulation. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, p. 423–460, 2000.
- SUN, J. et al. Atmospheric disturbances that generate intermittent turbulence in nocturnal boundary layers. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 110, p. 255–279, 2004.
- SUYKER, A. E. et al. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated rainfed maize. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 1–13, 2004.
- SUYKER, A. E. et al. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 180–190, 2005.
- TONG, C.; WYNGAARD, J. C. Two-point coherence in the atmospheric surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 81, p. 105–121, 1996.
- TURNER, D. P. et al. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. **Global Change Biology**, v. 9, p. 383–395, 2003.
- VAREJAO-SILVA, M. *Meteorologia e Climatologia*. Recife, Brasil: Versão Digital, 2005. 516 p.
- VERMA, S. B. et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 77–96, 2005.

VICKERS, D.; MAHRT, L. The cospectral gap and turbulent flux calculations. **Journal of atmospheric and oceanic technology**, v. 20, p. 660–672, 2003.

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

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

WYNGAARD. *Turbulence in the atmosphere*. Cambridge New York: Cambridge University Press, 2010. 409 p.

ZHOU, J.; ADRIAN, R. J.; BALACHANDAR S. KENDALL, T. M. Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow. **J Fluid Mech**, v. 387, p. 353–396, 1999.

ZIMERMANN, H. R. **Diferentes técnicas de condicionamento em séries temporais turbulentas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 20-31, 2005.

## ***APÊNDICE A – Intercomparação de Sensores***

Quando são comparados dados de diferentes sensores (anemômetro sônico, analisador de gás, etc.), que medem a mesma variável (concentrações de  $CO_2$  e  $H_2O$ , componentes da velocidade do vento, temperatura, etc.), há a necessidade de fazer-se uma intercomparação entre os sensores, para garantir que a comparação de dados seja verdadeira. Assim, antes e após o período de um experimento científico, que envolve a utilização de dados de sensores em diferentes torres ou diferentes níveis, é necessário um período de 10 a 15 dias, onde se instalam os sensores lado a lado para verificar a veracidade dos dados para uma boa análise científica.

A intercomparação dos sensores é necessária devido a diversos fatores, a citar: desgaste do sensor e características típicas de cada sensor. A análise dos dados da intercomparação consistiu em calcular as variâncias, com médias de 5 *min*, de todas as variáveis (amostradas pelos sensores em questão), bem como dos fluxos, com médias de 30 *min*. A partir da análise das correlações das variâncias, escolhe-se um sensor de referência (padrão), normalmente aquele mais novo ou o último que foi calibrado (BROCK; RICHARDSON, 2001).

Uma forma de análise, é correlacionar às quantidades em questão com as do sensor padrão, realiza-se o ajuste linear e obtém-se os coeficientes da equação da reta. O resultado da análise de regressão é dado como o valor absoluto da equação de regressão (intercepto), o coeficiente de regressão (inclinação da reta), e o coeficiente de determinação. Para fazer uma análise estatística, pode-se calcular o desvio quadrático médio (comparabilidade) e o viés médio (ISO, 1993).

Essas comparações, segundo (MAUDER et al., 2007) podem ser feitas para varias quantidades medidas pelos sensores de covariância turbulenta, tais como: médias de velocidade do vento, as variações do vento vertical, temperatura do sônico, umidade, bem como as covariâncias, particularmente da velocidade de fricção do vento e dos fluxos turbulentos de calor sensível e latente.

A seguir, estão representados os gráficos com as correlações das variâncias das diferentes quantidades intercomparadas. Na intercomparação verifica-se que os sensores estão com uma boa calibração, uma vez que dois anemômetros sônicos e dois analisadores de gás eram novos, e que os dados analisados tiveram uma boa correlação conforme os gráficos.

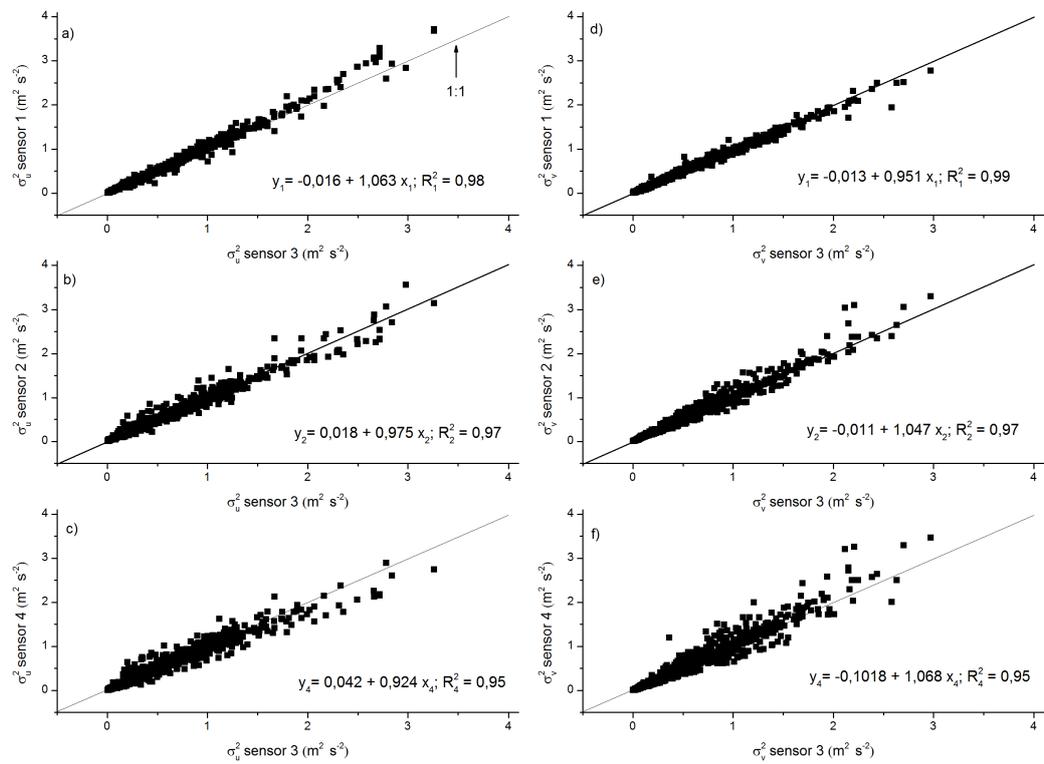


Figura A.1: Intercomparação das variâncias das componentes horizontais do vento. Em a), b) e c) temos as correlações da componente  $u$  para os sensores 1, 2, 4 respectivamente e em d), e) e f) temos as correlações da componente  $v$  para os sensores 1, 2 e 4 respectivamente. Onde o sensor 3 foi tomado como padrão.

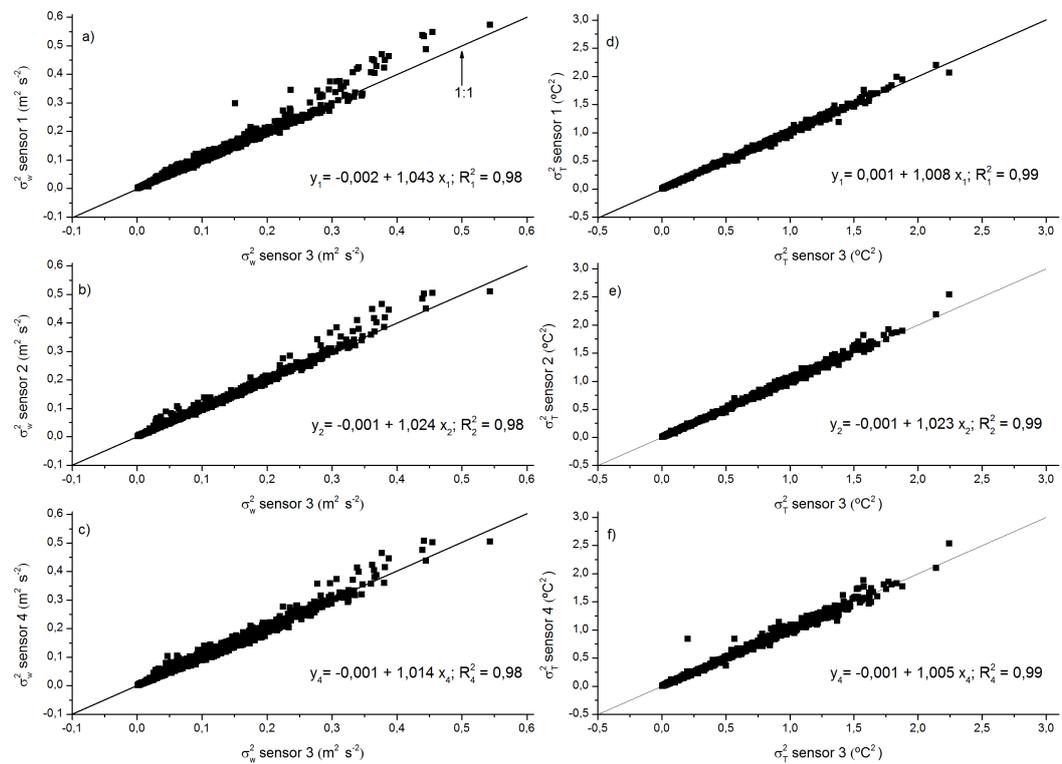


Figura A.2: Intercomparção das variâncias da componente vertical do vento e da temperatura do ar. Em a), b) e c) temos as correlações da componente  $w$  do vento para os sensores 1, 2, 4 respectivamente e em d), e) e f) temos as correlações da temperatura do ar ( $T$ ) para os sensores 1, 2 e 4 respectivamente. Onde o sensor 3 foi tomado como padrão.

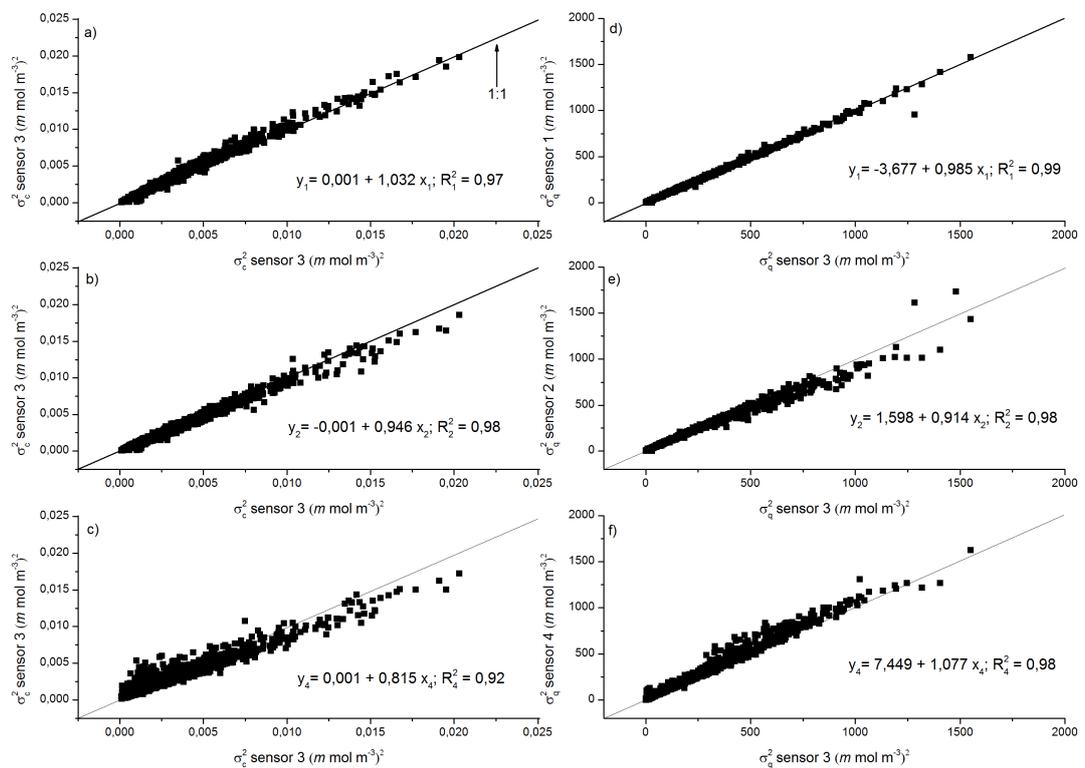


Figura A.3: Intercomparação das variâncias das concentrações de  $CO_2$  e  $H_2O$ . Em a), b) e c) temos as correlações da concentração de  $CO_2$  para os sensores 1, 2, 4 respectivamente e em d), e) e f) temos as correlações da concentração de  $H_2O$  para os sensores 1, 2 e 4 respectivamente. Onde o sensor 3 foi tomado como padrão.

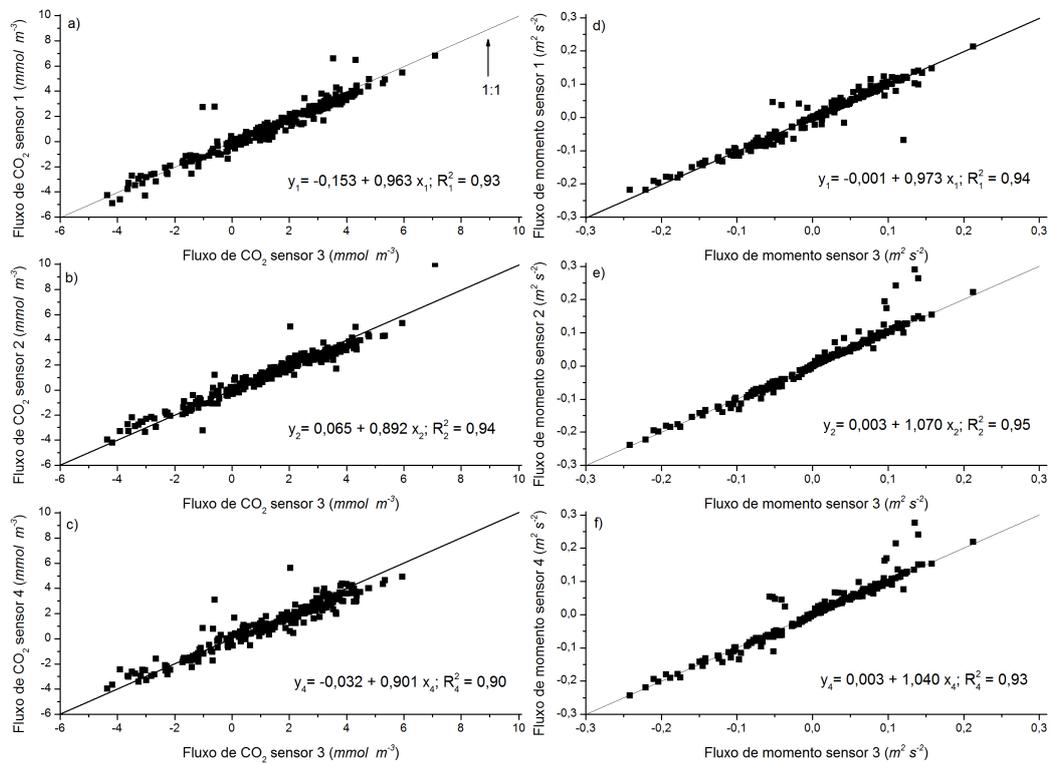


Figura A.4: Intercomparação dos fluxos de  $\text{CO}_2$  e momento. Em a), b) e c) temos as correlações do fluxo de  $\text{CO}_2$  para os sensores 1, 2, 4 respectivamente e em d), e) e f) temos as correlações do fluxo de momento para os sensores 1, 2 e 4 respectivamente. Onde o sensor 3 foi tomado como padrão.

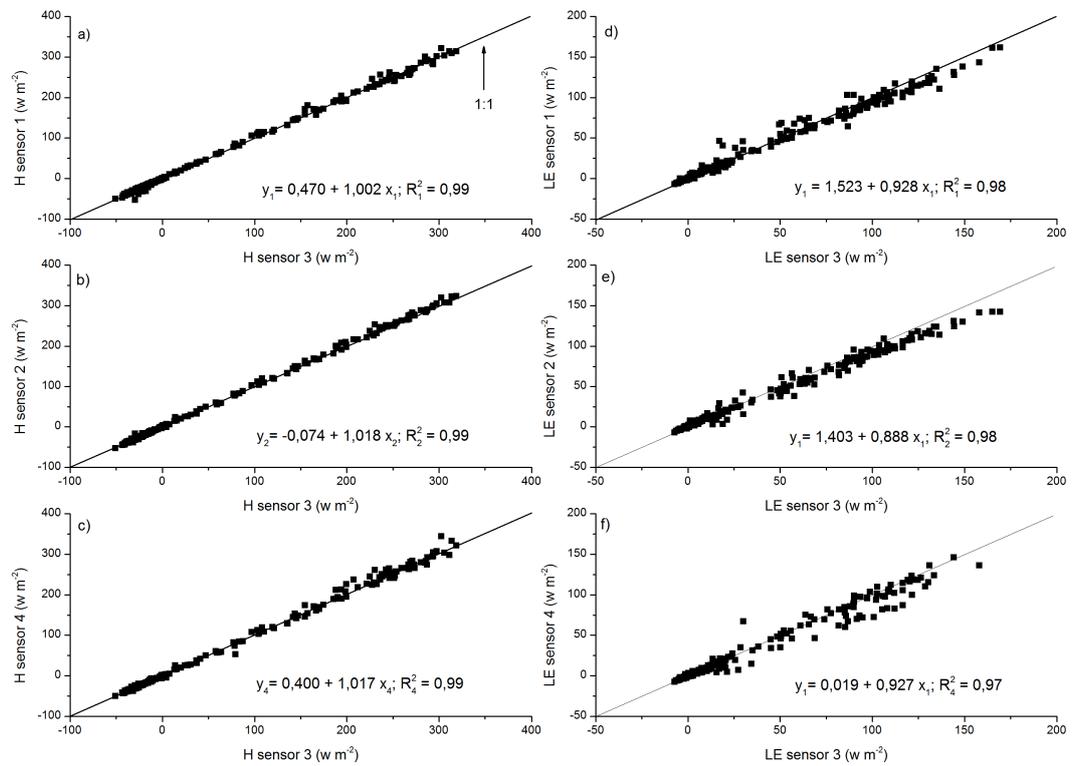


Figura A.5: Intercomparação dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE). Em a), b) e c) temos as correlações do fluxo de calor sensível para os sensores 1, 2, 4 respectivamente e em d), e) e f) temos as correlações do fluxo de calor latente para os sensores 1, 2 e 4 respectivamente. Onde o sensor 3 foi tomado como padrão.