

**REANÁLISE CFSR-NCEP APLICADA AO MODELO SiB2 NA  
SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE CO<sub>2</sub> SOBRE O CULTIVO DE  
SOJA EM CRUZ ALTA.**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

LUCIANA DA SILVA MIERES

**REANÁLISE CFSR-NCEP APLICADA AO MODELO SiB2 NA  
SIMULAÇÃO DE FLUXOS DE CO<sub>2</sub> SOBRE O CULTIVO DE  
SOJA EM CRUZ ALTA.**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto.

ORIENTADOR: RITA DE CÁSSIA MARQUES ALVES

Porto Alegre

Junho de 2012

Dedico este trabalho aos tesouros da vida:  
*Minha família, meu Amor e meus grandes  
amigos.*

## Agradecimentos

- *A minha orientadora Dr<sup>a</sup> Rita de Cássia Marques Alves pelo apoio, confiança e oportunidade;*
- *Aos membros da comissão de avaliação do exame de qualificação e da defesa final pelas críticas e sugestões;*
- *A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado;*
- *À Dr<sup>a</sup> Claudineia Brazil Saldanha por todo apoio intelectual, pelo conhecimento compartilhado e pela grande amizade;*
- *À Dr<sup>a</sup> Débora Regina Roberti pela atenção e instruções a respeito do modelo SiB2;*
- *Ao Dr. Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves pelas motivações, discussões e sugestões;*
- *A todos os meus amigos e colegas do Sensoriamento Remoto, em especial à Bibiana Costa, Rodrigo Loureiro, Ismael Schneider, Rodrigo Ferreira, Nyron Fernando, Diego Teixeira (o físico), Gabriel Munchow, e todos aqueles que não foram citados mas que fizeram parte desta história.*
- *À minha amiga e colega Alessandra Faedrich Martins Rosa (Alê) pela amizade, pelos momentos de estudo e incentivo.*
- *Aos funcionários do Sensoriamento Remoto, tanto da pós-graduação quanto do Centro Estadual pela atenção.*
- *Aos meus pais, Paulo Renato e Maria Helena pelo apoio constante, pela preocupação, pelo incentivo e principalmente pelo grande exemplo que são.*
- *As minhas irmãs Adriana e Fabiana e a minha sobrinha Camila por todos os momentos de compreensão, de conversas e diversão, vocês são grandes amigas.*
- *Aos meus pais “emprestados” Edison e Nádia pelo carinho e atenção.*
- *Finalmente, o mais importante dos agradecimentos, ao meu Amor Arthur pelo apoio técnico na automatização dos dados, pela amizade, confiança, carinho e paciência pelo tempo em que não foi possível estar presente e principalmente por ser o meu maior incentivador.*

*“O Homem sensato se adapta ao mundo, o insensato insiste em adaptar o mundo a si. Todo progresso depende, portanto, do Homem insensato.”*

George Bernard Shaw

## Resumo

Este trabalho buscou avaliar o comportamento dos fluxos de CO<sub>2</sub>, simulados pelo modelo de superfície SiB2, a partir da adoção dos dados de reanálise CFSR-NCEP como condições de contorno atmosféricas. Para a validação dos resultados obtidos utilizou-se uma análise estatística, através de um coeficiente de ajuste, o qual foi embasado nos parâmetros simulados em comparação aos dados observados, sendo estes obtidos pela torre micrometeorológica situada na área de cultivo. O estudo foi aplicado ao sítio experimental de soja localizado em Cruz Alta (-28,6036; -53,6736) no Rio Grande do Sul e o período adotado compreendeu os anos de 2008 e 2009. Inicialmente foi necessário realizar a calibração de alguns parâmetros presentes nas sub-rotinas (módulos) do modelo. Para tanto, foi adotada uma metodologia em que os parâmetros foram calibrados conforme os módulos sequenciais, respeitando a seguinte ordem: aerodinâmico, transferência radiativa, difusão hidráulica do solo e fotossíntese e condutância estomática. A calibração do módulo aerodinâmico foi aplicada aos parâmetros referentes à altura do dossel, fração de cobertura vegetal e distribuição do ângulo foliar. No módulo de transferência radiativa, foi calibrado o parâmetro de reflectância da folha viva no visível. A calibração dos parâmetros referentes ao módulo de difusão hidráulica do solo foi realizada na porosidade do solo, profundidade individual das camadas e expoente de umidade. No módulo de fotossíntese e condutância estomática os parâmetros testados foram índice de área foliar, condutância estomática mínima e temperatura crítica para a respiração foliar. A calibração destes parâmetros permitiu que se obtivesse uma substancial melhoria na simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub> pelo modelo, obtendo-se um ganho expressivo na qualidade da simulação. Esta etapa constitui fundamental importância, uma vez que permitiu que a adoção dos dados de reanálise fosse efetuada no modelo adequado à área de estudo. No que tange a etapa final desta pesquisa, destaca-se que os dados do CFSR foram utilizados como condição de contorno atmosférica. Estas condições são necessárias à inicialização do modelo e originalmente utilizam-se as variáveis meteorológicas obtidas a partir da estação do INMET. Foram adotadas as variáveis referentes à temperatura do ar, pressão atmosférica ao nível do mar, precipitação, radiação de onda curta incidente e velocidade do vento, utilizadas para descrever o estado físico da atmosfera nas novas simulações dos fluxos de CO<sub>2</sub>, as quais foram comparadas aos dados observados da torre. A partir dos resultados obtidos, presumiu-se que a utilização dos dados de reanálise CFSR-NCEP pode ser considerada aceitável na aplicação de estudos dos fluxos de CO<sub>2</sub> a partir do modelo SiB2, ressaltando-se que a calibração do referido modelo à área de estudo é de grande importância para sua adequação e obtenção de resultados mais satisfatórios.

**Palavras-chave:** SiB2, fluxos de CO<sub>2</sub>, CFSR

# Abstract

The present work aimed to evaluate the behavior of CO<sub>2</sub> fluxes, run by the Simple Biosphere Model (SiB2), by adopting CFSR-NCEP data reanalyzed as an atmospheric boundary condition. A statistical analysis was used in order to validate the results obtained using a coefficient for the adjusted model based on the simulation parameters when compared to the data observed in field, which was obtained by the micrometeorological tower located on the cultivation areas. The study was applied in a soybean experimental site located in Cruz Alta (-28,6036; -53,6736), in the state of Rio Grande do Sul, Southern Brazil between 2008 and 2009. Some of the parameters presented in the subroutines of the model had to be adjusted first. For such, a methodology in which the parameters were calibrated in sequential modules was applied according to the following order: aerodynamics, radiative transfer, hydraulic diffusion of the soil and photosynthesis and stomatal conductance. In the aerodynamics module, the calibration was made using the parameters for the canopy height, vegetation coverage and leaf-angle distribution. For the radiative transfer, the calibration used the parameters for the live leaf transmittance visible reflectance. The calibration for the hydraulic diffusion of the soil was accomplished in the soil porosity, depth of individual layers and humidity exponent. For the photosynthesis and stomatal conductance, the parameters tested were the leaf area index, minimum stomatal conductance and leaf respiration critical temperature. It could thus be possible to obtain a considerable improvement for the simulation of the CO<sub>2</sub> fluxes in this model for a high-quality simulation. That stage was significantly important since it enabled the reanalysis data to be set in the best model for the studied area. Regarding the final stage of this study, data from the CFSR were used as the atmospheric boundary condition instead of originally applied meteorological variables from the INMET station. Variables concerning air temperature, air pressure at sea level, precipitation, incident short-wave radiation and wind speed were used in order to describe the physical condition of the atmosphere in new simulations with CO<sub>2</sub> fluxes, and then compared to the data observed in the micrometeorological tower. From the results, using the CFSR-NCEP reanalysis data can be considered acceptable for studies on CO<sub>2</sub> fluxes from the SiB2 model. Yet, calibrating this model for the studied area is a key factor for its suitability and for obtaining adequate results.

**Key-words:** SiB2, CO<sub>2</sub> fluxes, CFSR.

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1.</b> Partes do sistema vegetativo da soja. Fonte: Santos (1998).....	9
<b>Figura 2.2.</b> Ciclo vegetativo da soja. Fonte: Doorenbos e Kassam (1994) .....	10
<b>Figura 2.3.</b> Evapotranspiração diária da cultura de soja, nos diferentes estádios de desenvolvimento. Fonte. Monteiro, 2009.....	15
<b>Figura 3.1.</b> Estrutura das duas versões do modelo. (A) Estrutura da primeira versão (SiB) com duas camadas de vegetação. Adaptado de Sellers <i>et al</i> (1986). (B) Estrutura da segunda versão (SiB2) com apenas uma camada de vegetação e três camadas de solo. Fonte. Llopart (2009).....	22
<b>Figura 3.2.</b> Diagrama de modelagem do SiB2. Adaptado de Sellers <i>et al</i> (1996a).....	28
<b>Figura 3.3.</b> Resistências aerodinâmicas. Adaptado de Llopart, 2009.....	30
<b>Figura 4.1.</b> Fluxograma referente às etapas metodológicas.....	35
<b>Figura 4.2.</b> Mapa de localização da área de estudo.....	37
<b>Figura 4.3.</b> Esquema de funcionamento de uma torre micrometeorológica. Fonte: Escobar (2008).....	39
<b>Figura 5.1.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da altura da base ( $Z_1$ ) e do topo do dossel ( $Z_2$ ).....	53
<b>Figura 5.2.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da fração de cobertura vegetal ( $V$ ).....	55
<b>Figura 5.3.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ).....	57
<b>Figura 5.4.</b> Comparativo entre os fluxos de $CO_2$ experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo aerodinâmico, cujos valores foram fixados ao longo do processo.....	59
<b>Figura 5.5.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da reflectância da folha viva no visível ( $\alpha_v, l$ ).....	61



<b>Figura 5.6.</b> Comparativo entre os fluxos de CO <sub>2</sub> experimental e o simulado após a calibração do parâmetro de reflectância da folha viva no visível.....	63
<b>Figura 5.7.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da porosidade do solo ( $\theta_s$ ).....	65
<b>Figura 5.8.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da profundidade individual das camadas do solo ( <i>zdepth</i> ).....	67
<b>Figura 5.9.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da expoente de umidade do solo ( <i>bee</i> ).....	69
<b>Figura 5.10.</b> Comparativo entre os fluxos de CO <sub>2</sub> experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo de difusão hidráulica do solo, cujos valores foram fixados ao longo do processo.....	71
<b>Figura 5.11.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações do índice de área foliar mensal (IAF).....	73
<b>Figura 5.12.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da condutância estomática mínima.....	75
<b>Figura 5.13.</b> Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da temperatura crítica para respiração foliar.....	77
<b>Figura 5.14.</b> Comparativo entre os fluxos de CO <sub>2</sub> experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo de fotossíntese e condutância estomática, cujos valores foram fixados ao longo do processo.....	79
<b>Figura 5.15.</b> Comparativo entre os fluxos de CO <sub>2</sub> experimental e os simulados antes da calibração e após a calibração dos parâmetros.....	80
<b>Figura 5.16.</b> Comparativo entre os fluxos de CO <sub>2</sub> experimental e os simulados a partir da inicialização do modelo com dados de reanálise.....	83
<b>Figura 5.17.</b> Comparativo entre os fluxos de CO <sub>2</sub> experimental e os simulados em três momentos.....	85
<b>Figura 5.18.</b> Resíduos do modelo de simulação dos fluxos de CO <sub>2</sub> (diagrama de caixa). A linha horizontal no interior das caixas representa o percentil 50 (mediana), o final das caixas os percentis 25 e 75; o símbolo de cruz representa valores extremos.....	87

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1.</b> Estádio de desenvolvimento da soja.Fonte. Monteiro, 2009.....	12
<b>Tabela 2.2.</b> Períodos indicados para a semeadura de soja no Rio Grande do Sul. Fonte: Embrapa, 2006.....	14
<b>Tabela 2.3.</b> Evapotranspiração máxima como indicativo do consumo hídrico da cultura de soja. Fonte. Farias, 2001.....	16
<b>Tabela 3.1.</b> Tipos de vegetação em cada versão do modelo. Fonte: Sellers <i>et al</i> (1996a).....	23
<b>Tabela 3.2.</b> Conjunto de parâmetros do modelo SiB2. Fonte: Sellers <i>et al</i> (1996a).....	25
<b>Tabela 5.1.</b> Valores adotados na calibração dos parâmetros do módulo aerodinâmico.....	52
<b>Tabela 5.2.</b> Valores adotados na calibração da altura da base do dossel ( $Z_1$ ) e altura do topo do dossel ( $Z_2$ ).....	52
<b>Tabela 5.3.</b> Valores adotados na calibração da fração de cobertura vegetal ( $V$ ).....	54
<b>Tabela 5.4.</b> Valores adotados na calibração do parâmetro de distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ).....	56
<b>Tabela 5.5.</b> Intervalo de valores adotados na calibração do parâmetro do módulo de transferência radiativa.....	60
<b>Tabela 5.6.</b> Valores adotados na calibração da reflectância da folha viva no visível ( $\alpha_v, l$ ).....	60
<b>Tabela 5.7.</b> Valores adotados na calibração dos parâmetros do módulo de difusão hidráulica do solo.....	64
<b>Tabela 5.8.</b> Valores adotados na calibração da porosidade do solo ( $\theta_s$ ).....	65

<b>Tabela 5.9.</b> Valores adotados na calibração da profundidade individual das camadas do solo ( <i>zdepth</i> ).....	67
<b>Tabela 5.10.</b> Valores adotados na calibração do expoente de umidade do solo ( <i>bee</i> ).....	69
<b>Tabela 5.11.</b> Valores adotados na calibração dos parâmetros do módulo de fotossíntese e condutância estomática mínima.....	72
<b>Tabela 5.12.</b> Valores adotados na calibração do índice de área foliar ( <i>IAF</i> ).....	73
<b>Tabela 5.13.</b> Valores adotados na calibração do parâmetro de condutância estomática mínima ( <i>B</i> ).....	75
<b>Tabela 5.14.</b> Valores adotados na calibração do parâmetro de temperatura crítica para a respiração foliar ( <i>trdm</i> ).....	76
<b>Tabela 5.15.</b> Coeficiente de Nash e Sutcliffe referente às simulações antes da calibração (pré-calibração) e após este processo (pós-calibração).....	81
<b>Tabela 5.16.</b> Coeficiente de Nash e Sutcliffe referente às simulações antes da calibração (pré-calibração), após a calibração (pós-calibração) e obtidos a partir da inicialização com dados de reanálise (CFSR).....	84

## Lista de Símbolos

$A_{n,c}$  - Assimilação de  $\text{CO}_2$

AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer

bee - Expoente de umidade do solo

B - Condutância estomática mínima

$\text{CO}_2$  - Dióxido de carbono

CLP - Camada limite planetária

CFS - Climate Forecast System

CFSR - Climate Forecast System Reanalysis

$D_1$  - Grau de saturação de umidade na primeira camada do solo (evaporação livre)

$D_r$  - Grau de saturação de umidade na segunda camada do solo (zona de raízes)

$D_t$  - Grau de saturação de umidade na terceira camada do solo (drenagem profunda)

$E_c$  - Evapotranspiração do dossel

$E_{ci}$  - Evaporação de água interceptada pelo dossel

$E_{ct}$  - Transpiração da água do solo extraída pelo sistema radicular

$E_g$  - Evaporação da superfície do solo

$E_{gi}$  - Perda de água pela superfície

$E_{gs}$  - Perda de água por evaporação da camada superior do solo ( $D_1$ )

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

$ET_m$  - Evapotranspiração máxima

$e_m$  - Pressão de vapor d'água

FAO - Food and agriculture organization

FC - Fotoperíodo crítico

FPAR - Fraction Photosynthetically Active Radiation

FUNDACEP - Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigro

$F_{\Lambda, \mu\nu}$  - Fluxos de radiação incidente

GRADS - Grid Analysis and Display System

$g_c$  - Condutância estomática

$h_a$  - Espaço de ar do dossel

H - Fluxo de calor sensível

IAF - Índice de área foliar

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

LE - Fluxo de calor latente

MAPA - Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MCG- Modelos de circulação geral da atmosfera

$M_{cs}$  - Intercepção de gelo e neve pelo dossel

$M_{cw}$  - Armazenamento de água por intercepção dossel

$M_{gs}$  - Intercepção de gelo e neve pela superfície do solo

$M_{gw}$  - Armazenamento de água por intercepção da superfície do solo

N - Fração verde do dossel

NCEP - National Center for Environmental Prediction

NEE - Troca líquida de CO<sub>2</sub> no ecossistema

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

NOMADS - National Operational Model Archive & Distribution System

NS - Coeficiente de Nash e Sutcliffe

P - Precipitação

$r_a$  - Resistência aerodinâmica entre o nível no espaço de ar do dossel e um nível de referência

$r_b$  - Resistência aerodinâmica entre todas as folhas do dossel e o espaço de ar interior a ele

$r_d$  - Resistência aerodinâmica entre a superfície do solo até o espaço de ar o dossel

$R_d$  - Respiração do dossel

$R_s$  - Respiração do solo

SiB - Simple Biosphere Model

SiB2 - Simple Biosphere Model 2

SC - Sistema convencional de manejo

SD - Sistema de plantio direto

SULFLUX - Rede Sul-brasileira de Fluxos Superficiais

$T_c$  - Temperatura do dossel

$T_d$  - Temperatura do solo em profundidade

$T_g$  - Temperatura da superfície do solo

$T_m$  - Temperatura do ar

$trdm$  - Temperatura crítica para a respiração foliar

$u_1$  - Componente zonal do vento em  $Z_1$

$u_2$  - Componente zonal do vento em  $Z_2$

$u_m$  - Componente zonal do vento em  $Z_m$

USDA - United States Department of Agriculture

$V$  - Fração de cobertura do dossel

$X_L$  - Distribuição do ângulo foliar

$Z_1$  - Altura da base do dossel

$Z_2$  - Altura máxima do dossel

zdepth - Profundidade individual das camadas

$Z_m$  - Nível de altitude máximo acima do dossel

$Z_s$  - Superfície do solo

$Z_t$  - Nível de referência

$\alpha_{v,l}$  - Reflectância da folha viva no visível

$\theta_s$  - Porosidade do solo

# Sumário

<b>Capítulo 1</b> .....	1
1. Introdução .....	1
1.1. Objetivos .....	5
1.1.1. Objetivo Geral .....	5
1.1.2. Objetivos Específicos .....	6
1.2. Organização da dissertação .....	6
<b>Capítulo 2</b> .....	7
2. A cultura de soja.....	7
2.1 Características da Soja.....	8
2.2 Características da Produtividade de Soja.....	12
2.3 Condicionantes Agrometeorológicos da Produtividade .....	14
<b>Capítulo 3</b> .....	19
3. Modelos de Superfície.....	19
3.1 Modelo SiB2 ( Simple Biosphere Model).....	20
3.2 Estrutura do modelo .....	23
3.2.1 Condições de contorno atmosféricas.....	23
3.2.2 Parâmetros variantes e invariantes com o tempo .....	24
3.2.3 Propriedades físicas do solo .....	26
3.2.4 Variáveis prognósticas.....	26
<b>Capítulo 4</b> .....	33
4. Material e métodos.....	33
4.1 Sítio Experimental de Cruz Alta-RS.....	36
4.2 Dados Experimentais.....	37



4.2.1 Torre Micrometeorológica .....	37
4.3.2 Estação meteorológica .....	39
4.2.3 Preparação dos dados de reanálise (CFSR) adotados como condições de contorno atmosféricas .....	39
4.3 Calibração dos parâmetros do modelo SiB2 .....	42
4.3.1 Módulo Aerodinâmico .....	43
4.3.2 Módulo de Transferência Radiativa .....	44
4.3.3 Módulo de Difusão Hidráulica do Solo.....	45
4.3.4 Módulo de fotossíntese e condutância estomática .....	46
4.4 Adoção do CFSR como condição de contorno inicial na simulação de fluxos de CO <sub>2</sub> pelo modelo SiB2.....	48
<b>Capítulo 5</b> .....	<b>50</b>
5. Resultados e discussões .....	50
5.1 Calibração dos parâmetros do modelo SiB2 .....	50
5.1.1 Módulo Aerodinâmico .....	51
5.1.2 Módulo de Transferência Radiativa .....	60
5.1.3 Módulo de Difusão Hidráulica do Solo.....	63
5.1.4 Módulo de Fotossíntese e Condutância Estomática .....	71
5.2 Avaliação da adoção do CFSR como condição de contorno inicial na simulação de fluxos de CO <sub>2</sub> pelo modelo SiB2. ....	81
5.3 Análise de resíduos .....	86
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>88</b>
6.1 Conclusões.....	88
6.2 Perspectivas para trabalhos futuros .....	90
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>91</b>
<b>Apêndice A</b> .....	<b>98</b>
Avaliação dos métodos de estimativa das variáveis meteorológicas .....	98

# Capítulo 1

## 1. Introdução

A conversão da cobertura vegetal natural em áreas agrícolas, afeta os ciclos biogeoquímicos, bem como os fluxos de carbono para atmosfera e a biodiversidade terrestre. Considerando-se que a agricultura constitui uma atividade de fundamental importância para o desenvolvimento econômico, verifica-se o constante aumento de novas áreas agrícolas em detrimento de áreas de vegetação natural. Em uma escala regional o conhecimento a cerca das atividades agrícolas e dos diferentes cultivos permite avaliar as interações ocorrentes no ambiente de desenvolvimento da cultura, permitindo a adequação de um planejamento, com vistas à maximização do seu rendimento.

A transferência de energia, carbono e água entre a biosfera e a atmosfera são importantes interações necessárias à existência de diversas formas de vidas, em particular, a vida vegetal que é extremamente dependente destas trocas. No que tange os fluxos de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), pode-se afirmar que, no contexto da vegetação, é de extrema importância por estar vinculado ao processo de fotossíntese a partir do qual as plantas adquirem aumento de sua biomassa e, conseqüentemente, ocorrendo seu crescimento e desenvolvimento.

A quantidade de  $\text{CO}_2$  transferidas de um reservatório para outro (biosfera para a atmosfera) por unidade de tempo são conhecidas como fluxos, sendo esta transferência decorrência de processos físico-bio-geo-químicos (Rodrigues, 2010). O  $\text{CO}_2$  apresenta um fluxo cíclico, no qual durante o período diurno o fluxo é predominantemente

negativo, significando a assimilação de CO<sub>2</sub> atmosférico pelo ecossistema, enquanto no período noturno, apresenta valores positivos, representando o processo de respiração da vegetação. Esse processo opera em diversas escalas de tempo, de diurna a sazonal, e são influenciadas por variáveis climáticas como temperatura, umidade disponível, entre outros (Grace et al (1995) *apud* Rodrigues, (2010).).

A assimilação de carbono na soja ocorre pelo processo de fotossíntese, onde sua captação se dá através dos estômatos presentes na estrutura morfológica da folha, sendo controlado pela condutância estomática, processo fisiológico que regula as trocas de água e CO<sub>2</sub>. Quanto à perda de carbono, esta ocorre através da respiração. Assim, cabe afirmar que estas trocas de carbono ocorrentes entre a cultura e a atmosfera, são fundamentais para que ocorra o crescimento da cultura. Uma vez relacionada ao crescimento, o desenvolvimento dos estádios fenológicos da soja também são dependentes deste processo de assimilação e perda de carbono, verificando-se, portanto, a importância que tal fluxo tem para o devido desenvolvimento da soja, estando também relacionado ao seu rendimento futuro.

Esta interação entre a superfície e a atmosfera ocorre na zona da troposfera conhecida como Camada Limite Planetária (CLP), caracterizada por ser uma região de intensa turbulência, cuja extensão no período diurno é maior que o período noturno. Pela maior dependência da fisiografia local, os fluxos dentro da camada limite são fortemente controlados pela menor escala.

Com vistas a um melhor entendimento destes processos de superfície, foram criados modelos que atuam em escalas menores que as escalas de trabalho dos modelos de circulação global. Assim foram desenvolvidos modelos de superfície que tratam da transferência solo-planta-atmosfera, sendo alguns deles: SiB (*Simple Biosphere Model*) e SiB2(*Simple Biosphere Model 2*) (Sellers et al., 1986, 1996a,b), BATS (*Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme*) (Dickinson et al, 1986), IBIS (*Integrated Biosphere Simulator*) (Foley et al, 1996), SSiB (*Simplified Simple Biosphere Model*) (Xue et al., 1991). Estes foram formulados para representar uma superfície vegetada e por esta razão, torna-se necessário adequá-los para cada tipo de bioma. (Webler, 2011)

Os modelos de superfície são usados em diversos estudos que buscam a obtenção dos fluxos superficiais como calor sensível, latente e fluxos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>),

desse modo, as características da superfície passam a ser parâmetros utilizados na sua adequação ao ambiente que está representando. Esta adequação ao bioma ocorre através do processo de calibração, que consiste na validação dos parâmetros descritores da biosfera, ou seja, na definição de valores dos parâmetros adotados pelo modelo, ajustados de tal maneira que representem mais fielmente possível o funcionamento do ecossistema.

A magnitude destes processos de transferência ocorrentes no sistema solo-planta-atmosfera varia de bioma para bioma. Áreas de floresta, por exemplo, apresentam um comportamento dos fluxos de superfície diferenciado daquele apresentado em áreas de cultivo agrícola sendo que esta diferenciação se deve às características da vegetação em cada um destes ambientes. Em comparação às florestas as terras utilizadas para cultivo se caracterizam por um albedo maior, menor rugosidade superficial e variações de umidade do solo que influenciam os fluxos de calor sensível, latente e de CO<sub>2</sub> (Webler, 2011). Considerando-se estas características, percebe-se que a substituição da vegetação natural por agricultura tem significativo impacto na dinâmica destes fluxos que conseqüentemente podem impactar as características do clima local.

Segundo Bonan (2002) o uso da terra em pastagens e o desmatamento contribuem para a ocorrência de menores índices pluviométricos, enquanto a irrigação contribui com o aumento da umidade relativa do ar e densidade das nuvens. Além dessas influências, as culturas agrícolas constituem uma das fontes de CO<sub>2</sub> da biosfera, resultante da respiração das plantas e decomposição de matéria orgânica do solo (Smith et al 2007; Mosier et al, 1998).

Diante do constante crescimento de áreas voltadas a estas práticas, considerando conjuntamente, que as medidas dos fluxos de CO<sub>2</sub> sobre sistemas de cultivo são necessárias para a compreensão do ciclo do carbono nestes ambientes. Verifica-se a importância de estudos voltados a estes fluxos sobre culturas agrícolas, uma vez que informações sobre as mudanças temporais do fluxo de CO<sub>2</sub> podem indicar quais as práticas de manejo poderiam minimizar o aumento do dióxido de carbono na atmosfera ou até mesmo maximizar ganhos na produção.

O aumento do interesse no comportamento das culturas agrícolas tem incentivado o desenvolvimento de estudos a cerca do comportamento dos fluxos de

energia, CO<sub>2</sub> e água em cultivos sob diferentes sistemas de manejo. Com a finalidade de compreender as referidas interações ocorrentes neste ambiente, algumas metodologias são adotadas, entre elas o método da covariância turbulenta (*eddy covariance*) que consiste em medições experimentais dos fluxos citados, por meio de sensores localizados nas áreas de cultivo.

Contudo este método exige um aparato experimental de alto custo, tornando-se viável apenas para medidas em escalas locais. Neste sentido, a modelagem de interação biosfera-atmosfera vem contribuir como uma ferramenta na avaliação destes fluxos, tendo em vista a dificuldade de se obter experimentalmente as transferências de energia, água e CO<sub>2</sub>. Ao longo dos últimos anos foram desenvolvidos diversos trabalhos para adaptar modelos que descrevem a interação biosfera-atmosfera para simular diferentes ecossistemas agrícolas. Entre estes trabalhos tem-se Hanan et al. (2005) que adaptaram o modelo SiB2 (Simple Biosphere Model, Sellers et al. 1996c) para simulação do ecossistema do trigo. Tem-se, ainda os estudos com o modelo IBIS (Integrated Biosphere Simulator, o qual foi adaptado e utilizado na simulação da cultura de milho e soja (Kucharik e Brye, 2003), cana de açúcar (Cuadra et al. 2010).

Cabe ressaltar que tais modelos necessitam da definição do estado físico da atmosfera o qual exerce influencia direta nos fluxos superficiais. A definição deste estado é dada pela determinação das condições de contorno atmosféricas, que são variáveis como temperatura do ar, pressão de vapor d'água, a velocidade do vento, precipitação e fluxos de radiação incidente. Estas variáveis atuam como forçantes de inicialização e, em geral, são provenientes de estações meteorológicas experimentais.

Entretanto, estas estações, devido o elevado custo de seus equipamentos, são instaladas em algumas áreas tornando-se viável apenas para medidas em escalas locais. Além disso, é comum ocorrer falhas nos dados experimentais, ocasionadas por problemas de falta de energia, falha humana ou problemas de sensores. Este fato em conjunto com a esparsa rede de estações meteorológicas constitui em problemas no estudo das interações da superfície com a atmosfera ao se desenvolver pesquisas em áreas onde não disponham de dados meteorológicos experimentais ou estes apresentem muitas falhas.

Com a finalidade de suprir esta carência de dados meteorológicos, algumas fontes podem ser adotadas, como os Modelos de Circulação Geral (MCG) e as reanálises. Os modelos de circulação geral consistem na integração numérica de sistemas de equações que simulam os processos físicos, dinâmicos e termodinâmicos em relação ao tempo, gerando valores de diversas variáveis, tais como, temperatura do ar, umidade relativa, precipitação e pressão atmosférica. Já as reanálises são constituídas a partir da interação de um sistema de assimilação de dados com um modelo global, assim gerando também valores de variáveis. Dessa maneira, ambos podem fornecer os dados adotados como condições de contorno atmosféricas necessárias à inicialização dos modelos de superfície.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Este estudo propõe avaliar a utilização do dado de reanálise CFSR-NCEP (*Climate Forecast System Reanalysis – National Center for Environmental Prediction*) no suprimento das variáveis de contorno atmosféricas utilizadas no modelo de superfície Sib2 (*Simple Biosphere Model 2*), visando à obtenção de fluxos de CO<sub>2</sub> sobre um sistema agrícola de soja localizada no município de Cruz Alta no Estado do Rio Grande do Sul. O principal intuito desta avaliação é verificar se os dados de reanálise adotados podem ser utilizados em regiões que sofrem carência de dados meteorológicos experimentais, com vistas até mesmo à sua aplicação futura em estudos climatológicos destes fluxos.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Adequar o modelo de superfície SiB2 à área de estudo através do processo de calibração de alguns parâmetros, seguindo uma hierarquia: Módulo Aerodinâmico, Módulo de Transferência Radiativa, Módulo de Difusão Hidráulica do Solo e Módulo de Fotossíntese e Condutância estomática;
- Definir a viabilidade do uso da reanálise na obtenção dos fluxos de CO<sub>2</sub>.

### **1.2. Organização da dissertação**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. Este capítulo contém a introdução, objetivo geral e específico. No capítulo 2 é feita uma revisão sobre a cultura de soja. No capítulo 3 é feita revisão a cerca do modelo de superfície SiB2. O capítulo quatro descreve a metodologia utilizada, no que tange à calibração e no que trata a aquisição, preparo e utilização dos dados do CFSR. Findando o estudo com o capítulo cinco em que se verifica a avaliação tanto dos resultados obtidos com a calibração, quanto dos resultados obtidos com a adoção da reanálise.

## Capítulo 2

Neste capítulo será apresentado um breve histórico da cultura de soja no Rio Grande do Sul, suas características morfológicas, fisiológicas e ainda àquelas relativas à produtividade, bem como os condicionantes agrometeorológicos que interferem na produtividade do cultivo.

### 2. A cultura de soja

O cultivo da soja configura um cenário de grande importância econômica, uma vez que contribui de forma direta com o desenvolvimento de alguns países. Segundo o informativo publicado em 2011 pelo departamento de agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture – USDA*), o Brasil destaca-se como segundo maior produtor mundial do grão, sendo a primeira posição ocupada pelo referido país norte americano.

Diante do posicionamento brasileiro no mercado mundial produtor de soja, constata-se que este cultivo desempenha importante papel na economia nacional. Por esta razão, é justificável o desenvolvimento de diversos estudos que buscam o entendimento de técnicas que possam otimizar os rendimentos desta cultura, bem como compreender as dinâmicas superficiais existentes entre a superfície, o espaço do dossel e as camadas do solo.

Analisando brevemente o contexto histórico do grão no Brasil, verifica-se que a soja foi primeiramente introduzida no país pelo estado da Bahia, em 1882, sem notório sucesso. Em 1890 a soja foi introduzida no Rio Grande do Sul, porém neste período sua pequena produção era destinada à alimentação de animais. Em 1901 foi semeada com



bons resultados no município de Dom Pedrito a partir de onde foi expandida para outros municípios, sendo posteriormente adotada como leguminosa para a rotação de culturas juntamente com o trigo, aumentando, dessa maneira, sua área de cultivo no estado (Santos, 1988).

O cultivo do grão foi introduzido nos estados de Santa Catarina e Paraná por agricultores do estado do Rio Grande do Sul durante a década de 1930. Porém, apenas na década de 1960 que sua expansão ocorreu de fato, quando o Rio Grande do Sul e o Paraná passaram a destacar-se como os maiores produtores nacionais do grão. Em 1969, a produção no país superou o valor de um milhão de toneladas e a cultura passou a destacar-se por sua grande importância para a economia nacional. Já na década de 1980, este cenário adquire nova configuração, com a expansão do cultivo dos grãos para região centro-oeste, a qual passa a assumir o papel de maior produtor nacional. A produção de soja no Brasil é liderada pelos estados de Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás (Monteiro, 2009).

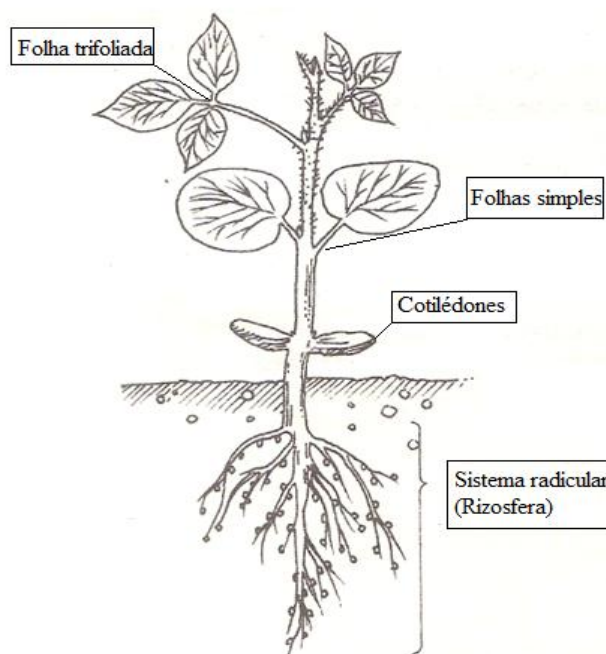
## **2.1 Características da Soja**

A soja é uma cultura de verão, pertencente à família das leguminosas, conforme afirmação de Santos (1988). Para a ocorrência de seu desenvolvimento vegetativo, alguns fatores primários do ambiente são imprescindíveis, influenciando diretamente no seu rendimento. Com relação a estes fatores destaca-se a radiação solar, o oxigênio, o dióxido de carbono, a temperatura do ar, a disponibilidade hídrica e os macro e micro nutrientes.

O desenvolvimento vegetativo depende da disponibilidade abundante de açúcares para a formação de folhas e outras partes da planta, os nutrientes são necessários para a divisão celular rápida e para o crescimento e sua deficiência implica na inibição da utilização dos produtos da fotossíntese (Monteiro, 2009). Com relação à disponibilidade hídrica, Saldanha (2009), afirma que a planta é sensível às condições de solo saturado, por esta razão deve ser bem drenado e arejado. Contudo, a deficiência de umidade pode limitar o desenvolvimento da planta através da redução na quantidade de CO<sub>2</sub>, uma vez com deficiência hídrica os estômatos das folhas se fecham diminuindo a

absorção de CO<sub>2</sub> utilizado na fotossíntese. A deficiência de umidade também ocasiona retardamento no crescimento da planta, pois reduz a presença de água, absorvida pelo sistema radicular, prejudicando o processo de fotossíntese.

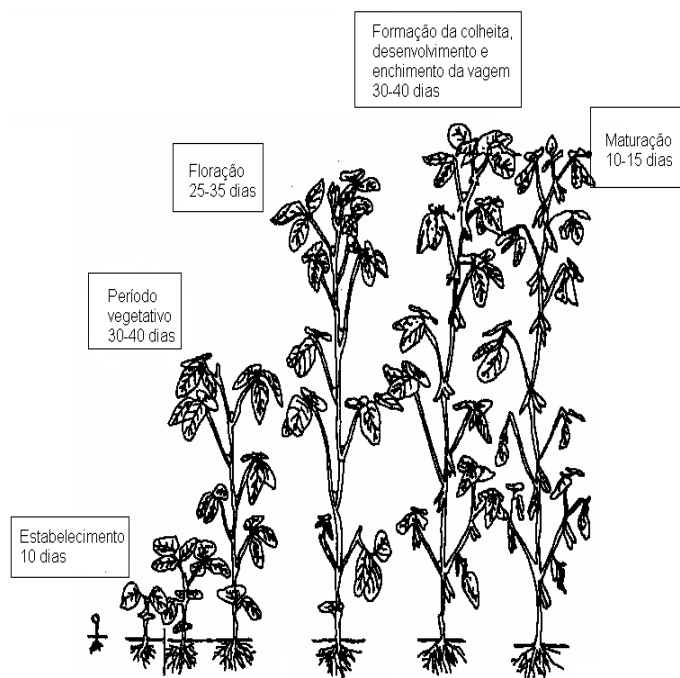
No que tange à radiação, sabe-se que seu efeito direto é o de promover a formação dos carboidratos utilizados na respiração que é o processo fornecedor de energia, sendo que a intensidade luminosa influenciará na absorção dos elementos minerais por meio do aumento da atividade fotossintética. (Costa, 1996). Em síntese, cada cultivar de soja tem seu rendimento potencial determinado geneticamente, o ambiente determinará quanto o rendimento atual (real ou obtido) irá se aproximar do potencial genético. A figura 2.1 permite identificar partes do sistema vegetativo da soja.



**Figura 2.1.** Partes do sistema vegetativo da soja. Fonte: Santos (1988)

Em linhas gerais, convém ressaltar que as cultivares brasileiras de soja são classificadas em grupos de maturação baseados no ciclo da cultura, podendo ser precoce, semiprecoce, médio, tardio e semitardio, sendo que esta classificação varia conforme a região. O número de dias entre a emergência e a maturação tem sido

utilizado como um dos fatores de caracterização da variedade. A figura 2.2 apresenta o ciclo vegetativo da soja.



**Figura 2.2.** Ciclo vegetativo da soja. Fonte: Doorenbos e Kassam (1994)

Além da classificação segundo o grupo de maturação, a soja também pode ser classificada conforme a fase de seu desenvolvimento. Desse modo, têm-se os estádios de desenvolvimento que descrevem as etapas de crescimento do cultivo (Monteiro, 2009). A determinação dos estádios de desenvolvimento tem sido objeto de estudo de diversos autores que identificaram e propuseram sua classificação. A classificação realizada por Fehr e Caviness (1977), pode ser aplicada em uma única planta ou a uma comunidade delas, dessa maneira foi possível generalizar seu uso em diversas pesquisas sobre soja em que se necessite correlacionar dados com estádios de desenvolvimento e assim avaliar as características da cultura em uma dada região com suas particularidades. (Santos, 1988).

Com base na classificação de Fehr e Caviness, verifica-se que o ciclo de vida de uma planta pode ser dividido em dois estádios principais: vegetativo e reprodutivo. O estágio vegetativo compreende a emergência da plântula e o crescimento da planta com o conseqüente aumento de fitomassa, sendo subdividido em VE (emergência) e VC

(cotilédones). Em linhas gerais o estágio VE, caracteriza-se pelo surgimento dos cotilédones acima da superfície do solo, já o estágio VC é caracterizado a partir do surgimento do nó das folhas primárias. Em resumo, a partir de VC, as subdivisões dos estádios vegetativos são numeradas sequencialmente: V1, V2, V3,...,Vn, em que *n* é o número de nós acima do nó cotiledonar com folhas completamente desenvolvidas. (Monteiro, 2009).

Com relação ao estágio reprodutivo da soja, Saldanha (2009) diz que compreende a emissão de flores, a formação de vagens, o enchimento dos grãos e a maturação. Monteiro (2009) relata que os estádios reprodutivos são denominados pela letra R, seguida dos números 1 a 8, descrevendo detalhadamente o período do florescimento à maturação. Os estádios reprodutivos abrangem quatro fases distintas do desenvolvimento reprodutivo da planta, sendo elas: florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento do grão (R5 e R6) e a fase final de maturação da planta (R7 e R8). Na tabela 2.1, verificam-se os estádios de desenvolvimento da soja conforme detalhado por Fehr e Caviness em 1977.

**Tabela 2.1.** Estádio de desenvolvimento da soja. Fonte: Monteiro, 2009

Período	Estádio	Descrição
<i>Vegetativo</i>	VE	Cotilédones acima da superfície do solo.
	VC	Cotilédones completamente abertos.
	V1	Folhas unifoliadas completamente desenvolvidas.
	V2	Primeira folha trifoliada completamente desenvolvida.
	V3	Segunda folha trifoliada completamente desenvolvida.
	Vn	Ante-enésima folha trifoliada completamente desenvolvida.
<i>Reprodutivo</i>	R1	Início do florescimento - Uma flor aberta em qualquer nó do caule.
	R2	Florescimento pleno - Uma flor aberta, em um dos 2 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida.
	R3	Início da formação da vagem - Vagem com 5 mm de comprimento, em um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida.
	R4	Vagem completamente desenvolvida - Vagem com 2 cm de comprimento, em um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida.
	R5	Início do enchimento do grão - Grão com 3 mm de comprimento em vagem, em um dos 4 últimos nós caule, com folha completamente desenvolvida.
	R6	Grão cheio ou completo - Vagem contendo grãos verdes, preenchendo as cavidades da vagem de um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida.
	R7	Início da maturação - Uma vagem normal no caule, com coloração madura.
	R8	Maturação plena - 95% das vagens com coloração de madura.

Obs: Caule significa a haste principal da planta; últimos nós se referem aos últimos nós superiores; uma folha é considerada completamente desenvolvida quando as bordas dos trifólios da folha seguinte (acima) não mais se tocam.

## 2.2 Características da Produtividade de Soja

A produtividade agrícola está diretamente ligada à variabilidade climática, sabe-se, portanto que estas variações constituem-se como um dos fatores responsáveis pela alternância de produções anuais, influenciando diretamente no balanço de produção, pois contribui com perdas ou ganhos. Segundo Saldanha (2009), as relações entre os elementos do clima e a produção agrícola constituem uma relação complexa, uma vez que os fatores do ambiente podem afetar o crescimento e o desenvolvimento da soja em suas diversas fases de cultivo. Em síntese, é possível afirmar que as condições proporcionadas pela variação dos elementos meteorológicos dependem da região, do tipo de solo, da época de semeadura e do ciclo da cultura.

A ocorrência de adversidades climáticas se constitui como o principal fator de risco e de insucesso para a cultura de soja. Tendo em vista a influência da variabilidade

climática sobre o desempenho da produtividade e com o objetivo de definir áreas menos sujeitas a riscos de insucesso ocasionado pela ocorrência de adversidades climáticas, foi constituído o zoneamento agroclimático da soja.

O zoneamento agroclimático da cultura de soja procurou delimitar as áreas com maior aptidão climática para o desenvolvimento da cultura, visando obter maiores rendimentos e menores riscos. Segundo Monteiro (2009) foram definidas as áreas com maior ou menor probabilidade de ocorrência de déficit hídrico durante as fases mais críticas da cultura, floração e enchimento de grãos, dessa maneira, caracterizando tais áreas como favoráveis, intermediárias e desfavoráveis em função das diferentes épocas de semeadura, das disponibilidades hídricas de cada região, do consumo diferenciado nos estádios de desenvolvimento, do tipo de solo e do ciclo do cultivar. Cabe ressaltar que os períodos favoráveis não indicam, necessariamente, períodos de semeadura para a obtenção dos maiores rendimentos de grãos, mas sim aqueles em que há menores probabilidades de perdas por déficit hídrico.

Segundo EMBRAPA (2006), no Estado do Rio Grande do Sul o nível de tecnologia adotado e a variabilidade climática explicam grande parte das flutuações no rendimento de grãos das culturas em diferentes safras e entre locais. O zoneamento agrícola no estado define anualmente o período de semeadura da soja para cada município, tendo como principais variáveis de definição o tipo de solo, o déficit hídrico, a insolação, a temperatura, o risco de geadas e o ciclo dos cultivares, destacando-se, ainda, que a precipitação, durante a estação de crescimento, é a principal variável meteorológica determinante de oscilações no rendimento de grãos. Na tabela 2.2 constam os possíveis períodos indicados para semeadura no Rio Grande do Sul de acordo com o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Salienta-se que segundo o zoneamento agroclimático para a soja, elaborado pelo referido órgão, existem ao todo 36 períodos indicados para a semeadura, os quais variam de janeiro a dezembro conforme a região de plantio, no Rio Grande do Sul consideram os períodos 28 a 36.

**Tabela 2.2.** Períodos indicados para a semeadura de soja no Rio Grande do Sul. Fonte: Embrapa, 2006

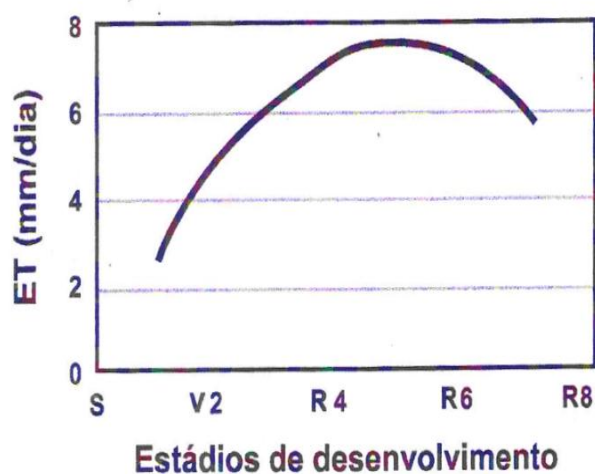
<b>Período</b>	<b>Data</b>	<b>Mês</b>
28	1° a 10	
29	11 a 20	Outubro
30	21 a 31	
31	1° a 10	
32	11 a 20	Novembro
33	21 a 30	
34	1° a 10	
35	11 a 20	Dezembro
36	21 a 31	

### 2.3 Condicionantes Agrometeorológicos da Produtividade

De todos os fatores inerentes à produção agrícola, o clima é o de mais difícil controle, sendo aquele que exerce maior ação limitante às máximas produtividades. Agrava-se a isto, a dificuldade de previsão de ocorrências climáticas adversas, principais fatores de risco e de insucesso na exploração das principais culturas. Segundo estudos da Organização das Nações Unidas para a agricultura e alimentação (*Food and agriculture organization-FAO*), tanto a taxa de crescimento, quanto o desenvolvimento do cultivo até seu estágio de maturação são afetados pelas condições meteorológicas. Conforme Monteiro (2009), dentre os elementos climáticos que mais afetam o desenvolvimento e a produtividade da soja, destacam-se a disponibilidade hídrica, a temperatura e o fotoperíodo.

No que diz respeito à disponibilidade hídrica, é possível afirmar que se constitui como um fator de grande relevância quando se trata de dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento. Monteiro (2009) afirma que durante o período de germinação-emergência tanto o excesso quanto a falta de disponibilidade de água podem ocasionar prejuízos ao estabelecimento da cultura e à obtenção de uma boa uniformidade na população das plantas, ressaltando que o excesso hídrico nesta fase é mais limitante que o déficit. A pouca disponibilidade hídrica durante a estação de crescimento constitui-se na principal limitação à expressão

potencial de rendimento da cultura, sendo esta a maior causa da variabilidade dos rendimentos de grãos observados de um ano para o outro, principalmente no sul do Brasil. Verifica-se, ainda, que a necessidade de água pela cultura de soja vai tornando-se maior conforme seu desenvolvimento, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos, consumindo cerca de 7 a 8 mm/dia, decrescendo após esse período, conforme figura 2.3. (Monteiro, 2009).



**Figura 2.3.** Evapotranspiração diária da cultura de soja, nos diferentes estádios de desenvolvimento. Fonte. Monteiro, 2009

É importante destacar que o conhecimento da evapotranspiração máxima (ET<sub>m</sub>) das plantas cultivadas, durante seus períodos de desenvolvimento e ao longo do seu ciclo, auxilia no manejo da água na agricultura irrigada e com relação aos cultivos não irrigados esta informação auxilia na adoção de práticas que permitam melhor aproveitamento das disponibilidades hídricas naturais do ambiente (Monteiro 2009). Como o consumo de água pela cultura de soja depende além do estágio de desenvolvimento, da demanda evaporativa da atmosfera, o seu valor absoluto pode variar tanto em função das condições climáticas de cada região, como em função do ano e da época de semeadura na mesma região climática. (Farias, 2001). Na tabela 2.3 estão demonstrados os valores de consumo hídrico da soja.



**Tabela 2.3.** Evapotranspiração máxima como indicativo do consumo hídrico da cultura de soja. Fonte. Farias, 2001

<b>Consumo Hídrico da Cultura de Soja</b>	
Fase Inicial	2,7 mm/dia
Floração ao início do Enchimento dos Grãos	7,5 mm/dia
Valor médio de consumo	6 mm/dia
Total para todo o ciclo	827 mm

Neste sentido, cabe ressaltar que a distribuição desuniforme da precipitação constitui-se como um fator limitante à obtenção de altos rendimentos, principalmente durante as fases mais críticas da cultura à ocorrência de déficit hídrico, ou seja, floração e enchimento de grãos, em que necessita maior demanda de água. Contudo, Monteiro (2009) destaca que o excesso de chuva pode surgir como um fator prejudicial ao cultivo, uma vez que longos períodos de encharcamento do solo, juntamente com o excesso de dias nublados e pequena demanda evaporativa da atmosfera, prejudicam a atividade fotossintética, ocasionando a redução do crescimento da planta e diminuindo a área foliar. O encharcamento e o mau arejamento do solo afetam também o crescimento das raízes, podendo causar deficiências nutricionais, favorecendo o surgimento de doenças radiculares (Monteiro 2009). Por tais razões, evidencia-se que para garantir máximo rendimento de grãos, o volume de água necessário deve ser disponibilizado ao longo de todo o ciclo, atendendo as exigências da cultura e podendo ser suprido através da chuva, da irrigação e ou do armazenamento de água pelo solo.

No que tange a variável temperatura, sabe-se que a soja adapta-se melhor às regiões onde ocorra oscilação entre 20°C e 30°C, sendo o ideal para o seu desenvolvimento uma temperatura em torno de 30°C. A soja adianta o florescimento quando ocorrem temperaturas elevadas, podendo resultar na diminuição da altura da planta e se juntamente a isto ocorrer insuficiência hídrica e ou fotoperiódica durante a fase de crescimento, resultará em agravamento do problema. A maturação também é afetada com a elevação da temperatura associada à alta umidade, interferindo negativamente na qualidade das sementes. Entretanto, baixas temperaturas associadas a períodos chuvosos ou de elevada umidade durante a fase de maturação podem provocar diversos problemas entre eles atraso na data da colheita (Monteiro, 2009).

Outra variável importante ao desenvolvimento da cultura é a radiação solar que se constitui como um componente ambiental que fornece energia luminosa para a fotossíntese ao passo que fornece sinais ambientais para uma gama de processos fisiológicos (Monteiro, 2009). A adaptação das cultivares de soja a determinadas regiões depende, além das exigências hídricas e térmicas, das exigências fotoperiódicas. O fotoperíodo influencia na indução ao florescimento na grande maioria dos cultivares, sendo modulada pela temperatura. Monteiro (2009), afirma que a sensibilidade ao fotoperíodo é uma característica variável entre cada cultivar, ou seja, cada uma possui seu fotoperíodo crítico (FC), acima do qual o florescimento é atrasado. O referido autor contribui informando que a soja é uma planta considerada de dias curtos, uma vez que seu florescimento ocorrerá mais rapidamente à medida que os dias se tornam mais curtos. Apesar das distinções entre os cultivares, a média do fotoperíodo está em torno de 13 a 14 horas.

Pelo exposto é possível verificar que o período total de tempo do ciclo vegetativo do cultivo irá variar conforme o clima, a latitude e a altitude, lembrando que esta variação também está na dependência do genótipo da planta adotada. Segundo a FAO, geralmente, uma vez alcançada completa cobertura vegetal, a taxa adicional de desenvolvimento fenológico, como floração, maturação e senescência, será mais dependente do genótipo da planta que das condições climáticas.

Com relação às trocas de CO<sub>2</sub> ocorrentes entre a cultura de soja e a atmosfera, sabe-se que constituem os fluxos de carbono e que estes apresentam uma relação com o rendimento. Isto é explicado por Durães (2002) que afirma que o conhecimento a cerca dos fluxos de CO<sub>2</sub> tem permitido elucidar as três etapas vinculadas ao processo fotossintético, que são os aspectos fotoquímicos, fotofísicos e bioquímicos de fixação do carbono. O autor reforça que a fotossíntese constitui-se como a base para o crescimento e desenvolvimento do cultivo, e a regulação deste processo pode ser um importante meio para a obtenção de maiores rendimentos na produção.

A síntese, translocação, partição e acúmulo de produtos fotoassimilados na planta são controlados geneticamente e influenciados por fatores ambientais, como: CO<sub>2</sub>, radiação, temperatura, nutrientes, disponibilidade hídrica, entre outros (Setter, 1986 *apud* Durães). Assim, o entendimento dos fluxos de CO<sub>2</sub>, bem como o conhecimento da

natureza da alocação diferencial de matéria seca durante o ciclo da planta de soja, sobretudo os fatores e processos relacionados à partição para o grão, é de fundamental importância no direcionamento do processo de melhoramento genético e do manejo para incrementar o rendimento de grãos.

## Capítulo 3

Neste capítulo, serão apresentados um breve histórico sobre modelos de superfície em geral com ênfase no modelo SiB2, as características da estrutura interna deste, bem como o seu funcionamento com foco na simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub>.

### 3. Modelos de Superfície

Os modelos de superfície são formulados para representar as interações ocorrentes no sistema solo-planta-atmosfera. Para tanto são constituídos de equações governantes que geram variáveis prognósticas, obtidas a partir de parâmetros internos ao modelo. Como objetivam a representação de uma superfície vegetada existe a necessidade de calibração desses parâmetros internos, para que estes estejam adequados ao tipo de bioma que se busca representar.

De acordo com Llopart (2009), parâmetro interno pode ser definido como uma característica do modelo que representa uma variável variante ou uma variável invariante do sistema, sendo que sistema é designado como o tipo de bioma. Desse modo, para que esse conjunto de parâmetros internos possa representar da melhor maneira possível um sistema modelado é necessário que se utilize um grande número de informações a cerca do bioma em estudo, as quais podem ser obtidas através de observações de campo ou a partir de parâmetros retirados da literatura.

O autor complementa, ainda, afirmando que a calibração de um modelo consiste em uma forma indireta de se estimar os valores dos parâmetros ajustados de forma tal

que o modelo reproduza da maneira mais realística possível o funcionamento de um ecossistema. Geralmente a calibração é aferida segundo uma medida de erro, como erro absoluto médio, o erro médio quadrático ou o erro absoluto médio percentual. Ainda, segundo o referido autor, a calibração pode decorrer de um processo manual ou um processo automático. Na calibração manual são testadas combinações de valores dos parâmetros, de maneira dependente do usuário, visando à seleção de um conjunto de parâmetros ótimos com relação à resposta do modelo. Já a calibração automática, ocorre através de métodos matemático-computacionais, podendo ser utilizado métodos determinísticos na busca da otimização dos parâmetros, satisfazendo a minimização de uma função de erro, assim, encontrando o conjunto de parâmetros que resultem no melhor desempenho do modelo. Há na literatura diversos modelos que tratam da transferência solo-planta-atmosfera como SiB e SiB2 (Sellers et al., 1986, 1996a, b), BATS (Dickinson et al., 1986), IBIS (Foley et al., 1996), SSiB (Xue et al., 1991) (Llopart, 2009). Como modelos de superfície são usados em diversos estudos que buscam a obtenção dos fluxos superficiais, como calor sensível, latente, radiação e momentum, as características da superfície passam a ser parâmetros utilizados na calibração de tais modelos, visando à simulação de fluxos mais próxima possível da realidade.

### 3.1 Modelo SiB2 ( Simple Biosphere Model)

Sellers *et al* (1986) desenvolveram um modelo biosférico simples que calcula a transferência de energia, massa e momentum entre a atmosfera e a superfície vegetada. Esta primeira versão do modelo é conhecida como *Simple Biosphere Model* (SiB) e seu objetivo principal era promover o entendimento das interações existentes entre a atmosfera e a superfície. Para tanto, basearam-se nos processos físicos de interação superfície-atmosfera que compreendiam a absorção da radiação (em que consideravam as propriedades espectrais das folhas), o controle biofísico da evapotranspiração através dos estudos morfofisiológicos das plantas, a umidade do solo e a insolação. Esta primeira versão, contava com variáveis que estabeleciam as condições de contorno atmosféricas, com parâmetros morfológicos, físicos e fisiológicos referentes ao bioma de estudo e com variáveis prognósticas.

O modelo SiB foi utilizado em diversos estudos, contudo alguns problemas foram detectados, o que levou ao aprimoramento de sua estrutura dando origem à sua segunda versão. Com relação aos problemas foi detectado que o modelo em sua primeira versão apresentava uma deficiência na formulação usada para descrever o controle biofísico da evapotranspiração. Testes obtiveram valores subestimados de evaporação, reduzindo, conseqüentemente a taxa de evapotranspiração. Verificaram, portanto, a necessidade de reformular o modelo, enfatizando a parte que utilizava a fenologia, morfologia e outros parâmetros relacionados ao processo de evapotranspiração, pois atribuíram esta deficiência observada à descrição muito empírica da fenologia da vegetação (Sellers et al, 1986).

Com o avanço do sensoriamento remoto durante a década de 1980, Sellers ET al (1996a), verificaram que as observações de satélite nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo poderiam ser combinadas gerando índices espectrais da vegetação, que contribuiriam para providenciar estimativas da fração da radiação fotossinteticamente ativa (*Fraction Photosynthetically Active Radiation-FPAR*) absorvida pela porção verde da vegetação. Este parâmetro (FPAR) foi diretamente aplicado em uma sub-rotina de condutância que descrevia as transferências de CO<sub>2</sub> e vapor d'água dentro e fora da folha, sendo que esta sub-rotina passou a integrar as melhorias que resultaram na segunda versão do SiB.

O SiB2 teve reformulada sua parametrização de superfície. As novas parametrizações incluíram a incorporação de uma sub-rotina referente à condutância e fotossíntese do dossel, bem como, o uso de imagens de satélite para descrever o estado e a fenologia da vegetação (Sellers *et al*, 1996a).

Um grande número de mudanças foram feitas da primeira (SiB) para a segunda versão (SiB2), conforme indicado por Sellers *et al* (1996a):

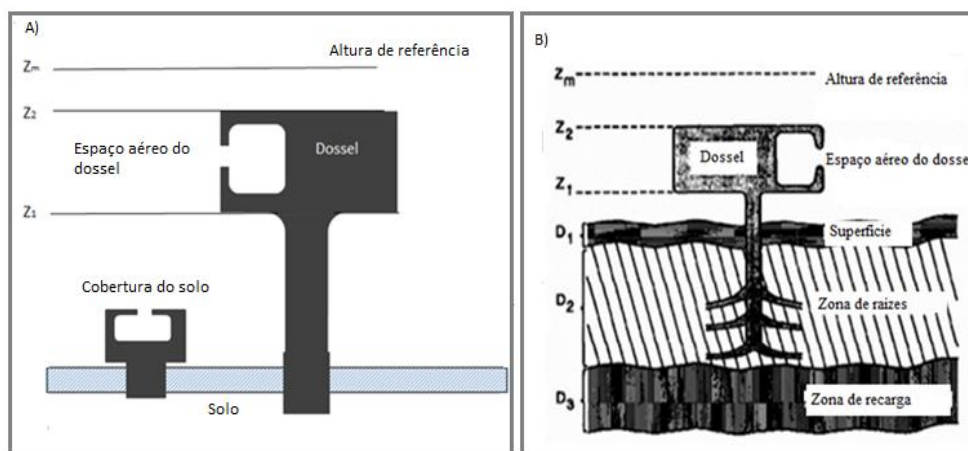
- (i) uma sub-rotina de condutância foi incorporada para descrever simultaneamente as transferências de CO<sub>2</sub> e vapor d'água dentro e fora da folha e assim calcular a fotossíntese e a transpiração ocorrentes.
- (ii) dados de satélite foram utilizados para descrição da fenologia da vegetação, os quais foram adquiridos do *Advanced Very High Resolution Radiometer*

(AVHRR), do sensor (NOAA), sendo posteriormente processados, assim, derivando séries de tempo da FPAR absorvida pelo dossel, do índice de área foliar (IAF) e da fração verde do dossel (N).

(iii) a sub-rotina hidrológica foi modificada para melhor descrever a base de fluxos e providenciar um cálculo mais confiável dentro do perfil do solo.

(iv) uma sub-rotina voltada para a descrição do derretimento de neve foi incorporada buscando evitar as rápidas transições termais que ocorrem quando a área de cobertura média de neve é baixa e está decrescendo.

Para estabelecer as mudanças descritas em (i) e (ii) a estrutura de duas camadas de vegetação usadas no SiB foram reduzidas para apenas uma única camada de vegetação no SiB2, conforme Sellers *et al* (1996a). A figura 3.1 mostra a estrutura do modelo em suas duas versões.



**Figura 3.1.** Estrutura das duas versões do modelo. (A) Estrutura da primeira versão (SiB) com duas camadas de vegetação. Adaptado de Sellers *et al* (1986). (B) Estrutura da segunda versão (SiB2) com apenas uma camada de vegetação e três camadas de solo. Fonte. Llopart (2009).

Em função da redução das camadas de vegetação a segunda versão do modelo passou a apresentar 9 tipos de vegetação, enquanto a primeira apresentava 12 tipos. Este processo de reclassificação dos tipos de vegetação integrantes do modelo foi baseado em dados de satélite, sendo que todos os nove tipos presentes no SiB2

consideram apenas uma camada, conforme Sellers *et al* (1996a), representado na figura 3.1-B. Na tabela 3.1 encontram-se discriminados os tipos de vegetação que integram as duas versões do modelo.

**Tabela 3.1.** Tipos de vegetação em cada versão do modelo. Fonte: Sellers *et al* (1996a).

SiB1		SiB2	
Tipo	Nome da vegetação	Tipo	Nome da vegetação
1	Árvores com folhas largas e sempre verdes	1	Árvores com folhas largas e sempre verdes
2	Árvores decíduais com folhas largas	2	Árvores decíduais com folhas largas
3	Árvores com folhas largas e árvores aciculifoliadas	3	Árvores com folhas largas e árvores aciculifoliadas
4	Árvores aciculifoliadas sempre verdes	4	Árvores aciculifoliadas sempre verdes
5	Árvores decíduais aciculifoliadas	5	Árvores decíduais aciculifoliadas
6	Árvores com folhas largas e solo com cobertura	6	Vegetação curta / C4 - campos
7	Solo com cobertura	7	Arbustos com folhas largas e solo descoberto
8	Arbustos com folhas largas e solo com cobertura	8	Árvores baixas e arbustos
9	Arbustos com folhas largas e solo descoberto	9	Agricultura / C3 - campos
10	Árvores baixas e arbustos		
11	Solo descoberto sem vegetação		
12	Árvores decíduais com folhas largas e trigo de inverno		

### 3.2 Estrutura do modelo

No que tange a estrutura do modelo de superfície SiB2, cabe destacar que apresenta variáveis que constituem as condições de contorno atmosféricas, parâmetros considerados variantes e invariantes com relação ao tempo, variáveis prognósticas e suas equações governantes.

#### 3.2.1 Condições de contorno atmosféricas

Com relação às condições de contorno atmosféricas, destaca-se que são utilizadas como forçantes de inicialização e podem ser provenientes dos modelos de circulação geral da atmosfera (MCGs), dos modelos regionais, das observações de campo e também obtidas a partir de dados de reanálises. São variáveis referentes ao estado físico da atmosfera e auxiliam na determinação dos fluxos de calor, massa e momentum. As variáveis que constituem as condições de contorno são: a temperatura do ar ( $T_m$ ), a pressão de vapor d'água ( $e_m$ ), a velocidade do vento ( $u_m$ ) e a precipitação ( $P$ ), bem como, os fluxos de radiação incidente ( $F_{\Lambda,\mu}$ ): visível (direto e difuso), infravermelho próximo (direto e difuso) e infravermelho termal (somente difuso) Sellers *et al* (1996a).



### 3.2.2 Parâmetros variantes e invariantes com o tempo

A respeito dos parâmetros que podem variar e também daqueles que não variam com o tempo, Llopart (2009) afirma que são constituídos pelas classes da vegetação e do solo utilizados dentro do modelo SiB2. Nesse sentido, cabe destacar que os parâmetros que variam com o tempo relacionam-se à fenologia ou às variações sazonais ou de alteração temporal da vegetação que podem ser explorados com dados de satélite. Já os parâmetros invariantes no tempo estão relacionados às propriedades morfológicas, ópticas e fisiológicas da vegetação. Na tabela 3.2, encontram-se sumarizados os parâmetros variantes e os parâmetros invariantes com o tempo relacionados tanto à vegetação quanto ao solo. Sellers *et al* (1996a)

**Tabela 3.2.** Conjunto de parâmetros do modelo SiB2. Fonte: Sellers *et al* (1996a).

<i>Símbolo</i>	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
<b>Parâmetros invariantes com o tempo</b>		
<i>(a) Propriedades morfológicas</i>		
$Z_2$	Altura do topo do dossel	m
$Z_1$	Altura da base do dossel	m
$Z_c$	Altura de inflexão IAF	m
$Z_s$	Comprimento de rugosidade do chão	m
$V_c$	Fração de cobertura do dossel	-
$X_L$	Fator de distribuição angular	-
$G_1, G_4$	Coefficientes de transferência de momentum	-
$l_w$	Largura da folha	m
$D_1$	Espessura da camada superficial do solo	m
$D_r$	Espessura da camada das raízes ( $D_1+D_2$ )	m
$D_t$	Espessura da camada de drenagem ( $D_1+D_2+D_3$ )	m
<i>(b) Propriedades óticas</i>		
$\alpha_{v,l}$	Reflectância da folha, VIS, viva	-
$\alpha_{v,d}$	Reflectância da folha, VIS, morta	-
$\alpha_{N,l}$	Reflectância da folha, NIR, viva	-
$\alpha_{N,d}$	Reflectância da folha, NIR, morta	-
$\delta_{v,l}$	Transmitância da folha, VIS, viva	-
$\delta_{v,d}$	Transmitância da folha, VIS, morta	-
$\delta_{N,l}$	Transmitância da folha, NIR, viva	-
$\delta_{N,d}$	Transmitância da folha, NIR, morta	-
$a_{Sv}$	Reflectância do solo, VIS	-
$a_{Sn}$	Reflectância do solo, NIR	-
<i>(c) Propriedades fisiológicas</i>		
$V_{max0}$	Máxima capacidade RuBisCo	$\text{mol m}^{-2}$
$\epsilon$	Eficiência quantum intrínseca	$\text{mol m}^{-1}$
$m$	Coefficiente angular estomático	-
$B$	Condutância estomática mínima	$\text{mol m}^{-2}\text{s}$
$\beta_{ce}$	Coefficiente de acoplamento da fotossíntese	-
$S_2$	Fator de estresse, alta temperatura	K
$S_4$	Fator de estresse, baixa temperatura	K
<i>(d) Propriedades físicas do solo</i>		
$\psi_s$	Potencial de umidade do solo saturado	m
$\theta_s$	Porosidade do solo na saturação	$\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$
$B$	Parâmetro de potencial de umidade do solo	-
$K_s$	Condutividade hidráulica do solo saturado	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

**Tabela 3.2.** Conjunto de parâmetros do modelo SiB2. Fonte: Sellers *et al* (1996a)

<i>Símbolo</i>	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
<b>Parâmetros variantes com o tempo</b>		
N	Fração de folhas verdes do dossel	-
IAF	Índice de área foliar	m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup>
z <sub>0</sub>	Comprimento de rugosidade	m
FPAR	Fração da radiação incidente absorvida	-
d	Deslocamento do plano zero	m
C <sub>1</sub>	Coefficiente da resistência r <sub>b</sub>	(s.m <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>
C <sub>2</sub>	Coefficiente da resistência r <sub>d</sub>	-

### 3.2.3 Propriedades físicas do solo

De acordo com Sellers *et al* (1996a), para a definição das propriedades físicas do solo utilizadas no SiB2, foi feita a combinação de um mapa global dos tipos de solo elaborado pela FAO com uma tabela de propriedades físicas do solo. Esta combinação resultou nos parâmetros físicos do solo, adotados pelo modelo, os quais se encontram listados na tabela 3.2. Convém destacar que tanto as propriedades ópticas do solo, quanto à profundidade das camadas do solo foram definidas como função do tipo de vegetação (Sellers *et al*, 1996a).

### 3.2.4 Variáveis prognósticas

O SiB2 apresenta um total de 11 variáveis prognósticas. Três referem-se à temperatura: temperatura do dossel (T<sub>c</sub>), temperatura da superfície do solo (T<sub>g</sub>), temperatura do solo em profundidade (T<sub>d</sub>). Duas referem-se ao armazenamento de água por interceptação, sendo uma por interceptação do dossel (M<sub>cw</sub>) e outra por interceptação da superfície do solo (M<sub>gw</sub>). Também existem variáveis que tratam da interceptação de gelo e neve pelo dossel (M<sub>cs</sub>) e pela superfície do solo (M<sub>gs</sub>). Outras três relacionam-se ao grau de saturação de umidade em cada camada do solo (W<sub>1</sub>, W<sub>2</sub> e W<sub>3</sub>). Por fim uma variável prognóstica sobre o valor de condutância de superfície (g<sub>c</sub>). Sellers *et al* (1996a)

Quando se trata das variáveis referentes ao armazenamento de água pelo dossel e pelo solo, considera-se, juntamente a estas, outra variável que é a evapotranspiração, considerando-se tanto o dossel quanto o solo. Com relação à evapotranspiração que trata do dossel ( $E_c$ ), pode-se afirmar que está dividida em duas componentes, a primeira refere-se à evaporação de água interceptada pelo dossel ( $E_{ci}$ ) e a segunda à transpiração da água do solo extraída pelo sistema radicular ( $E_{ct}$ ). De modo semelhante, tem-se a evaporação da superfície do solo ( $E_g$ ) que se constitui na soma da perda de água pela superfície ( $E_{gj}$ ) com a perda de água por evaporação de dentro da camada superior do solo ( $E_{gs}$ ). (Llopart, 2009)

Em síntese, pode-se dizer que o modelo SiB2 apresenta em sua estrutura variáveis que tratam do comportamento físico da atmosfera, denominadas como condições de contorno atmosféricas, as quais são utilizadas na inicialização do modelo, ou seja, são elas que fornecem as condições iniciais para os processos de simulação. Têm-se, ainda, as variáveis que se referem às propriedades morfológicas, fisiológicas, ópticas da vegetação e do solo, bem como as propriedades físicas do solo, sendo estas responsáveis por governar a interceptação da radiação e a transferência de umidade ocorrente no sistema solo-planta e finalmente, têm-se as variáveis prognósticas utilizadas nas equações do modelo. Resumidamente, o SiB2 funciona de maneira tal que, dadas as condições iniciais das variáveis prognósticas ( $T_c, T_g, T_d, M_{cw}, M_{gw}, M_{cs}, M_{gs}, D_1, D_r, D_t$  e  $g_c$ ), as condições de contorno atmosféricas ( $T_m, e_m, u_m, P$  e  $F_{\Lambda, \mu}$ ) e os parâmetros do bioma, então o modelo calcula os fluxos de energia, massa e momentum na camada de superfície da atmosfera (Llopart, 2009). Na figura 3.2 é apresentado um diagrama de modelagem que representa a estrutura de funcionamento do modelo.

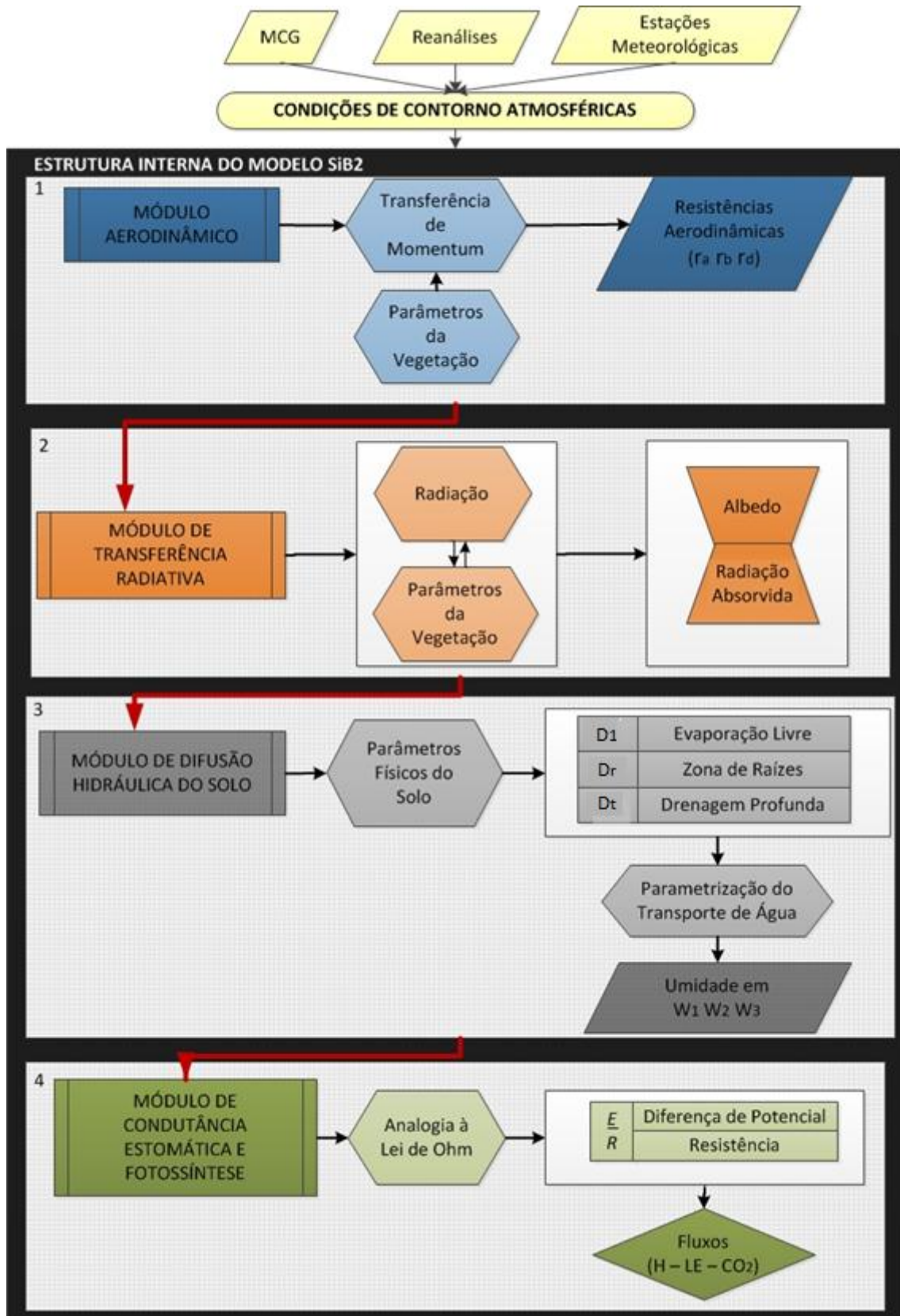
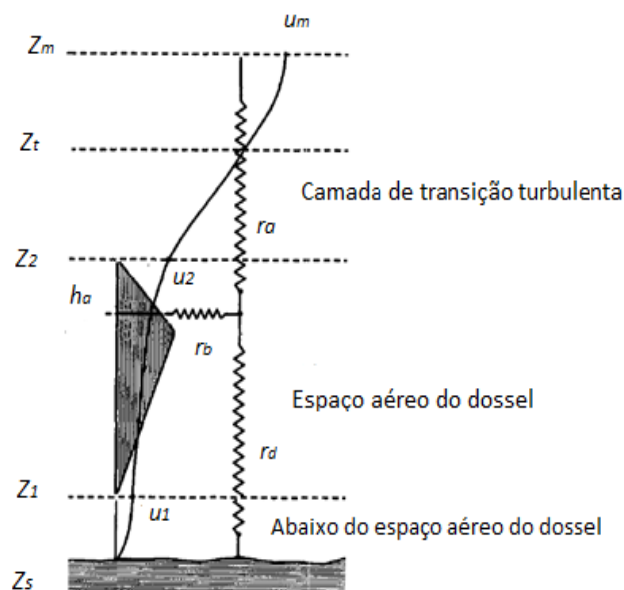


Figura 3.2. Diagrama de modelagem do SiB2. Adaptado de Sellers *et al* (1996a)

Segundo Llopart (2009), o modelo realiza seus cálculos seguindo uma hierarquia conforme seus módulos ou sub-rotinas, respeitando a seguinte sequência: módulo aerodinâmico, módulo de transferência radiativa, módulo de difusão hidráulica do solo e módulo de condutância estomática e fotossíntese. Em análise ao diagrama de modelagem, verifica-se que a inicialização do modelo é realizada a partir de dados meteorológicos que estabelecerão o estado físico da atmosfera. Estas condições de contorno poderão ser provenientes de diversas fontes de dados, entre estas fontes têm-se os modelos de circulação geral da atmosfera (MCG), os dados de reanálise gerados por diversos órgãos de pesquisa meteorológica, como NOAA e as estações meteorológicas, que constituem dados diretamente observados e que também podem ser utilizados como parâmetros para avaliação do desempenho dos modelos.

Em primeiro plano na estrutura interna do modelo, tem-se o módulo aerodinâmico, onde a transferência de momentum utilizará os parâmetros da vegetação para descrever as trocas ocorrentes com a atmosfera, dentro e acima do dossel da vegetação, em trajetórias onde serão definidas as resistências aerodinâmicas ( $r_a$ ,  $r_b$ ,  $r_d$ ). Estas resistências estão associadas à transferência turbulenta de umidade e calor, desse modo,  $r_a$  é definida como a resistência ocorrente entre o nível no espaço de ar do dossel ( $h_a$ ) e um nível de referência ( $Z_t$ );  $r_b$  é definida entre todas as folhas do dossel e o espaço de ar interior a ele e  $r_d$  é definida entre a superfície do solo ( $Z_s$ ) até o espaço de ar o dossel (Llopart, 2009). Conforme demonstrado na figura 3.3.



**Figura 3.3.** Resistências aerodinâmicas. Adaptado de Llopart, 2009.

Onde ( $Z_s$ ) é a superfície do solo, ( $Z_1$ ) é a altura da base do dossel, ( $Z_2$ ) é a altura máxima do dossel, ( $Z_t$ ) é um nível de referência e ( $Z_m$ ) é o nível de altitude máximo acima do dossel; ( $h_a$ ) espaço de ar no dossel; ( $u_1$ ) equivale a componente zonal do vento em  $Z_1$ , ( $u_2$ ) componente zonal do vento em  $Z_2$  e ( $u_m$ ) componente zonal do vento em ( $Z_m$ ).

O módulo seguinte trata da transferência radiativa, sub-rotina responsável pela obtenção da estimativa de albedo e também da radiação absorvida nas camadas de superfície para os diversos padrões de vegetação. Tem-se, portanto, que as estimativas destes parâmetros dependerão da intensidade e dos diferentes comprimentos de onda da radiação solar incidente, bem como da interação radiativa com os elementos do dossel. Os parâmetros deste módulo estão relacionados às propriedades ópticas da folha (Sellers *et al*, 1996a).

O terceiro módulo diz respeito à difusão hidráulica do solo, onde a parametrização do transporte de água no solo calcula o fluxo de umidade neste ambiente. O esquema utilizado é discretizado em múltiplas camadas no solo com

parâmetros físicos homogêneos por camada, onde a camada superficial fornece água para a evaporação livre; na segunda camada definem-se as camadas de raízes em que ocorre extração de água para a transpiração e por fim a última camada, que trata da drenagem profunda, estimando o escoamento sub-superficial. Ressalta-se que o sistema radicular depende do tipo de vegetação e de características do solo. (Llopart, 2009).

O último módulo trata da fotossíntese e condutância estomática. É nesta sub-rotina que se realiza o cálculo da condutância estomática ( $g_c$ ) e da assimilação de  $CO_2$  ( $A_{n,c}$ ), os quais são obtidos a partir de relações na escala da folha associadas ao topo do dossel, com a utilização de forçantes climáticas como irradiância de PAR incidente no topo do dossel. Logo, a partir da determinação de  $g_c$  e de  $A_{n,c}$ , obtém-se a taxa efetiva de fotossíntese, a qual é atenuada pelos fatores de estresse de temperatura e de umidade do solo (Llopart, 2009).

Em síntese, verifica-se que o SiB2 utiliza a sequência de módulos para determinar uma série de variáveis prognósticas. Sellers *et al*, (1996a), afirmam que os processamentos ocorrentes em cada sub-rotina é fundamental para a obtenção dos fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e de  $CO_2$ , uma vez que tais fluxos são funções explícitas das condições de contorno atmosféricas, das variáveis prognósticas e das resistências aerodinâmicas e de superfície. De acordo com Llopart (2009), as trocas de calor, água e  $CO_2$  calculados pelo modelo são: fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e fluxo de  $CO_2$ . Destaca-se o fluxo de  $CO_2$ , que é obtido da seguinte maneira:

$$NEE = A_{n,c} - R_s - R_d$$

**Equação 3.1**

Onde NEE (*net ecosystem Exchange*) equivale ao fluxo total de  $CO_2$  no sistema, ( $A_{n,c}$ ) é a assimilação de  $CO_2$ , ( $R_s$ ) é a respiração do solo e ( $R_d$ ) é a respiração do dossel, sendo que ( $A_{n,c}$ ) é função explícita das condições de contorno atmosféricas, das variáveis prognósticas, das resistências aerodinâmicas e das resistências de superfície referentes ao dossel e ao solo (Llopart, 2009).

Em análise última, verifica-se que o conjunto de variáveis adotadas pelo modelo, seja àquelas referentes às condições de contorno atmosféricas, seja as que se referem ao



tipo de bioma em estudo e ainda às variáveis prognósticas, são imprescindíveis à obtenção dos fluxos de calor, massa e momentum que representam as interações ocorrentes entre a superfície e a atmosfera.

## Capítulo 4

Neste capítulo encontram-se definidos a metodologia adotada nesta pesquisa, os dados utilizados e a descrição do sítio experimental.

### 4. Material e métodos

A metodologia desta pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira é constituída pelo processo de calibração, em que foram realizados estudos teóricos sobre a cultura de soja no Estado do Rio Grande do Sul e estudos sobre o modelo de superfície SiB2. Com relação à soja, buscou-se o conhecimento a cerca do histórico deste cultivo, bem como o entendimento da fisiologia e morfologia da soja, conforme descrito no segundo capítulo. Com respeito ao modelo o estudo foi voltado à compreensão de sua estrutura interna e a dinâmica de seu funcionamento que se encontram expressos no terceiro capítulo.

Em seguida realizou-se o processo de calibração dos parâmetros utilizados na simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub>. Ressalta-se que para a calibração, as variáveis adotadas na inicialização do modelo e que definiram as condições de contorno atmosféricas, foram obtidas experimentalmente por uma estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e conforme as variáveis eram testadas, realizavam-se simulações dos referidos fluxos possibilitando, assim a avaliação do processo.

Em um terceiro momento efetuou-se a análise estatística dos parâmetros calibrados em comparação com dados observados obtidos a partir de uma torre micrometeorológica. Para esta análise foi utilizado o Coeficiente de Nash e Sutcliffe, que

mede o grau de associação entre valores experimentais (observados) e os simulados (calculados), desta forma analisando o comportamento dos dados simulados após a calibração dos parâmetros.

Findado os processos referentes à calibração do modelo, passou-se à segunda etapa que tratou das questões envolvendo os dados de reanálise no que tange sua obtenção e preparação e também sua avaliação. Esta etapa teve início com a aquisição dos dados de reanálises CFSR, obtidos junto ao NCEP. Contudo, para sua utilização no SiB2 foi necessária a preparação de suas variáveis em um formato aceitável pelo modelo. Após sua preparação, adotou-se estes dados na inicialização do modelo já calibrado para a geração dos fluxos de CO<sub>2</sub>.

Por fim, desenvolveu-se a análise dos resultados obtidos (fluxos de CO<sub>2</sub>) a partir da inicialização do modelo SiB2 com dados de reanálise CFSR. Para esta análise final foi novamente utilizado o Coeficiente de Nash e Sutcliffe na comparação dos dados simulados com relação aos dados experimentais, a fim de verificar se os dados de reanálise adotados podem ser utilizados em regiões que sofrem carência de dados meteorológicos e também em estudos climáticos destes fluxos. A figura 4.1 ilustra o desenvolvimento desta metodologia através de fluxograma.

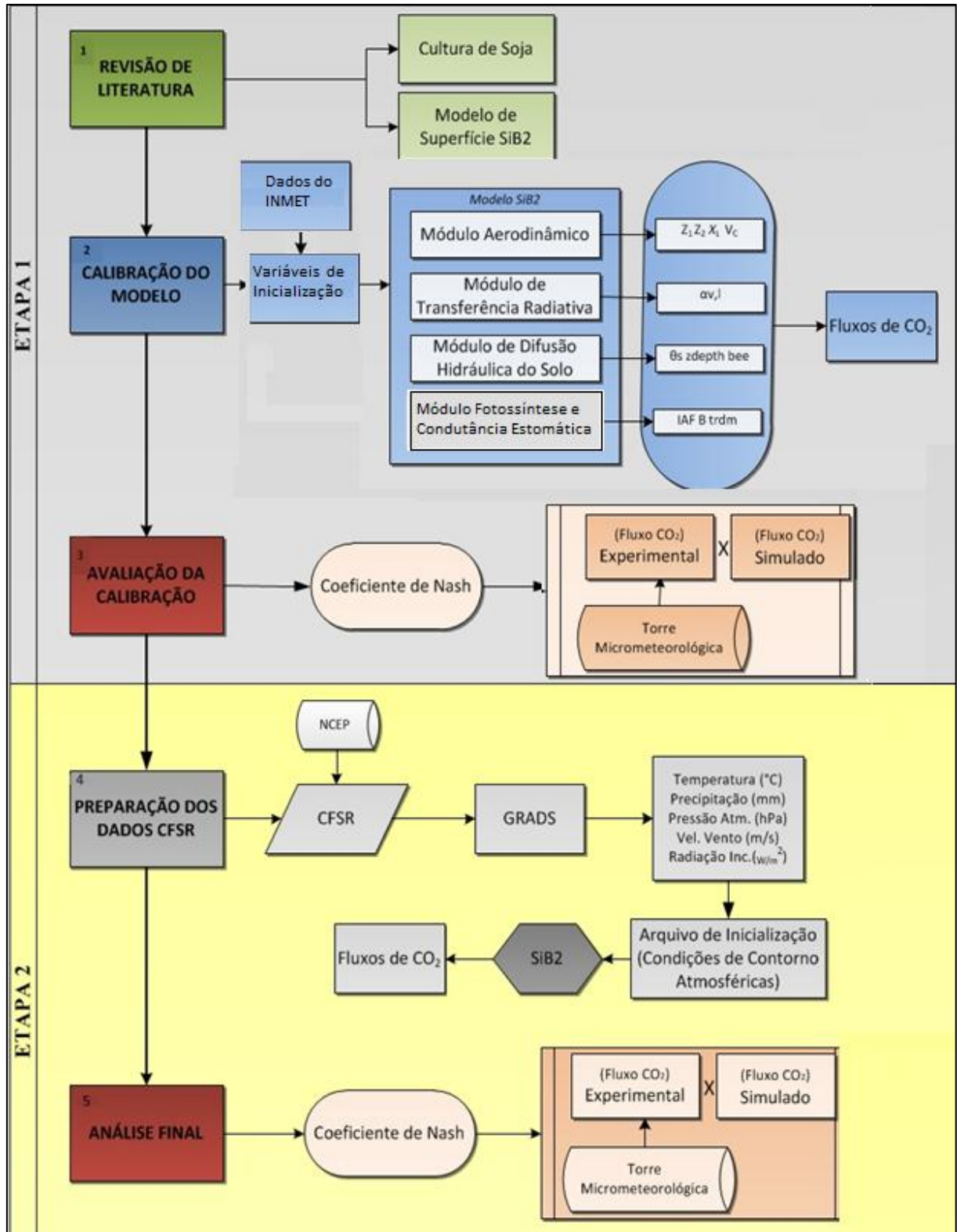


Figura 4.1. Fluxograma referente às etapas metodológicas

#### **4.1 Sítio Experimental de Cruz Alta-RS**

O estudo foi desenvolvido em uma área experimental agrícola pertencente à Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigro (FUNDACEP). Este sítio experimental está localizado no município de Cruz Alta (28°36'S e 53°40'W) e nele é conduzido um experimento de longa duração, desde 1985, efetuando-se a avaliação de dois sistemas de manejo do solo. Um trata do sistema convencional de manejo (SC), enquanto o outro trata do sistema de plantio direto (SD). Com relação ao plantio direto, desde 2008 ocorre o monitoramento das trocas de energia, água e CO<sub>2</sub> por meio de uma torre micrometeorológica pertencente ao projeto Rede Sul-brasileira de Fluxos Superficiais (SULFLUX), instalada sobre o cultivo. Em novembro de 2009 uma nova torre foi instalada sobre o cultivo no sistema convencional. (Webler, 2011). Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os dados pertencentes à torre micrometeorológica localizada no sistema de plantio direto, optando-se por trabalhar com o ano-safra de 2008/2009. O plantio da soja neste ano-safra foi realizado em 28 de novembro de 2008 e sua colheita em 15 de abril de 2009.

Com relação às características climáticas, a área de estudo está sob domínio climático subtropical úmido com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, podendo ocorrer períodos de estiagem em determinados anos. A precipitação acumulada anual é de 1630,7 mm, a temperatura média anual de 18,5°C e a direção do vento é predominante de sudeste (SE), de acordo com a normal climatológica (1961-1990) disponibilizada pelo 8º Distrito de Meteorologia - INMET para o município de Cruz Alta. Na figura 4.2 visualiza-se a localização geográfica e vista aérea do sítio experimental.

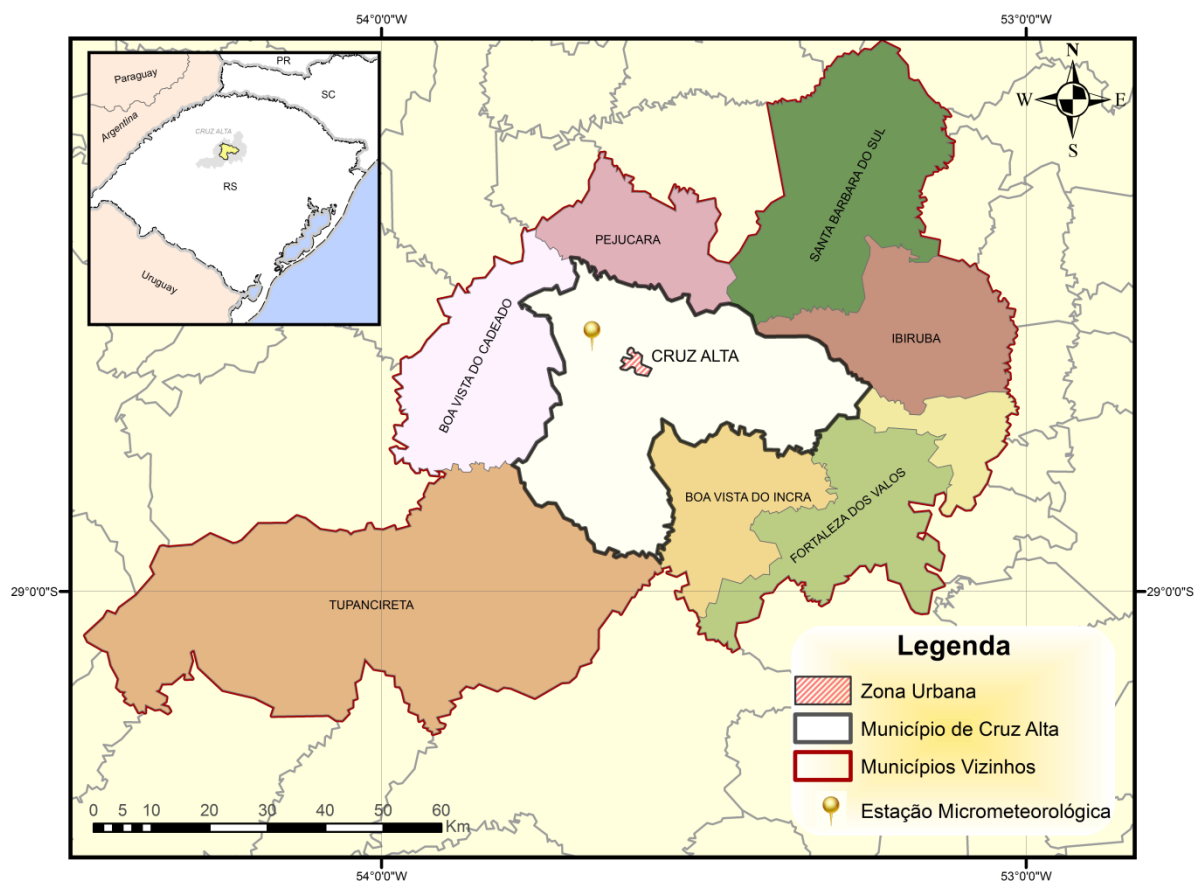


Figura 4.2. Localização da área de estudo.

## 4.2 Dados Experimentais

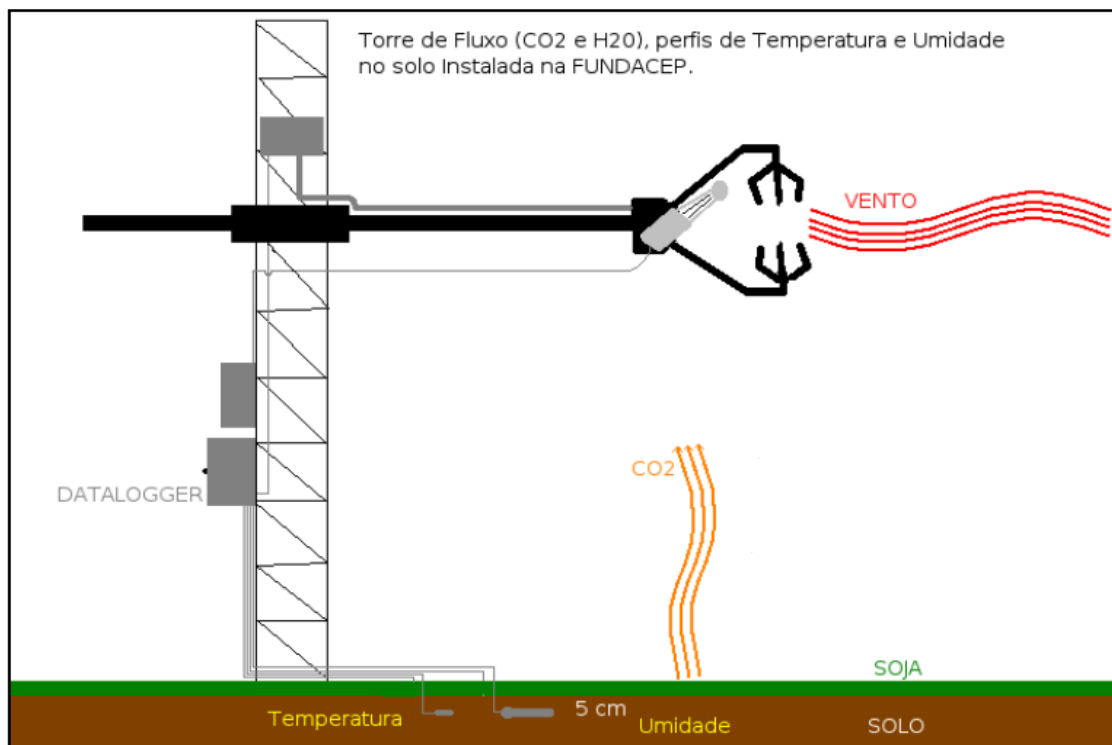
### 4.2.1 Torre Micrometeorológica

Estudos microclimáticos fornecem subsídios na busca da compreensão a cerca das trocas de  $\text{CO}_2$  e vapor d'água, bem como, das trocas de energia ocorrentes entre a superfície e a atmosfera. Diante desta realidade para que se possa efetuar a análise do comportamento do  $\text{CO}_2$  sobre uma lavoura soja, adotou-se a metodologia que se baseia em medições realizadas por uma torre micrometeorológica que calcula as trocas gasosas na interface superfície-atmosfera, considerando o ecossistema como um todo.

Os fluxos de  $\text{CO}_2$  experimental foram obtidos por uma torre micrometeorológica localizada sobre o sistema de plantio direto, a qual forneceu dados em períodos de 30 minutos. Contudo, para que posteriormente pudessem ser utilizados na comparação

com os valores simulados, foi necessário adotar os valores experimentais referentes à hora cheia, assim comparando-se dados horários simulados com os referentes dados horários observados. Os dados experimentais podem apresentar falhas ocasionadas por falta de energia, falha humana ou problemas nos sensores. Em razão deste problema, para a validação dos fluxos simulados adotou-se o período de 05 a 17 de fevereiro de 2009, que totaliza 288 horas, apresentando falhas em apenas 9 horas, as quais estão distribuídas ao longo de diversos dias dentro do citado período.

Os fluxos experimentais de CO<sub>2</sub> são obtidos utilizando o Método *Eddy-Covariance*, utiliza sensores específicos de medição. O referido método utiliza uma frequência de medições da velocidade vertical do vento juntamente com medições da concentração do dióxido de carbono sobre um ponto acima da superfície. Para a medição da concentração de CO<sub>2</sub> a torre conta com um analisador de gás de circuito aberto (Li-Cor LI7500). Para a medição da velocidade do vento é utilizado um anemômetro sônico (3m; Campbell Scientific - CSAT 3), que consiste em uma sonda eletrônica que obtém medidas de velocidade do vento na componente zonal (u), componente meridional (v) e componente vertical (w) (Webler, 2011). A figura 4.3 ilustra o funcionamento de um torre micrometeorológica quando da obtenção de fluxos de CO<sub>2</sub>.



**Figura 4.3.** Esquema de funcionamento de uma torre micrometeorológica. Fonte: Escobar (2008).

#### 4.3.2 Estação meteorológica

Há aproximadamente 200 metros da torre micrometeorológica existe uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esta estação forneceu os dados utilizados para suprir as condições de contorno atmosférica, necessárias à inicialização do modelo SiB2 durante o procedimento de calibração deste. Os dados meteorológicos utilizados para a inicialização do modelo foram: velocidade do vento (m/s), temperatura do ar (°C), precipitação (mm), pressão atmosférica (hPa) e radiação global (kJ/m<sup>2</sup>).

#### 4.2.3 Preparação dos dados de reanálise (CFSR) adotados como condições de contorno atmosféricas

Reanálises são dados que provém de uma climatologia desenvolvida por centros meteorológicos. De acordo com Quadro et al (2010) um sistema de reanálise consiste da combinação de um modelo de previsão e um sistema de assimilação de dados. O CFS



(*Climate Forecast System*) do NCEP (*National Center for Environmental Prediction*) foi desenvolvido para simular a condição do domínio acoplado do sistema oceano-atmosfera-terra e gelo da superfície do mar com alta resolução. No CFS o modelo atmosférico global tem uma resolução de aproximadamente 38 km com 64 níveis verticais, e o modelo oceânico possui espaçamento latitudinal de 0,25° próximo ao Equador e até 0,5° próximo aos trópicos, com 40 níveis de profundidade de 4737 m.

A reanálise CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) foi desenvolvida pelo NCEP, interagindo um sistema de assimilação de dados com o modelo global CFS. Segundo Saha et al, (2010), os dados utilizados na obtenção do CFSR, provém de diversas fontes, entre estas estão: radiossonda, observações de superfície através de equipamentos e sensores, micro-ondas, imagens de satélite, entre outros. O CFSR foi obtido através da interação do sistema de dados no modelo global ao longo de seis períodos simultâneos de análise (Dez/1978 a Dez/1986 - Nov/1985 a Dez/1989 - Jan/1989 a Dez/1994 - Jan/1994 a Mar/1999 - Abr/1998 a Mar/ 2005 - Abr/2004 a Dez/2009). A execução dos referidos períodos, permitiu que o NCEP implementasse esta climatologia de reanálise para o período total de 30 anos (1979 a 2009) (Saha et al, 2010).

Esta reanálise foi executada com alta resolução, acoplando dados do sistema oceano-atmosfera-terra e gelo da superfície do mar, fornecendo a melhor estimativa destes domínios ao longo do período referenciado. Estes dados podem ser utilizados em uma série de propósitos, como o fornecimento de base para os produtos do próprio NCEP, definindo o estado da atmosfera, da superfície terrestre, dos oceanos sobre o clima de 30 anos, fornecendo também as condições iniciais para as previsões históricas, necessárias à calibração operacional das previsões climáticas do NCEP (Saha et al, 2010)

Além destes propósitos, os dados CFSR podem ser utilizados como condições de contorno, gerando assim o estado físico da atmosfera, considerado como condição inicial para execução de diversos modelos, entre eles o modelo de superfície SiB2. Considerando suas características, optou-se por adotar esta reanálise de nova geração no fornecimento dos dados utilizados como forçantes de inicialização do SiB2, a fim de verificar o comportamento dos fluxos de CO<sub>2</sub> gerados por este modelo. Esta análise

possibilitará a avaliação desta fonte de dados, com vistas a sua aplicação futura em estudos climatológicos destes fluxos.

Conforme visto, os produtos de reanálise destinaram-se a suprir às condições de contorno atmosféricas, para tanto, utilizou-se as variáveis de precipitação, pressão atmosférica ao nível do mar, radiação incidente de onda curta, temperatura de superfície e vento de superfície. Estas variáveis foram disponibilizadas em uma série temporal de dados horários, com resolução de 0,5° de latitude e 0,5° de longitude. Os dados foram obtidos acessando o NCDC NOMADS (*National Climate Data Center - National Operational Model Archive & Distribution System*), através do endereço eletrônico [ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/CFSR/HP\\_time\\_series](ftp://nomads.ncdc.noaa.gov/CFSR/HP_time_series).

A preparação da reanálise foi realizada em três etapas. A primeira consistiu-se na aquisição dos dados, a segunda destinou-se a obtenção destes para a coordenada específica do sítio experimental e a terceira etapa voltou-se à preparação das variáveis em um arquivo utilizado na inicialização do modelo.

Os dados do CFSR são facilmente acessados através do endereço citado, sendo disponibilizados para toda a superfície do globo. Para agilizar o processo de aquisição, foi utilizado o programa Filezilla, destinado à transferência de arquivos por protocolo, neste caso FTP, sendo apenas necessária a conexão ao servidor (NCDC NOMADS).

Findada a etapa de obtenção dos dados, realizou-se a extração dos mesmos para a coordenada do sítio experimental. Isto foi necessário uma vez que o SiB2 é um modelo pontual, ou seja, realiza as simulações para um determinado ponto da superfície. Para esta etapa utilizou-se o software GRADS (*Grid Analysis and Display System*), considerado uma ferramenta utilizada para facilitar o acesso, a manipulação e a visualização de alguns tipos de arquivos de dados no formato binário, GRIB (caso do CFSR), HDF, entre outros. Para este procedimento elaborou-se um *script*, cuja execução possibilitava que o programa realizasse a extração dos dados de dentro de um arquivo em formato GRIB2. Este procedimento permitiu a obtenção individual de arquivos em formato ASCII (txt) contendo, em cada um, uma variável de reanálise.

Finalmente a terceira etapa tratou da montagem do arquivo final, em formato ASCII, o qual é aceito pelo modelo. Neste arquivo foram agrupadas as variáveis de vento,

temperatura, precipitação, radiação e pressão, desse modo, dando origem ao arquivo utilizado como condição inicial para as simulações executadas pelo SiB2.

### **4.3 Calibração dos parâmetros do modelo SiB2**

O SiB2 é um modelo que permite verificar as interações ocorrentes entre a superfície e a atmosfera, baseando-se nos processos físicos que se incidem neste espaço. Contudo, para que a obtenção dos fluxos superficiais seja possível, o modelo requer que sejam descritas as propriedades físicas, fisiológicas e morfológicas da superfície, supostas em uma representação média da vegetação e do solo na área de estudo (Llopart, 2009). Entretanto, para que se alcance uma representação mais fidedigna da realidade observada, faz-se necessária a calibração dos parâmetros utilizados na geração dos fluxos.

Quando se trata da calibração dos parâmetros adotados pelo modelo, sabe-se que esta pode ser efetuada segundo um método automático, em que se utiliza algum método matemático-computacional que busca a otimização dos parâmetros em uma única vez, ou a calibração pode ser efetuada com base em um método manual em que os parâmetros são testados um a um, de modo inteiramente dependente do usuário. Llopart (2009), afirma que as vantagens em utilizar o método manual é a melhoria individual de cada parâmetro, permitindo identificar a influência de cada um destes na estimativa dos fluxos, enquanto o método automático em geral por otimizar todos de uma única vez, dificulta a compreensão de sua influência na estimativa dos fluxos.

Por esta razão, na presente pesquisa optou-se pela utilização do método manual na calibração dos parâmetros adotados pelo modelo, assim obtendo-se maior controle sobre cada um durante o processo. Optou-se também por realizar esta calibração manual em módulos sequenciais, ou seja, o procedimento de calibração dos parâmetros foi sendo realizado separadamente para cada módulo ou sub-rotina, seguindo a hierarquia pela qual o modelo SiB2 realiza os cálculos. Desse modo, destaca-se que a sequência de calibração ocorreu da seguinte maneira:

- (i) Módulo Aerodinâmico
- (ii) Módulo de Transferência Radiativa

- (iii) Módulo de Difusão Hidráulica do Solo
- (iv) Módulo de Fotossíntese e Condutância Estomática

As vantagens em utilizar a calibração manual em módulos sequenciais, está na melhoria individual de cada parâmetro conforme a sub-rotina a qual pertence. Ressalta-se que nesta etapa adotaram-se as variáveis meteorológicas fornecidas pela estação do INMET, conforme citado no item 4.3.2 deste estudo.

#### 4.3.1 Módulo Aerodinâmico

No módulo aerodinâmico ocorre a descrição das trocas ocorrentes com a atmosfera, dentro e acima do dossel da vegetação. Para que estas trocas sejam possíveis de descrever são definidas as resistências aerodinâmicas, a partir dos parâmetros da vegetação. Este módulo, portanto, é constituído pelos parâmetros morfológicos da vegetação, invariantes com o tempo.

Para o procedimento de calibração do módulo aerodinâmico foram variados os valores de quatro parâmetros morfológicos, sendo eles: altura do dossel ( $Z_2$ ), altura da base do dossel ( $Z_1$ ), fator de distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ) e fração de cobertura do dossel ( $V$ ). Os demais parâmetros foram mantidos constantes e prescritos de acordo com Sellers et al (1989). A sensibilidade do modelo às combinações foi analisada com base em uma função objetivo dada pelo Coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS), conforme equação a seguir.

$$NS = 1 - \frac{\sum (CO_{2\text{exp}}(t) - CO_{2\text{sim}}(t))^2}{\sum (CO_{2\text{exp}}(t) - \overline{CO_{2\text{exp}}})^2} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde  $CO_{2\text{exp}}(t)$  é o fluxo de  $CO_2$  observado no tempo  $t$ , enquanto  $CO_{2\text{sim}}(t)$  é o fluxo de  $CO_2$  calculado no tempo  $t$ .

O Coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS) pode variar de menos infinito a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste entre o fluxo calculado e o observado. Valores maiores que 0,75 sinalizam um bom ajuste do modelo (Krysanova et al, 1998). De

acordo com Collicshon (2001), o desempenho de um modelo pode ser considerado adequado e bom se o valor de NS superar 0,75 e considerado aceitável se o valor de NS ficar entre 0,36 e 0,75. Salienta-se que este coeficiente também foi adotado na avaliação da calibração dos parâmetros para os demais módulos.

Para encontrar o conjunto de parâmetros que resultasse no melhor valor para a medida de desempenho, variaram-se os valores da altura do dossel ( $Z_2$ ), da altura da base do dossel ( $Z_1$ ), da fração de cobertura do dossel ( $V$ ) e do fator de distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ).

Todos os parâmetros foram testados de forma que NS fosse máximo. A variação destes parâmetros ocorreu da seguinte maneira: primeiramente foram testados os valores de  $Z_1$  e  $Z_2$ , que foram variados de 0,15m a 0,99m (para  $Z_1$ ) e 1,0m a 1,2m (para  $Z_2$ ), ambos os intervalos foram determinados a partir de observações de campo no sítio experimental<sup>1</sup>, considerando-se também os valores indicados pela literatura em Sellers *et al* (1996b). Fixado os valores dos referidos parâmetros, testou-se os valores de  $V$  que foi variado de 0,7 a 0,9 conforme Sellers *et al* (1996b). Por fim realizou-se o teste nos valores de  $X_L$  que foram variados de 0,2 a 0,7, conforme indicado pelas observações de campo e pela literatura citada anteriormente. Salienta-se que a exceção dos parâmetros relacionados com a altura do dossel, que foram testados simultaneamente, os demais foram testados somente após fixar-se o parâmetro anterior no melhor valor conforme indicativo do Coeficiente de Nash e Sutcliffe.

#### 4.3.2 Módulo de Transferência Radiativa

O módulo de transferência radiativa é responsável pela obtenção da estimativa de albedo e também da radiação absorvida nas camadas de superfície. No que tange a interação da radiação com a superfície, sabe-se que ao atingi-la a radiação pode ser refletida, absorvida ou transmitida, sendo que a soma destes três processos resulta na radiação incidente. Neste módulo, superfície pode ser uma folha ou o solo, sendo assim, seus parâmetros estão relacionados às propriedades ópticas da folha e do solo.

---

<sup>1</sup> As observações de campo realizadas no sítio experimental e citadas nesta pesquisa foram realizadas pela Universidade Federal de Santa Maria.

Para o procedimento de calibração foram variados os valores de reflectância da folha viva no visível ( $\alpha_v, l$ ), conforme o intervalo de 0,05 a 0,15, sendo estes valores baseados na literatura (Sellers *et al* (1996b) e Almeida, T.(2008)). Os demais parâmetros foram mantidos constantes. Ao longo da calibração foram gerados os fluxos de CO<sub>2</sub> que foram analisados com base no Coeficiente de Nash e Sutcliffe. Este procedimento repetiu-se até definir o melhor valor adotado pelo parâmetro que resultasse no maior índice para NS.

### 4.3.3 Módulo de Difusão Hidráulica do Solo

O módulo de difusão hidráulica do solo parametriza o transporte de água no solo calculando o fluxo de umidade neste ambiente. É discretizado em três camadas ( $D_1$ ,  $D_r$  e  $D_t$ ) com parâmetros físicos homogêneos por camada, onde a camada superficial fornece água para a evaporação livre, a segunda camada define a zona de raiz e por fim a última camada trata da drenagem profunda. Nesta sub-rotina foram calibrados alguns parâmetros que tratam das propriedades físicas do solo.

Calibraram-se os parâmetros de porosidade do solo ( $\theta_s$ ), profundidade individual das camadas ( $zdepth^2$ ) e expoente de umidade do solo ( $bee^3$ ). Primeiramente, variou-se os valores da porosidade do solo, de  $0,210m^3.m^{-3}$  a  $0,475m^3.m^{-3}$  que foram determinados a partir de observações de campo no sítio experimental, considerando-se também os valores indicados pela literatura em Sellers *et al* (1996b). Fixou-se no melhor valor indicado por NS para em seguida testar o parâmetro que representa a profundidade do solo. Neste parâmetro os valores foram atribuídos de acordo com cada camada, sendo na primeira camada ( $D_1$ ) foram testados valores de 0,20m a 0,30m, na segunda ( $D_r$ ) variou-se de 0,23m a 0,50m, enquanto a terceira ( $D_t$ ), foram variados os valores no intervalo de 0,23m a 0,50m sendo importante ressaltar que a adoção de tais valores foi orientada segundo Sellers *et al* (1996b). Finalizando este módulo, testou-se o expoente de umidade do solo que teve seus valores testados no intervalo de 1,05 a 6,05

---

<sup>2</sup> O parâmetro de *profundidade individual das camadas (zdepth)* foi adotado com base na lista de variáveis descritas por Collatz *et al* (1993), por esta razão não está constando na tabela 3.2 referente ao capítulo 3 desta dissertação.

<sup>3</sup> Parâmetro de *expoente de umidade do solo (bee)* também foi adotado com base na lista de variáveis descritas por Collatz *et al* (1993).

determinados com base nas observações de campo. Desse modo foram definidos os melhores valores para os três parâmetros adotados conforme a maximização da medida de desempenho.

#### 4.3.4 Módulo de fotossíntese e condutância estomática

No módulo de fotossíntese e condutância estomática são realizados os cálculos para obtenção da condutância estomática e da assimilação de CO<sub>2</sub>, os quais são obtidos a partir de relações na escala da folha. É nesta sub-rotina que se encontram os parâmetros referentes às propriedades fisiológicas da vegetação e também os parâmetros variantes com o tempo. A calibração foi feita nas seguintes variáveis: índice de área foliar (IAF), condutância estomática mínima (B) e temperatura crítica para a respiração foliar (trdm<sup>4</sup>).

A calibração foi iniciada pelo índice de área foliar, o único parâmetro dentre os testados, que apresenta uma variação mensal de seus valores. Desse modo, variou-se os valores para cada mês do ano. Para este teste foi necessário considerar tanto o ciclo vegetativo da soja, quanto da aveia preta, cultura utilizada na rotatividade com a soja. Com relação à soja, sabe-se que sua semeadura ocorreu em 28 de novembro de 2008 e sua emergência em 04 de dezembro do mesmo ano. Contudo, o modelo trabalha apenas com o ano iniciado em janeiro e finalizado em dezembro, desse modo, na calibração do parâmetro avaliou-se os valores a partir de janeiro de 2009. Considerando-se que a emergência ocorreu no início do mês de dezembro, então a partir de janeiro até o mês de abril (quando ocorreu a colheita no dia 15) testou-se valores no intervalo de 2,8 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> a 5,8 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>. O mês de maio foi destinado ao período de pousio sendo atribuídos valores de 0,0 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> a 0,5 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>. No mês de junho ocorreu a semeadura da aveia preta, porém como foi realizada no dia 15, optou-se por adotar valores baixos conforme os descritos para o mês anterior. A emergência da aveia preta ocorreu em 22 de junho, entretanto, devido a problemas ocasionados por geada, foi necessário efetuar o replantio deste cultivo em 28 de Julho, adotando-se valores no intervalo de 0,0 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup> a 0,7 m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>. Para

---

<sup>4</sup> O parâmetro de *temperatura crítica para respiração foliar (trdm)* foi adotado com base na lista de variáveis descritas por Collatz *et al* (1993), por esta razão não está constando na tabela 3.2 referente ao capítulo 3 desta dissertação.

os meses que seguiram de agosto a novembro, quando ocorreu a colheita da aveia no dia 06, adotou-se valores no intervalo de  $0,8 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  a  $5,6 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  e finalizando a calibração deste parâmetro, adotou-se o intervalo de valores de  $0,0 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  a  $2,6 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$  para o mês de dezembro. Ressalta-se que os valores adotados para o IAF dos períodos citados foi baseado nas observações de campo e na literatura (Almeida. (2008); Farias *et al* (2001); Haeffig *et al* (2006); Fontana *et al* (1991) Rosseto& Nakagawa (2001); Alves (2002). A cada conjunto de valores adotados, simulava-se os fluxos de  $\text{CO}_2$  para posteriormente avaliar o melhor conjunto aplicando-se NS e assim fixar os valores de acordo com o melhor resultado.

Em seguida, prosseguiu-se com os testes com o parâmetro de condutância estomática mínima ( $B$ ), que também sofreu variação de seus valores de acordo com o intervalo de  $0,05 \text{ mol}.\text{m}^2.\text{s}^{-1}$  a  $0,2 \text{ mol}.\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ , adotados com base na literatura (Sellers *et al* (1996b); Salinet, L.H. (2009)). Com base na maximização da medida de desempenho, fixou-se o valor deste parâmetro.

Finalizando a calibração desta sub-rotina, foram testados os valores da temperatura crítica para a respiração foliar ( $tr_{dm}$ ), que variou de 280K a 328K de acordo com Sellers *et al* (1996b), o qual também foi fixado a partir do coeficiente de Nash e Sutcliffe.

Optou-se por realizar a calibração nos parâmetros que demonstraram maior sensibilidade à variação de valores. A cada teste eram gerados fluxos de  $\text{CO}_2$ , que eram comparados com o fluxo de  $\text{CO}_2$  experimental, a partir de uma análise baseada no Coeficiente de Nash e Sutcliffe, assim determinando o melhor valor a ser adotado por cada um dos parâmetros testados individualmente, correspondendo a um melhor ajuste entre o fluxo calculado e o observado. A validação do processo de calibração foi realizada para o período de 05 a 17 de fevereiro de 2009 que equivaleu aos estádios fenológicos R1 e R2, ou seja, referentes ao período de floração da cultura de soja. Ratificando que este período foi adotado por apresentar poucas falhas referentes aos dados experimentais, adotados na comparação com os simulados. Contudo, as simulações dos fluxos de  $\text{CO}_2$  foram realizadas com dados de dois anos (2008 e 2009) que foram repetidos ciclicamente por 20 vezes, assim perfazendo o *spin-up* geral do modelo, tendo-se, dessa maneira um período de simulação de 40 anos de dados



horários, e obtendo-se a condição de equilíbrio do modelo. Llopart (2009) adotou este mesmo procedimento para perfazer o *spin-up* e obter as condições de equilíbrio necessárias à modelagem do SiB2 aplicado à região da Amazônia.

#### **4.4 Adoção do CFSR como condição de contorno inicial na simulação de fluxos de CO<sub>2</sub> pelo modelo SiB2.**

O SiB2 é um modelo que provém a obtenção de fluxos superficiais de energia, vapor d'água e de CO<sub>2</sub>, para tanto, torna-se necessário determinar as características da superfície do ambiente em estudo. Este procedimento foi realizado na etapa anterior em que foram calibrados parâmetros da vegetação e do solo mais significativos na simulação de fluxos de CO<sub>2</sub>, permitindo, assim, que fossem definidos os melhores valores a serem adotados de forma a representar de maneira mais realística possível os fluxos calculados.

Findado o processo de calibração, todos os parâmetros testados foram fixados com os valores que determinaram os resultados mais satisfatórios, segundo o Coeficiente de Nash e Sutcliffe . Passou-se, então à etapa seguinte que trata da execução do SiB2 utilizando os dados de reanálise denominados *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR).

As condições iniciais são fornecidas através de um arquivo em formato ASCII e representam o estado físico da atmosfera. São constituídas por variáveis de precipitação pluvial (mm), temperatura do ar (°C), pressão atmosférica (hPa), radiação de onda curta (W/m<sup>2</sup>) e velocidade do vento (m/s), que atuam como condições de contorno atmosféricas, utilizadas como forçantes de inicialização necessárias à execução do modelo.

Para a realização desta etapa, substituiu-se o arquivo utilizado inicialmente, constituído pelos dados meteorológicos do INMET, pelo arquivo montado com os dados do CFSR. A partir desta substituição, efetuou-se a implementação do modelo através de rotinas Fortran 90 para o período novembro de 2008 a dezembro de 2009. Para as simulações realizou-se o *spin up* da mesma maneira como na calibração, obtendo-se as condições de equilíbrio do modelo.

A validação deste processo foi baseada em observações micrometeorológicas do fluxo de CO<sub>2</sub>, referentes ao período de 05 a 17 de fevereiro de 2009. A sensibilidade do modelo foi analisada com base na medida de desempenho dada pelo Coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS), conforme equação 4.1.

## **Capítulo 5**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante o processo de calibração com vistas à adequação do modelo à área de estudo, bem como os resultados obtidos a partir da adoção dos dados de reanálise como variáveis referentes às condições de contorno atmosféricas.

### **5. Resultados e discussões**

#### **5.1 Calibração dos parâmetros do modelo SiB2**

A calibração de um modelo de superfície constitui-se em um processo iterativo em que os valores dos parâmetros são modificados e seus efeitos nos resultados são avaliados repetidamente até que o resultado simulado reproduza a melhor associação com o resultado observado. Cada alteração nos valores dos parâmetros foi denominada de conjunto, desse modo, obtiveram-se parâmetros com variados conjuntos, conforme os testes realizados. Para o julgamento dos resultados realizou-se avaliações baseadas na medida de desempenho dada pelo coeficiente de Nash e Sutcliffe, que representou o comportamento do fluxo de CO<sub>2</sub> simulado com relação ao comportamento do fluxo de CO<sub>2</sub> observado.

Conforme visto o período de estudo refere-se ao ano-safra de 2008/2009, ressaltando-se que para sua escolha, considerou-se o início de funcionamento da torre micrometeorológica instalada na área de estudo (em 2008) e a disponibilidade dos

dados de reanálise do CFSR, que compreende, de 1979 a 2009. O período de 01 de janeiro de 2008 a 31 de dezembro de 2009 foi utilizado na simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub> durante o processo de calibração, sendo que para o aquecimento do modelo adotou-se o *spin up* equivalente a 40 anos de dados horários, o qual foi obtido a partir da repetição cíclica de 20 vezes os dados de 2008 e 2009.

O modelo foi calibrado manualmente procurando-se um bom ajuste do fluxo simulado e observado com base em uma medida de desempenho. Para esta validação adotou-se o período de 05 a 17 de fevereiro de 2009, sendo que sua escolha foi determinada com base nas falhas existentes nos dados experimentais, sendo este o período que apresentou menor quantidade de falhas, um total de 9 horas distribuídas ao longo das 288 horas que se referem ao período total da validação.

Os parâmetros adotados para a calibração ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $V$ ,  $X_L$ ,  $\alpha$ ,  $l$ ,  $\theta_s$ ,  $zdepth$ ,  $bee$ ,  $IAF$ ,  $B$  e  $trdm$ ) são referentes aos módulos aerodinâmico, transferência radiativa, difusão hidráulica do solo e fotossíntese e condutância estomática. Os demais parâmetros foram considerados fixos nos valores encontrados na bibliografia.

### 5.1.1 Módulo Aerodinâmico

Para a calibração do módulo aerodinâmico foi considerada a altura do topo do dossel ( $Z_2$ ), a altura da base do dossel ( $Z_1$ ), a fração de cobertura vegetal ( $V$ ) e fator de distribuição angular da folha ( $X_L$ ), todos referentes aos parâmetros morfológicos da vegetação, conforme Sellers et al (1989). Foi realizado inicialmente um teste de sensibilidade nos parâmetros  $Z_2$  e  $Z_1$ , a partir de combinações entre os valores adotados. A cada combinação de valores, geravam-se os fluxos de CO<sub>2</sub> para então analisar o desempenho destas combinações através do Coeficiente de Nash e Sutcliffe. Com a obtenção do melhor valor, fixou-se estes, partindo para o teste do próximo parâmetro. O parâmetro seguinte a ser testado foi  $V$ , modificando-se os valores adotados avaliando seus efeitos com base em NS. Feita sua avaliação, fixou-se seu valor no melhor resultado e passou-se para os testes com  $X_L$ , sendo que sua calibração se desenvolveu do mesmo modo que a anterior. Na tabela 5.1 encontram-se descritos o menor e o maior valor adotado que correspondem ao intervalo de testes, estão também expressos o valor que

obteve melhor resultado e seu respectivo valor referente ao Coeficiente de Nash e Sutcliffe.

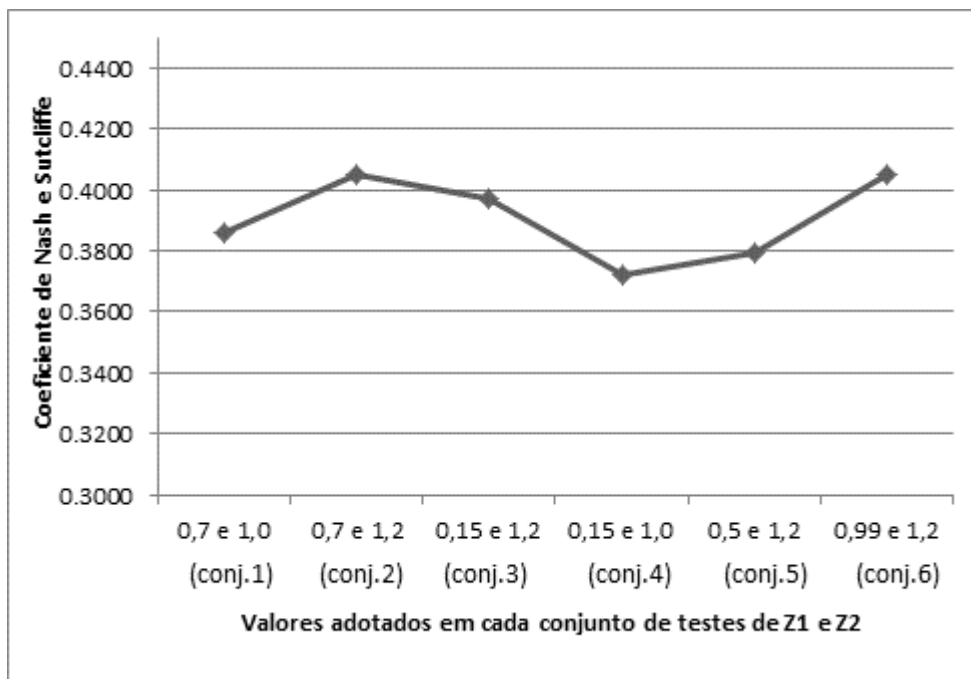
**Tabela 5.1.** Valores adotados na calibração dos parâmetros do módulo aerodinâmico

<b>Módulo Aerodinâmico</b>				
<i>Parâmetro</i>	<i>Valor Mínimo</i>	<i>Valor Máximo</i>	<i>Melhor Valor</i>	<i>NS</i>
$Z_1$ (m)	0,15	0,99	0,7	0,40
$Z_2$ (m)	1,0	1,2	1,2	0,40
$X_L$	0,2	0,7	0,2	0,63
V	0,7	0,9	0,9	0,46

A seguir segue a avaliação individual dos parâmetros calibrados neste módulo. Na tabela 5.2 verifica-se os valores adotados na calibração dos parâmetros referentes à altura do dossel e na figura 5.1 observa-se o gráfico demonstrativo do desempenho do modelo à variação de tais parâmetros com base no Coeficiente de Nash e Sutcliffe .

**Tabela 5.2.** Valores adotados na calibração da altura da base do dossel ( $Z_1$ ) e altura do topo do dossel ( $Z_2$ ).

<i>Conjunto</i>	<i>Z1 (m)(base)</i>	<i>Z2 (m)(topo)</i>	<i>NS</i>
1	0,7	1,0	0,3859
2	0,7	1,2	0,4048
3	0,15	1,2	0,3968
4	0,15	1,0	0,3723
5	0,5	1,2	0,3795
6	0,99	1,2	0,4047



**Figura 5.1.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da altura da base ( $Z_1$ ) e do topo do dossel ( $Z_2$ ).

Com relação ao parâmetro que trata da altura da base do dossel ( $Z_1$ ), obteve-se melhores resultados na simulação do fluxo quando foi adotado o valor de 0,7 m, enquanto a altura total do dossel ( $Z_2$ ) representou melhor resultado em 1,2 m. Ambos os valores representam o conjunto 2, uma vez que estas propriedades foram testadas simultaneamente. Observa-se que ao adotar valores muito baixos, como no conjunto 4, ocorre diminuição de NS, enquanto que os valores maiores representaram melhorias no valor deste coeficiente. Isto se explica pelo fato destes parâmetros referirem-se às características morfológicas da cultura e, considerando-se ainda, que o período de avaliação adotado (05 a 17 de fevereiro) correspondeu ao estágio de floração, torna-se compreensível que os maiores valores correspondam a melhorias na medida de desempenho.

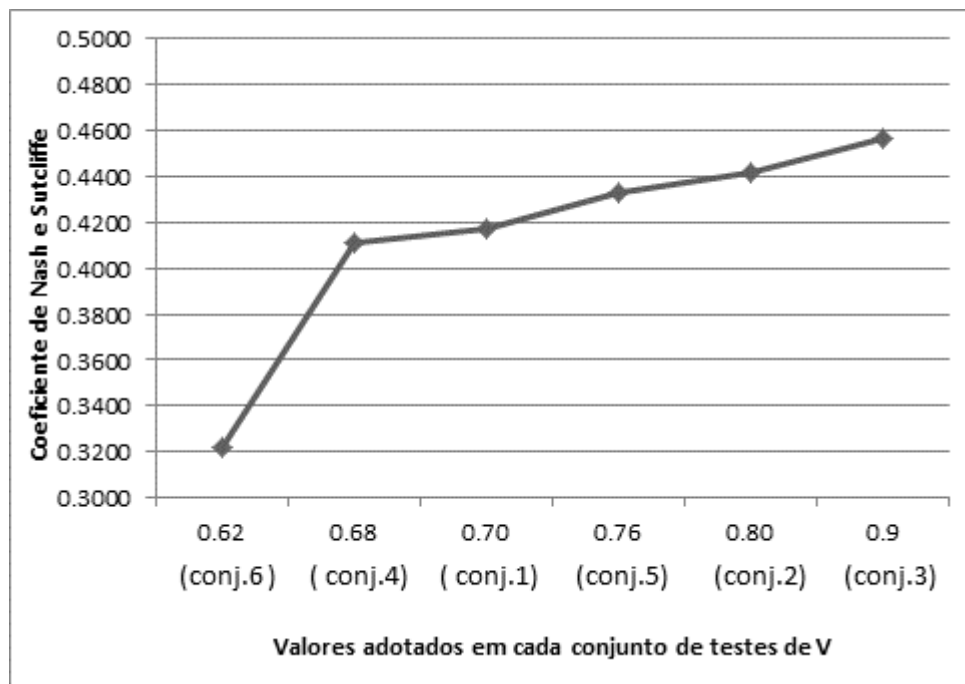
Sabe-se que a soja apresenta uma variação de suas características morfológicas ao longo do seu ciclo de desenvolvimento e quando atinge seu estágio de floração, a cultura já alcançou seu desenvolvimento máximo e por esta razão os valores do conjunto 2 representaram melhor a cultura para o modelo. Nota-se que o conjunto 6, cujos valores de  $Z_1$  foi de 0,99m e  $Z_2$  de 1,2m, também apresentou um valor mais alto para o coeficiente. Contudo, quando se compara este ao conjunto 2, percebe-se que o segundo

representou melhor as características da altura da base do dossel referente à cultura de soja, por esta razão gerou um valor maior para NS. Verifica-se ainda que  $Z_2$  demonstra maior influência na sensibilidade que  $Z_1$ , pois sua variação demonstrou interferir mais nas melhorias dos coeficientes, conforme pode ser observado no conjunto 3 que apresentou um valor de NS muito próximo dos conjuntos 2 e 6, sendo que nestes três conjuntos variaram apenas o valor de  $Z_1$ , mantendo-se o valor de  $Z_2$  (1,2m). Contudo, apesar da melhoria nos resultados de Nash e Sutcliffe com a calibração de ambos os parâmetros, o valor ainda é insipiente para ser considerado o ideal, desse modo, prosseguiu-se com a calibração do próximo parâmetro.

A figura 5.2 e a tabela 5.3 demonstram a variação dos valores adotados na calibração do parâmetro que trata da fração de cobertura vegetal ( $V$ ), lembrando que este só foi calibrado somente após terem sido fixados os valores de  $Z_1$  e  $Z_2$ .

**Tabela 5.3.** Valores adotados na calibração da fração de cobertura vegetal ( $V$ ).

<i>Conjunto</i>	<i>V</i>	<i>NS</i>
1	0,70	0,4174
2	0,80	0,4419
3	0,9	0,4564
4	0,68	0,4107
5	0,76	0,4328
6	0,62	0,3214



**Figura 5.2.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da fração de cobertura vegetal ( $V$ ).

O melhor resultado obtido foi no conjunto 3, cujo valor adotado para o parâmetro foi de 0,9. Em análise à figura 5.2 é possível verificar que o coeficiente de Nash e Sutcliffe adquire valores maiores à medida que se aumenta o valor do parâmetro. Este parâmetro trata da fração coberta pelo dossel, relacionando-se diretamente ao estágio de desenvolvimento que a cultura se encontra.

Esta característica é mais bem compreendida quando se avalia o ciclo da cultura, que tem início durante o estágio vegetativo. Neste estágio a soja passa a aumentar o número de folhas, deixando de apresentar apenas estrutura de folhas unifoliadas para apresentar também estruturas trifoliadas. Este desenvolvimento ocorre de forma gradual até que o conjunto completo formado pela cultura, o dossel, atinja sua altura máxima, findando assim este estágio de desenvolvimento e passando ao próximo, conhecido como estágio reprodutivo em que transcorrem os processos de floração, enchimento dos grãos e maturação. Tendo em vista a análise do ciclo da soja é possível verificar que durante sua fase inicial onde as folhas ainda estão em crescimento, a fração de cobertura do dossel apresenta valores menores que vão aumentando conforme a cultura atinge seu desenvolvimento máximo. Já durante a fase de floração, cujo



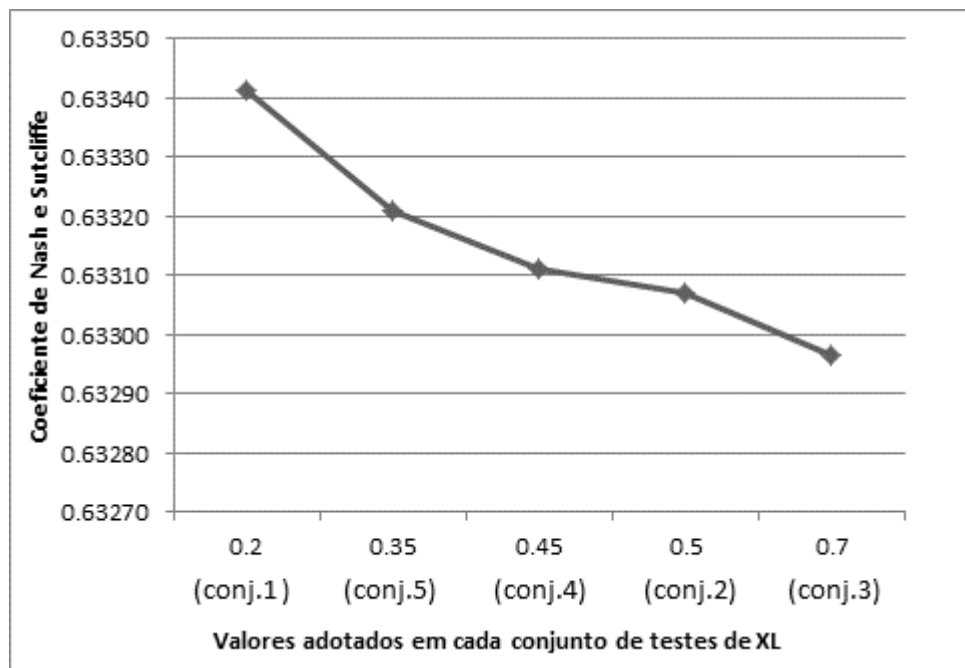
desenvolvimento máximo foi alcançado, o dossel apresenta maior fração de cobertura, uma vez que as estruturas das folhas já encontram-se bem desenvolvidas.

Considerando-se que a avaliação de NS foi estabelecida para o período de floração, compreende-se porque o maior valor adotado para o parâmetro representou o melhor valor para NS, pois nesta fase a soja já se encontra em seu desenvolvimento máximo, passando a concentrar-se no surgimento e crescimento das flores. Por esta razão o desempenho do modelo, quanto à simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub>, melhora com a adoção de valores maiores, pois representa melhor o estágio que a cultura se encontra.

Findada a calibração deste parâmetro, fixou-se em no melhor valor indicado por NS, passando-se a avaliação do último parâmetro testado neste módulo, que trata da distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ). Na figura 5.3 e na tabela 5.4 demonstram-se respectivamente os valores adotados e o coeficiente Nasf e Sutcliffe.

**Tabela 5.4.** Valores adotados na calibração do parâmetro de distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ).

<i>Conjunto</i>	<i><math>X_L</math></i>	<i>NS</i>
1	0,2	0,63341
2	0,5	0,63307
3	0,7	0,63297
4	0,45	0,63311
5	0,35	0,63321



**Figura 5.3.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ).

Analisando-se a figura 5.3, nota-se que a variação da medida de desempenho entre os conjuntos de valores foi muito pequena. Contudo, o conjunto 1, cujo valor adotado foi 0,2 correspondeu ao melhor valor de NS. Cabe destacar que este parâmetro morfológico, indica a orientação das folhas dentro do dossel. Logo, seus valores refletem diretamente na interceptação da radiação e também na interação com a velocidade do vento.

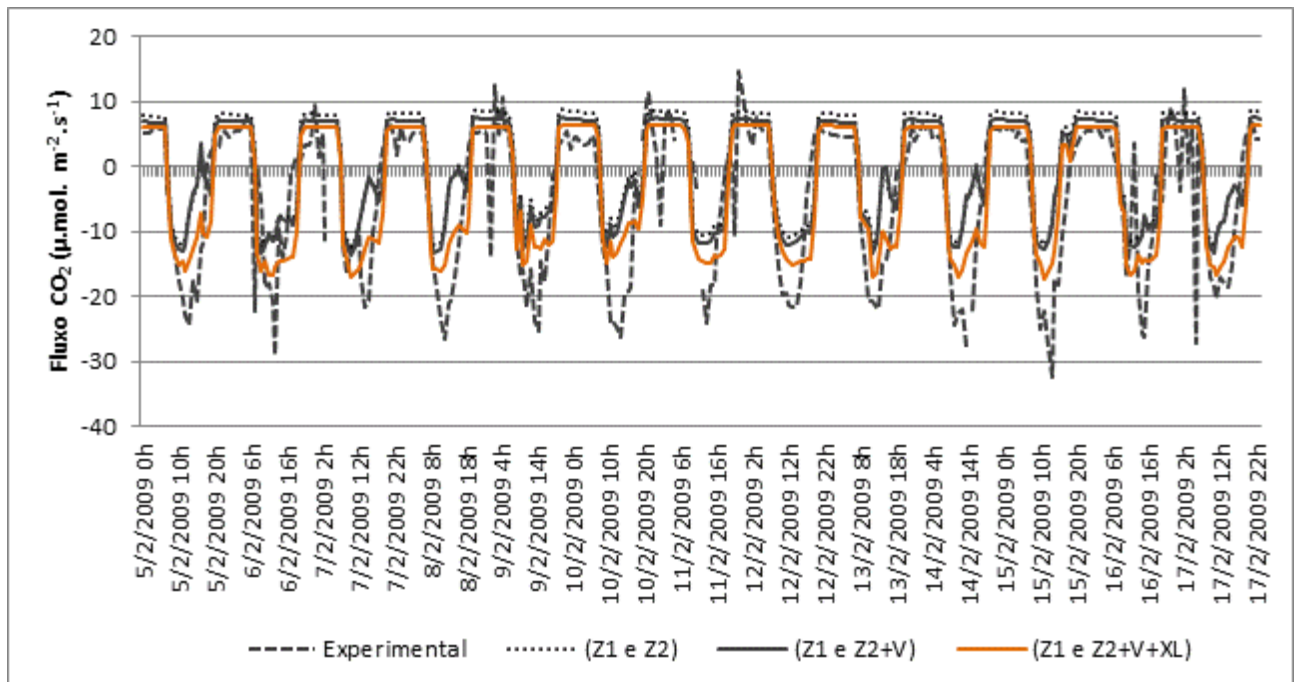
Apesar de ser pequena a variação apresentada entre os coeficientes de Nash e Sutcliffe de cada conjunto, ainda assim, é possível perceber que quando foram adotados valores mais altos, houve uma queda na resposta do coeficiente, que representou maior valor com a adoção do menor valor para o parâmetro. Isto se deve ao fato de que a distribuição do ângulo foliar interfere tanto na interceptação da radiação, importante para o fluxo de  $CO_2$ , pois alimenta o processo de fotossíntese; quanto na interação do vento com a superfície. Verificando-se assim que ângulos menores permitem melhor interceptação da radiação e também melhor circulação do vento sobre o dossel.

Todas as variáveis citadas foram calibradas com vistas a melhorar a resposta do módulo aerodinâmico, responsável pelo cálculo das resistências aerodinâmicas que influenciam tanto nos fluxos de energia, quanto de calor e de  $CO_2$ . A melhoria

proporcionada pela calibração destes parâmetros deve-se ao fato de representarem as características morfológicas da vegetação. Considerando ainda que esta resistência está relacionada à velocidade do vento e a altura média da vegetação, percebe-se que altura do dossel ( $Z_1$  e  $Z_2$ ), a distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ) e a fração de cobertura vegetal ( $V$ ) influenciam na representação dos fluxos de  $CO_2$  a partir de sua influência exercida na determinação das características da superfície.

Contudo, convém destacar que dentre os parâmetros testados, os que demonstram maior sensibilidade na calibração deste módulo, foram àqueles relacionados à altura da base e do topo do dossel ( $Z_1$ ) e ( $Z_2$ ) e o que tratou da fração de cobertura vegetal ( $V$ ). Estes parâmetros podem ter apresentado maior influência, por serem mais sensíveis à determinação da rugosidade da superfície, que contribui para a determinação das resistências aerodinâmicas. Sendo que esta resistência é obtida a partir da interação da velocidade do vento (variável adotada nos dados de inicialização do modelo) com a rugosidade da superfície. Neste contexto, a distribuição do ângulo foliar não ocasiona tanta interferência na determinação da rugosidade da superfície, assim, exercendo menor influência na calibração deste módulo que visa a obtenção das resistências aerodinâmicas dentro e acima do dossel.

Na figura 5.4 demonstra-se a variação do fluxo de  $CO_2$  experimental com relação à variação do fluxo de  $CO_2$  simulado após a calibração dos parâmetros citados. Observando-a é possível verificar que ocorreu um ajuste do fluxo simulado ao observado conforme se calibravam os parâmetros e estes eram fixados em seu melhor valor.



**Figura 5.4.** Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo aerodinâmico, cujos valores foram fixados ao longo do processo.

### 5.1.2 Módulo de Transferência Radiativa.

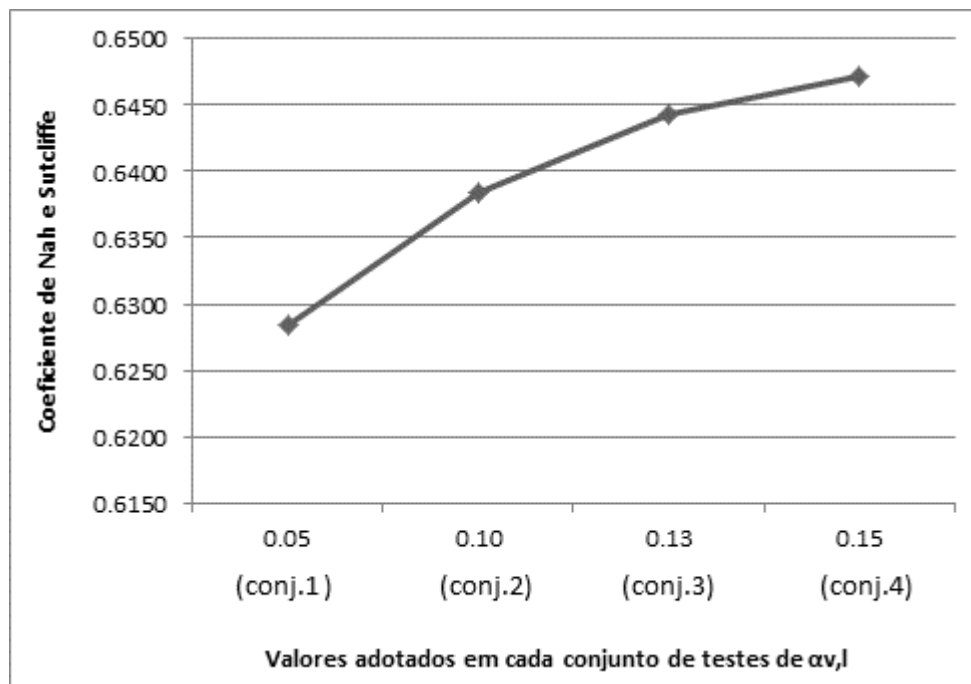
O módulo de transferência radiativa é responsável por estimar o albedo e também a radiação absorvida nas camadas de superfície. Para a calibração desta sub-rotina variou-se apenas os valores de reflectância da folha viva no visível ( $\alpha_{v,l}$ ), esta decisão foi tomada após realizar alguns testes com outras variáveis que demonstraram ser menos sensível à variação dos valores, conforme o Coeficiente de Nash e Sutcliffe, optando-se, assim, por mantê-las constante. Na tabela 5.5 encontra-se o intervalo de valores adotados na calibração da reflectância da folha viva no visível, enquanto que a tabela 5.6 trás sumarizado os valores dos conjuntos de teste. Na figura 5.5 pode ser observado o comportamento do coeficiente de ajuste conforme a variação dos valores deste parâmetro.

**Tabela 5.5.** Intervalo de valores adotados na calibração do parâmetro do módulo de transferência radiativa

<b>Módulo de Transferência Radiativa</b>				
<i>Parâmetro</i>	<i>Valor Mínimo</i>	<i>Valor Máximo</i>	<i>Melhor Valor</i>	<i>NS</i>
$\alpha_{v,l}$	0,05	0,15	0,15	0,6471

**Tabela 5.6.** Valores adotados na calibração da reflectância da folha viva no visível ( $\alpha_{v,l}$ ).

<i>Conjunto</i>	<i><math>\alpha_{v,l}</math></i>	<i>NS</i>
1	0,05	0,6284
2	0,10	0,6384
3	0,13	0,6443
4	0,15	0,6471



**Figura 5.5.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da reflectância da folha viva no visível ( $\alpha_{v,l}$ ).

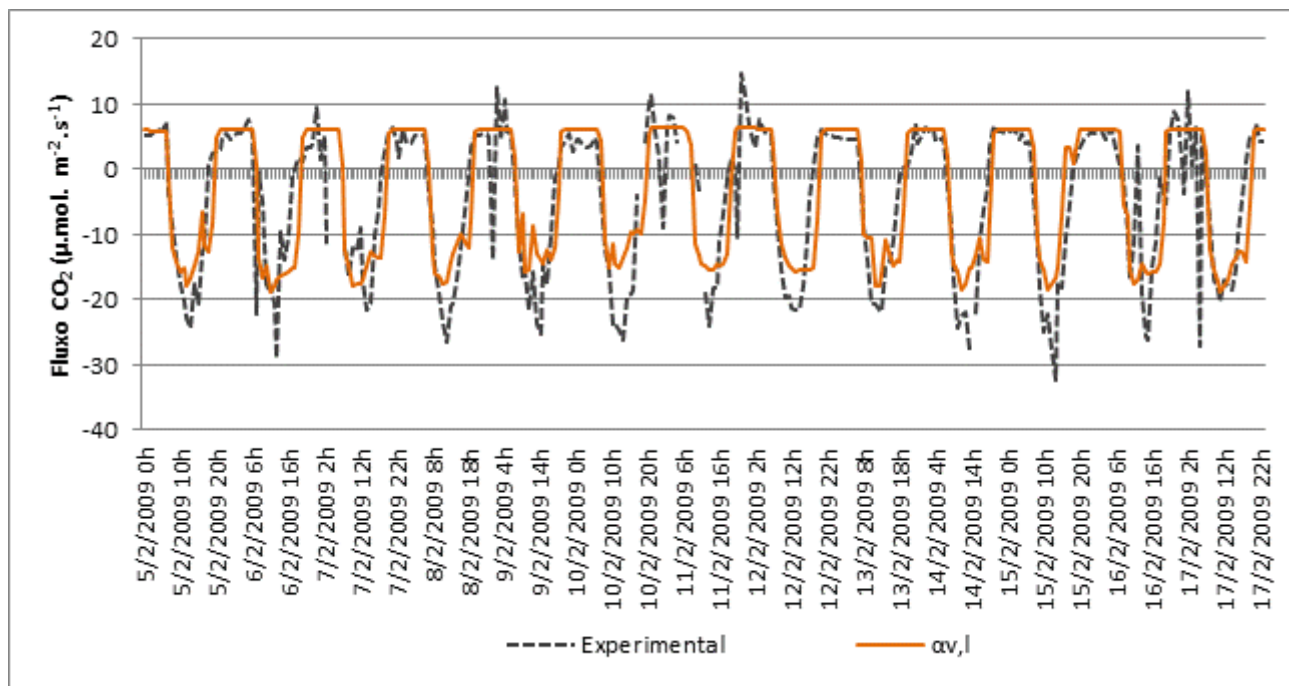
A tabela 5.6 indica que dentro do intervalo de valores adotados na calibração, aquele que representou melhor Coeficiente de Nash e Sutcliffe foi o conjunto 4, cujo valor adotado foi 0,15. Analisando a figura 5.5, percebe-se que este parâmetro seguiu uma tendência linear da variação dos valores. Para sua compreensão é necessário considerar que a validação da calibração foi realizada para o período que equivaleu à floração da cultura de soja, o que significa que nesta época o cultivo já se encontrava em seu desenvolvimento máximo, o que reflete na partição dos fluxos radiativos incidentes. Em seu estudo Moreira (2004, *apud* Almeida, 2009) reforça esta característica, quando destaca que existe alta correlação entre a partição da radiação incidente nas folhas e as características fisiológicas e morfológicas das plantas.

Sabe-se que tais características vão se modificando ao longo do ciclo vegetativo da cultura o que acaba por refletir na quantidade de radiação refletida, transmitida e absorvida. A produção de biomassa está relacionada com a quantidade de energia absorvida, desse modo, durante sua fase de crescimento a soja passa a absorver mais radiação do que refletir, uma vez que a absorvância é praticamente o inverso da reflectância. Considerando-se isto é possível verificar que a reflectância sofrerá

variações em seus valores ao longo do ciclo, sendo também diretamente influenciada pelo espectro eletromagnético.

Esta relação da radiação refletida com o comprimento de onda pode ser explicada em razão das propriedades morfológicas e fisiológicas da planta, já que a radiação eletromagnética, ao atingir a superfície da folha, irá sofrer diferentes interações conforme as características morfofisiológicas. Considerando-se a folha viva, sabe-se que na porção do visível ocorre maior absorção em consequência da alta concentração dos pigmentos localizados no mesófilo paliçádico, sendo que esta absorção é mais efetiva nos comprimentos de ondas do azul e do vermelho, uma vez que a folha verde apresenta maior concentração de clorofila *a* e clorofila *b* que são tipos de pigmentos que absorvem mais os citados comprimentos de onda, desse modo, refletindo mais no comprimento de onda do verde. Segundo Almeida (2009), a reflectância nesta faixa é em média 10% da radiação incidente. Maiores valores de reflectância nas plantas são observados nos comprimentos de onda do infravermelho próximo devido o maior espalhamento da radiação no mesófilo, correspondendo a 40% e 60% da radiação incidente.

Em síntese, sabe-se que a reflectância da folha verde da soja, na faixa do visível, mantém-se inferior a 15% ao longo do seu ciclo, sendo que os menores valores são observados durante sua fase de crescimento e os maiores valores passam a ser observados durante seus períodos finais, onde já atingiu a altura máxima e passa a concentrar suas energias na floração, enchimento dos grãos para posterior maturação. Considerando-se esta característica, atribuída à reflectância da folha verde no visível, verifica-se porque o melhor resultado de NS foi obtido com o valor de 0,15, uma vez que o período de validação referiu-se à época de floração, estágio cujos valores de reflectância passam a ser maiores. Considerando-se, ainda, que neste estágio ocorre maior reflectância em razão das características do cultivo que já atingiu seu desenvolvimento máximo, percebe-se esse reflexo no ajuste do fluxo de CO<sub>2</sub> simulado, já que este fluxo tende a apresentar maiores valores durante esta fase do ciclo, assim, resultando em um melhor ajuste pelo modelo. A figura 5.6 demonstra um comparativo entre o fluxo experimental e o simulado após a calibração deste parâmetro.



**Figura 5.6.** Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> experimental e o simulado após a calibração do parâmetro de reflectância da folha viva no visível.

### 5.1.3 Módulo de Difusão Hidráulica do Solo

O módulo de difusão hidráulica do solo é responsável por calcular o fluxo de umidade em suas três camadas ( $D_1$ ,  $D_r$  e  $D_t$ ). As características físicas do solo são fundamentais na regulação deste ambiente, quando se busca adequar a representação dos fluxos de CO<sub>2</sub> simulados pelo modelo à realidade observada.

Com relação ao solo referente à área de estudo, sabe-se que, de acordo com as observações de campo<sup>5</sup>, este é caracterizado por apresentar 60% de argila, 20% de silte e 20% de areia, desse modo, sua textura é caracterizada como argilosa. Segundo Streck (2008), solos que compreendem classes texturais com 35% a 60% de argila são classificados como de textura argilosa. Além das características texturais, também tem-se conhecimento do tipo de solo que é Latossolo Vermelho Escuro Distrófico e conforme o já citado autor, são solos profundos que apresentam uma transição gradual e difusa

<sup>5</sup> Os dados referentes às observações de campo, realizadas no sítio experimental e citadas nesta pesquisa, foram fornecidos pela Universidade Federal de Santa Maria.



entre os horizontes e por esta razão, tendem a apresentar um perfil mais homogêneo. Cabe ressaltar que o modelo considera o mesmo tipos de solo para as três camadas.

Conforme visto, as características deste ambiente são imprescindíveis à adequação do modelo à área de estudo, sendo que esta adequação se dará a partir da calibração de alguns parâmetros a fim de ajustá-los a realidade. Desse modo, os parâmetros calibrados foram: porosidade do solo ( $\theta_s$ ), profundidade individual das camadas ( $zdepth$ ) e expoente de umidade do solo ( $bee$ ). Na tabela 5.7 encontram-se sumarizados o intervalo de valores adotado na calibração de cada parâmetro, bem como aquele valor que resultou no melhor Coeficiente de Nash e Sutcliffe. Primeiramente foi realizada a calibração da porosidade do solo, onde foram testados alguns valores, que posteriormente foram avaliados segundo a medida de desempenho, determinando o melhor resultado, fixando-se o parâmetro conforme este. Em seguida realizou-se a calibração da profundidade individual das camadas, sendo que este foi o único dos três parâmetros em que se atribuíram diferentes valores por camada, os demais mantiveram valores homogêneos às três. Novamente foram testados valores, avaliados de acordo com NS, permitindo, assim, que se fixasse o parâmetro de acordo com o melhor valor. Finalizando, calibrou-se o expoente de umidade do solo, do mesmo modo que ocorreu a calibração dos anteriores.

**Tabela 5.7.** Valores adotados na calibração dos parâmetros do módulo de difusão hidráulica do solo

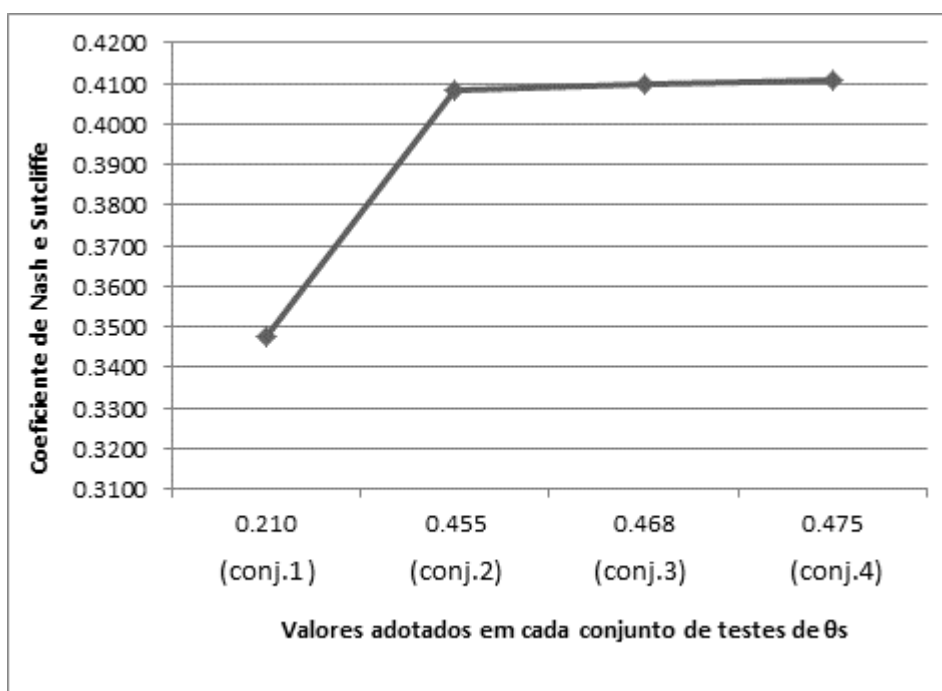
<b>Módulo de Difusão Hidráulica do Solo</b>				
<i>Parâmetro</i>	<i>Valor Mínimo</i>	<i>Valor Máximo</i>	<i>Melhor Valor</i>	<i>NS</i>
$\theta_s$ ( $m^3 \cdot m^{-3}$ )( $D_1, D_r$ e $D_t$ )	0,210	0,475	0,475	0,41
$zdepth$ (m)( $D_1$ )	0,20	0,50	0,50	
$zdepth$ (m)( $D_r$ )	0,20	0,23	0,23	0,63
$zdepth$ (m)( $D_t$ )	0,30	0,36	0,36	
$bee$ ( $D_1, D_r$ e $D_t$ )	1,05	6,05	2,05	0,64

Os valores adotados na calibração do parâmetro que trata da porosidade do solo ( $\theta_s$ ) encontram-se listados na tabela 5.8, já a figura 5.7 demonstra o desempenho do

modelo à variação desses valores. Ressalta-se que para a calibração deste parâmetro são atribuídos o mesmo valor para as três camadas do solo.

**Tabela 5.8.** Valores adotados na calibração da porosidade do solo ( $\theta_s$ ).

<i>Conjunto</i>	$\theta_s$ ( $m^3.m^{-3}$ )	<i>NS</i>
1	0,210	0,3476
2	0,455	0,4081
3	0,468	0,4098
4	0,475	0,4107



**Figura 5.7.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da porosidade do solo ( $\theta_s$ ).

Em análise à tabela 5.8 percebe-se que o conjunto 4 representou o melhor valor segundo avaliação do Coeficiente de Nash e Sutcliffe . A figura 5.7 possibilita verificar que quanto maior o valor atribuído a este parâmetro, melhor torna-se a medida de ajuste. Ainda em análise à figura 5.7, observa-se também que ocorreu uma grande

variação em NS com relação às alterações do primeiro para o segundo conjunto, amenizando-se nos demais.

Com relação a este parâmetro, convém destacar que a porosidade do solo exerce influência direta na transferência de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera, sendo esta transferência conhecida como efluxo de CO<sub>2</sub> do solo. De acordo com Sotta (1998), a taxa de transferência de dióxido de carbono deste ambiente para a atmosfera é controlada por alguns fatores como gradiente de temperatura, flutuações da pressão atmosférica e propriedades físicas do solo, sendo a porosidade referente a este último. Logo, verifica-se que o efluxo de CO<sub>2</sub>, também conhecido como respiração do solo, depende do transporte de gases no solo e entre este e a atmosfera, sendo este transporte, afetado pela fração de poros preenchidos com água ou ar. Segundo Streck (2008), pode-se dizer que a porosidade do solo é constituída pelos vazios entre as partículas sólidas, sendo responsável pelo movimento de água e ar no solo.

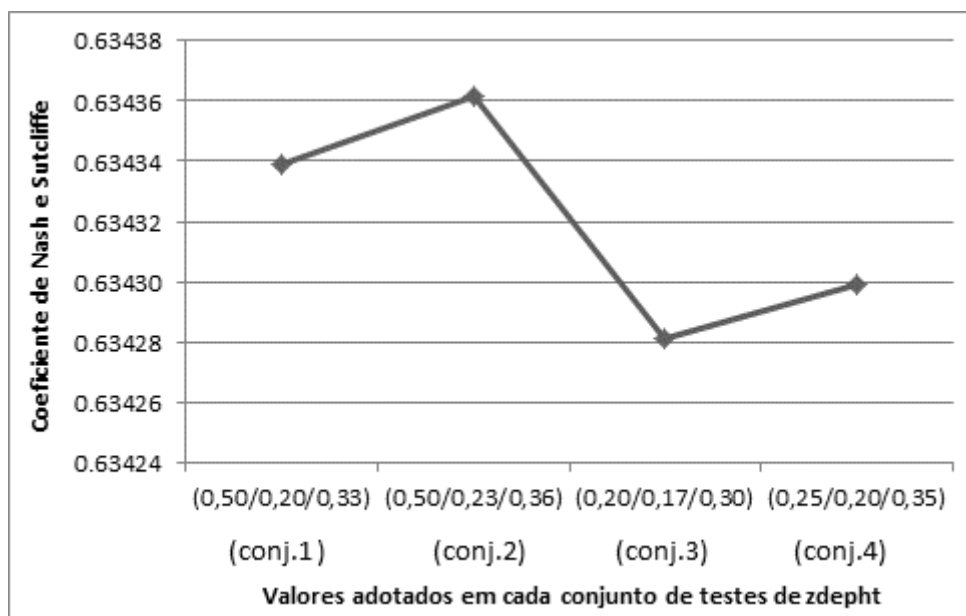
Portanto, constata-se que as características da porosidade irão determinar como a umidade, a temperatura e a concentração de gás, influenciarão o regime de trocas gasosas. Assim, admite-se que um solo pouco poroso, dificulta tanto a circulação de ar, quanto a circulação de água neste ambiente, com isso afetando o processo de respiração. Com relação a esta transferência de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera, destaca-se que provém de diversas fontes, entre elas a respiração das raízes e as atividades dos microorganismos presentes neste ambiente.

Diante do exposto é possível compreender porque o maior valor adotado na calibração do parâmetro obteve a melhor medida de desempenho, dada por NS. Quanto maior a porosidade do solo, melhor se desenvolve o processo de respiração neste ambiente realizado pela atividade microbiana e incrementado pela respiração das raízes. Em contrapartida, valores menores atribuídos a esta característica física, resultaram em prejuízo aos valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe por incidirem diretamente na diminuição das trocas gasosas ocorrentes entre o solo e a atmosfera. O bom resultado obtido com o conjunto 4 justifica-se, por permitir a melhor respiração do solo estimada pelo modelo, e que é imprescindível à obtenção do fluxo de CO<sub>2</sub>, uma vez que este refere-se a relação entre a assimilação de CO<sub>2</sub> com a respiração do solo e respiração do dossel.

Determinado o melhor valor a ser adotado por tal parâmetro, passou-se à calibração do seguinte que trata da profundidade individual das camadas do solo. A tabela 5.9 e a figura 5.8 referem-se ao parâmetro *zdepth*. Na sua calibração foram testados valores diferenciados à cada camada do solo.

**Tabela 5.9.** Valores adotados na calibração da profundidade individual das camadas do solo (*zdepth*).

<i>Conjunto</i>	<i>zdepth(m) (D<sub>1</sub>)</i>	<i>zdepth(m) (D<sub>r</sub>)</i>	<i>zdepth(m) (D<sub>t</sub>)</i>	<i>NS</i>
1	0,5	0,2	0,33	0,63433
2	0,5	0,23	0,36	0,63436
3	0,2	0,17	0,30	0,63428
4	0,25	0,2	0,35	0,63429



**Figura 5.8.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da profundidade individual das camadas do solo (*zdepth*).

Como este parâmetro trata da profundidade individual das camadas do solo, atribuíram-se diferentes valores a cada camada em cada conjunto de teste. Apesar da variação do coeficiente de Nash e Sutcliffe ter sido muito pequena entre os conjuntos,

ainda assim, observa-se que o melhor valor de NS foi obtido no conjunto 2, conforme tabela 5.9.

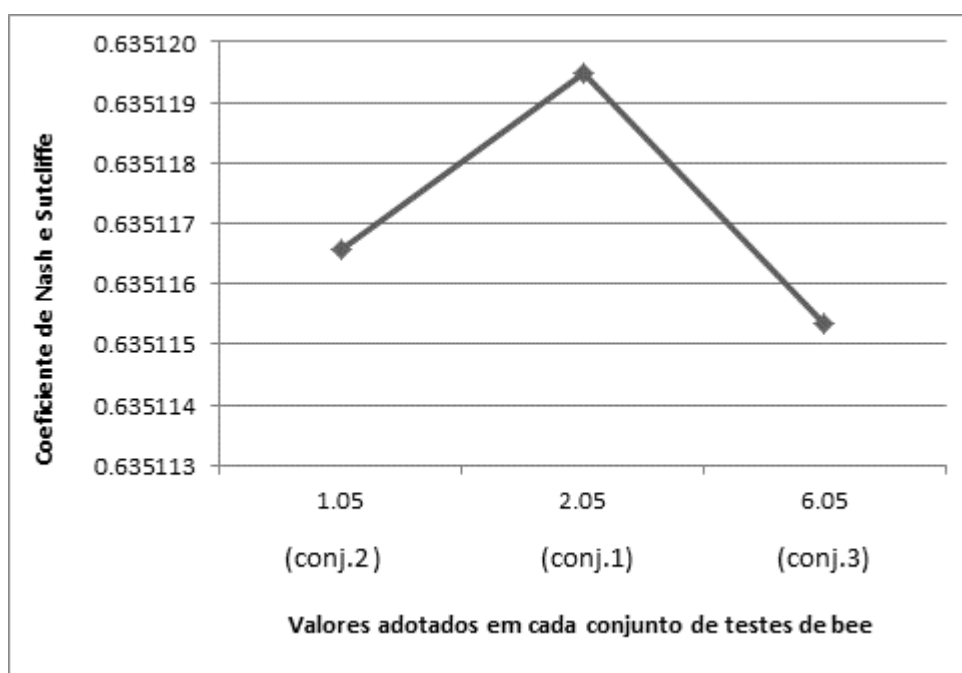
Em análise ao NS, é possível verificar que das três camadas a que parece exercer maior influência na geração dos fluxos de CO<sub>2</sub> é a segunda. Isto pode ser percebido no aumento da curva do primeiro para o segundo conjunto, onde se manteve o valor da primeira camada, aumentando-se o valor da segunda e terceira camadas. Já no terceiro conjunto houve um decaimento do valor de NS, quando se diminuiu os valores das três camadas. Por fim, no quarto conjunto aumentaram-se novamente os valores das camadas, mas não atingindo o desempenho do coeficiente atingido anteriormente no conjunto 2. Com base nestas observações, verifica-se que tanto a segunda quanto a terceira camada podem exercer esta influência na determinação de NS, contudo, pelo fato da segunda camada referir-se à zona de raízes, em que ocorre extração de água para a transpiração, acredita-se que seu poder de influência na adequação dos fluxos de CO<sub>2</sub> seja maior que a terceira camada que trata da drenagem profunda, estimando o escoamento subsuperficial. Lembrando que o processo de respiração do solo decorre tanto dos microorganismos presentes neste ambiente, quanto da respiração das raízes, reforçando a teoria de que a segunda camada exerce maior influência.

Em síntese, a calibração deste parâmetro permitiu que se verificasse que ocorreu uma variação insipiente do valor de NS entre os conjuntos de valores adotados, representando com isso, que este parâmetro exerce pouca influência sobre a determinação dos fluxos de CO<sub>2</sub> pelo modelo. Sabe-se que a profundidade das camadas pode incidir sobre o escoamento de água neste ambiente, contribuindo com a determinação da umidade do solo, juntamente com a textura e a porosidade. Ainda assim, este parâmetro demonstrou pouca influência na simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub>.

Para finalizar sua calibração, adotou-se os valores do conjunto 2, fixando-se a profundidade das camadas de acordo com cada um deles, passando-se, então, à calibração do parâmetro que trata do expoente de umidade do solo (*bee*). Com relação a este parâmetro, cabe lembrar que foram adotados o mesmo valor para as três camadas do solo. A figura 5.9 e a tabela 5.10 referem-se a este parâmetro.

**Tabela 5.10.** Valores adotados na calibração do expoente de umidade do solo (*bee*).

<i>Conjunto</i>	<i>bee</i>	<i>NS</i>
1	2,05	0,6351
2	1,05	0,6351
3	6,05	0,6351



**Figura 5.9.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da expoente de umidade do solo (*bee*).

O último parâmetro testado na calibração desta sub-rotina trata do expoente de umidade do solo. Em observância a tabela 5.10, verifica-se que para sua calibração manteve-se homogêneo os valores das três camadas. Avaliando-se a figura 5.9, nota-se que o coeficiente de ajuste não seguiu uma tendência linear segundo um decréscimo ou acréscimo dos valores adotados e, apesar de ter apresentada uma variação mínima entre os valores demonstrados pela medida de desempenho (NS), verifica-se que o melhor valor foi obtido com o conjunto 1.

O valor adotado no conjunto 3 pode ter prejudicado, mesmo que de forma mínima, o resultado do coeficiente de Nash e Sutcliffe por ter representado um maior

expoente de umidade. Neste contexto, sabe-se que um solo saturado em água ocasiona prejuízo tanto à atividade microbiana, quanto à respiração das raízes, ainda mais quando se trata da soja, uma cultura que demonstra-se sensível às condições de solo saturado.

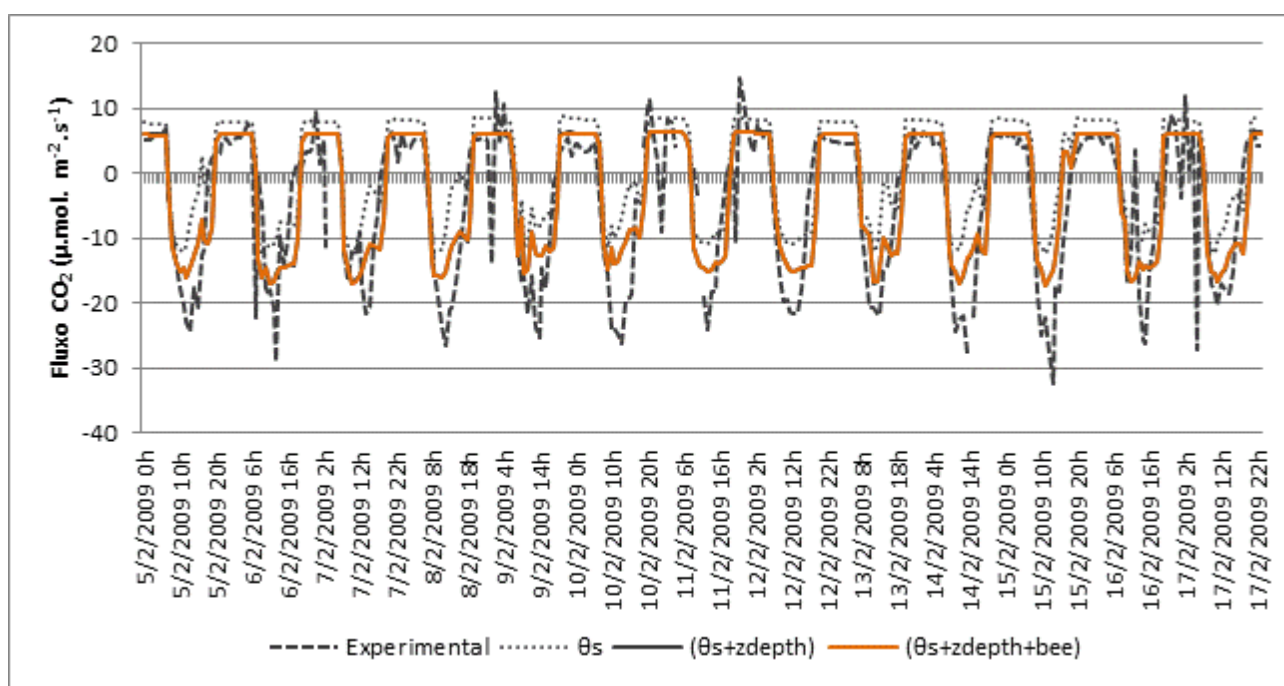
Em contrapartida, o valor adotado no conjunto2 ocasionou prejuízo na adequação do fluxo simulado, também de forma mínima, por atribuir um valor mais baixo referente a este expoente de umidade. A redução deste valor está atrelada à deficiência de umidade que pode limitar o fluxo de CO<sub>2</sub>, uma vez que um solo com pouca disponibilidade hídrica estimula o fechamento dos estômatos das folhas, já que estas tendem a evitar a perda de água considerando que o ambiente encontra-se com déficit hídrico, e a partir do fechamento destes mecanismos, ocorre menor absorção de CO<sub>2</sub>.

O expoente de umidade do solo constitui uma importante característica para o processo de respiração, visto que a umidade pode definir o ritmo da atividade microbiológica, sendo determinante do efluxo de CO<sub>2</sub> (Vanhala (2002) e Escalar et al (2000) *apud*. Celho (2005)). Contudo, verifica-se com base na pequena variação de NS entre os conjuntos de valores testados que, apesar de sua importância, este parâmetro exerce pouca influência no ajuste do fluxo de CO<sub>2</sub> pelo modelo.

A determinação da profundidade de cada camada, bem como a consideração ideal do expoente de umidade e da porosidade do solo, são condicionantes importantes na calibração desta sub-rotina por se tratarem de propriedades físicas que estão atreladas ao processo de respiração do solo. Lembrando que, de acordo com Coelho (2005), a respiração do solo é resultado de dois processos: produção de CO<sub>2</sub> principalmente durante os a respiração das raízes e dos microorganismos e transporte de CO<sub>2</sub> para atmosfera. O referido autor reforça ainda que a presença de ar no solo é importante, pois leva ao ambiente, o oxigênio (O<sub>2</sub>) para a respiração da biota e conseqüentemente mineralização da matéria orgânica, sendo que a presença de dióxido de carbono também é importante para os organismos autotróficos do solo.

Contudo, mesmo verificando a importância de cada uma das propriedades físicas testadas durante a calibração, constata-se que apenas a porosidade do solo apresentou contribuições mais significativas à adequação desta sub-rotina ao ajuste dos fluxos de CO<sub>2</sub> simulados ao observado. Na figura 5.10 tem-se uma visualização a cerca do

comportamento do fluxo de CO<sub>2</sub> experimental em comparação com os fluxos gerados a cada variável calibrada, onde é possível observar que os parâmetros (*zdepth*) e (*bee*) resultaram em um comportamento semelhante dos seus fluxos simulados. Porém, embora tendo representado uma contribuição mínima à calibração, quando seus melhores valores foram adotados em conjunto com o melhor valor referente a ( $\theta_s$ ) obteve-se um ajuste maior nas curvas do fluxos simulados em comparação ao experimental, conforme análise qualitativa embasada na citada figura.



**Figura 5.10.** Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo de difusão hidráulica do solo, cujos valores foram fixados ao longo do processo.

#### 5.1.4 Módulo de Fotossíntese e Condutância Estomática

O módulo de fotossíntese e condutância estomática realiza os cálculos para a obtenção da condutância estomática e da assimilação de CO<sub>2</sub>, desta maneira depende diretamente dos parâmetros fisiológicos e dos parâmetros variantes com o tempo. A calibração desta sub-rotina foi feita com base no parâmetro de índice de área foliar



(IAF), condutância estomática mínima(B) e temperatura crítica para a respiração foliar (trdm).

A calibração foi iniciada pelo IAF, único parâmetro dentre os três que apresenta uma variação mensal, logo este parâmetro representa àqueles variantes com o tempo conforme Sellers (1996a). Foram testados conjuntos de valores, os quais foram avaliados com base no Coeficiente de Nash e Sutcliffe e quando encerrada a verificação do melhor valor, estes foram fixados conforme os meses, passando-se a testar os valores da condutância estomática mínima, também avaliada com base em NS e fixada no melhor valor. Finalizado a calibração, variou-se os valores do parâmetro de temperatura crítica para a respiração foliar, do mesmo modo que se fez com os anteriores. A tabela 5.11 traz o intervalo de valores adotados nas calibrações, bem como o melhor valor de cada uma e o respectivo valor de Nash.

**Tabela 5.11.** Valores adotados na calibração dos parâmetros do módulo de fotossíntese e condutância estomática mínima.

<b>Módulo de Fotossíntese e Condutância Estomática</b>				
<i>Parâmetro</i>	<i>Valor Mínimo</i>	<i>Valor Máximo</i>	<i>Melhor Valor</i>	<i>NS</i>
IAF (m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup> )	0,5	5,8	*	0,4
B (mol.m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	0,05	0,2	0,2	0,62
trdm (K)	280	328	280	0,63

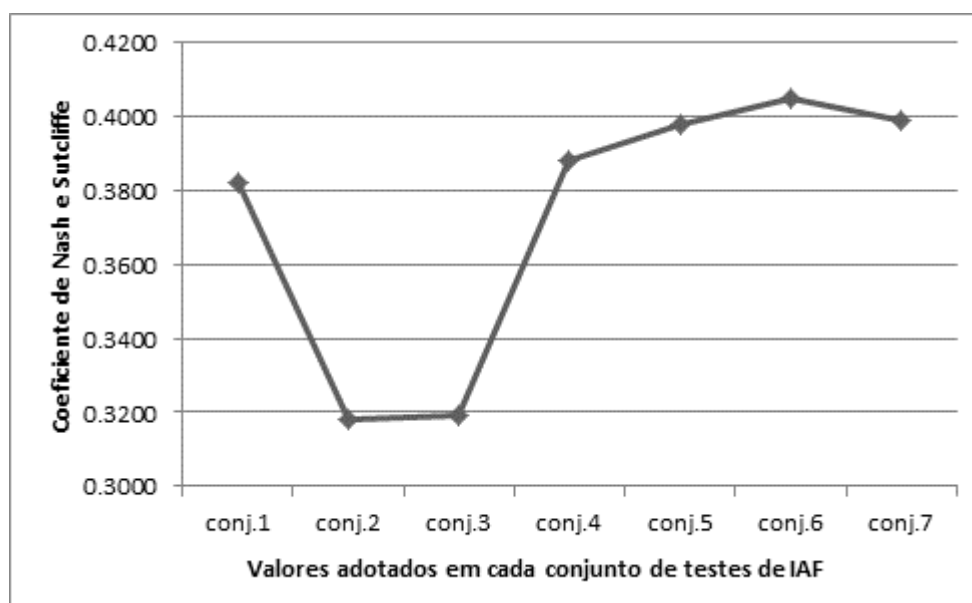
\*Melhor valor obtido na calibração do parâmetro IAF, corresponde a um conjunto de valores mensais atribuídos de janeiro a dezembro.

Conforme relatado o primeiro parâmetro calibrado foi o índice de área foliar (IAF), que apresenta valores diferenciados de acordo com os meses ao longo do ano. Para a definição destes valores, baseou-se nas informações a respeito dos cultivos que foram desenvolvidos no sítio experimental durante os anos de 2008 e 2009. Destaca-se, assim, que a cultura de soja foi desenvolvida durante o período de verão, ocorrendo sua semeadura em 28 de novembro de 2008 e sua colheita em 15 de abril de 2009 e o cultivo de aveia preta, desenvolvido durante o inverno, com semeadura em 15 de junho de 2009 e colheita em 06 de novembro do mesmo ano, salientando-se que a aveia teve de ser replantada em 28 de julho em razão de problemas ocasionados por geada. Desse

modo, para a determinação dos valores deste parâmetro nos diferentes meses foi necessário considerar tanto o ciclo vegetativo da soja, quanto da aveia preta. Como o modelo trabalha apenas com o ano iniciado em janeiro e finalizado em dezembro, a calibração ocorreu variando-se os valores a partir de janeiro de 2009 até dezembro do mesmo ano. Na tabela 5.12 encontram-se sumarizados os valores adotados para o parâmetro e na figura 5.11, tem-se o comportamento de acordo com o coeficiente de ajuste.

**Tabela 5.12.** Valores adotados na calibração do índice de área foliar (IAF).

Conjunto	IAF ( $m^2.m^{-2}$ )												NS
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
1	2,871	3,000	3,000	3,000	0,504	0,500	0,782	0,893	0,781	0,882	1,504	2,500	0,3821
2	2,871	3,000	3,000	3,000	0,000	0,000	0,000	2,893	3,781	3,882	0,000	0,000	0,3184
3	2,871	3,000	3,000	3,000	0,504	0,500	0,782	0,793	0,681	0,682	1,700	2,600	0,3191
4	3,871	5,581	5,600	5,000	0,504	0,500	0,782	3,871	5,581	5,600	5,000	0,500	0,3879
5	3,871	5,581	5,600	5,000	0,504	0,500	0,782	3,871	5,581	5,600	5,000	0,500	0,3979
6	4,871	5,781	5,800	5,500	0,504	0,500	0,782	3,871	5,581	5,600	5,000	0,500	0,4048
7	4,871	5,781	5,800	5,500	0,104	0,100	0,150	3,871	5,581	5,600	5,000	0,100	0,3987



**Figura 5.11.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações do índice de área foliar mensal (IAF).

Com base na tabela 5.12, constata-se que o conjunto de valores mais satisfatório à calibração deste parâmetro foi o sexto. Considerando-se que a semeadura desta safra ocorreu em novembro de 2008, sabe-se que nos meses de janeiro, fevereiro e março a

cultura já se encontra em um estágio bem desenvolvido. Por esta razão nestes meses adotou-se valores maiores para o índice de área foliar. A colheita foi realizada na metade de abril, o que ocasiona um decaimento brusco no IAF, mas por ter sido realizada somente na metade do mês, optou-se por manter um elevado valor de IAF, pois se pode atribuir apenas um valor representativo de cada mês. A semeadura da aveia preta ocorreu apenas na metade do mês de junho, por esta razão manteve-se valores baixos, durante este mês e o mês de maio que representou o período de pousio e como a aveia teve de ser replantada em julho, para este mês também se adotou valores mais baixos. A partir do mês de agosto adotaram-se valores mais elevados, tendo em consideração o estágio de crescimento da aveia nestes períodos. Sua colheita foi realizada em novembro e dezembro manteve-se com valores baixos considerando parte do mês ocorreu o pousio e na outra parte a semeadura.

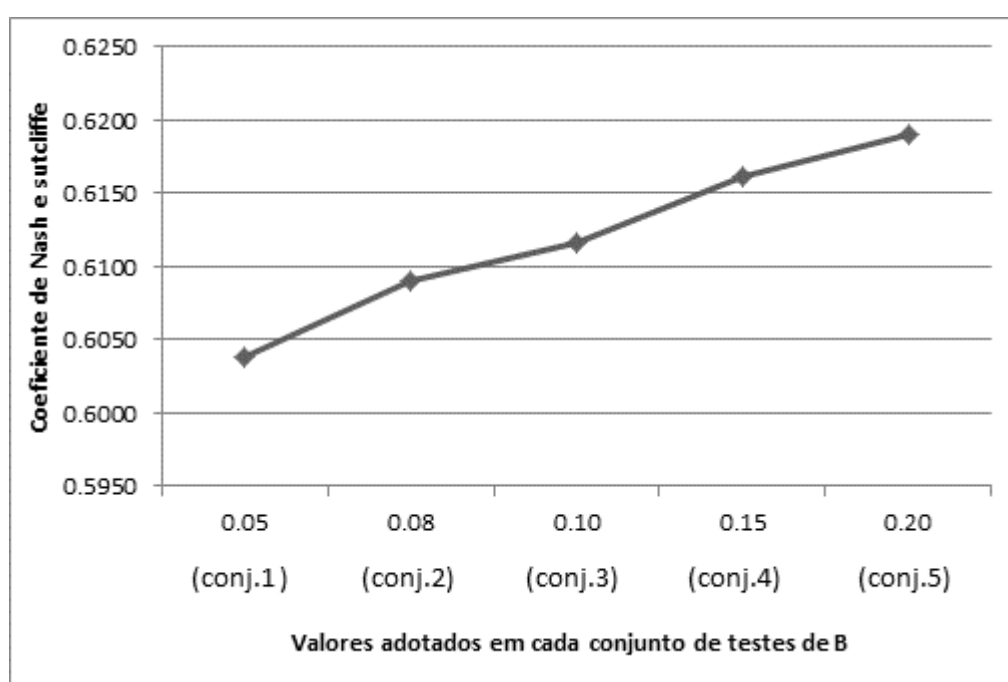
O índice de área foliar está diretamente relacionado à fase de desenvolvimento que a cultura se encontra. O IAF acaba determinando e controlando tanto a interceptação de água e de radiação, quanto as trocas de água e dióxido de carbono com a atmosfera, constituindo-se como um componente fundamental para o ciclo biogeoquímico (Breda *et al*, (2003) *apud* Gomes, *et al* (2009)).

Em análise à figura 5.11 e considerando-se que o período adotado para a validação da calibração refere-se ao estágio de floração da soja, percebe-se porque o melhor resultado para NS foi obtido com o conjunto número 6, onde se adotou os maiores valores para os meses de janeiro a abril (referentes à soja) e para os meses de agosto a novembro (referentes à aveia), enquanto que para os meses de pousio e semeadura não foram adotados valores tão baixos, uma vez que, mesmo estando em pousio, ainda assim pode ocorrer o crescimento de vegetação que pode contribuir de forma mínima com este índice.

Observa-se, ainda, que os conjuntos 2 e 3 apresentaram os piores valores de NS, isto pode estar relacionado ao fato de terem sido considerados valores muito baixos em meses que em outros conjuntos foram atribuídos valores maiores. Para finalizar sua calibração, fixou-se seus valores conforme àqueles adotados pelo conjunto 6 e passou-se ao próximo parâmetro que encontra seus valores demonstrados na tabela 5.13 e seu coeficiente de Nash e Sutcliffe na figura 5.12.

**Tabela 5.13.** Valores adotados na calibração do parâmetro de condutância estomática mínima ( $B$ ).

<i>Conjunto</i>	$B$ ( $mol.m^2.s^{-1}$ )	$NS$
1	0,05	0,6038
2	0,08	0,6090
3	0,10	0,6116
4	0,15	0,6162
5	0,20	0,6190



**Figura 5.12.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da condutância estomática mínima.

A condutância estomática é responsável pelas trocas de  $CO_2$  e água, ocorrentes através dos estômatos, sendo o mecanismo que controla o grau de abertura destes (Paiva, 2005). É através deste parâmetro que o modelo deduz a abertura e o fechamento dos estômatos, considerando a condutância mínima para que ocorra as trocas de  $CO_2$  e água.

Embasando-se na tabela 5.13 verifica-se que o melhor resultado, segundo o Coeficiente de Nash e Sutcliffe, foi obtido com o valor testado no conjunto 5, que adotou

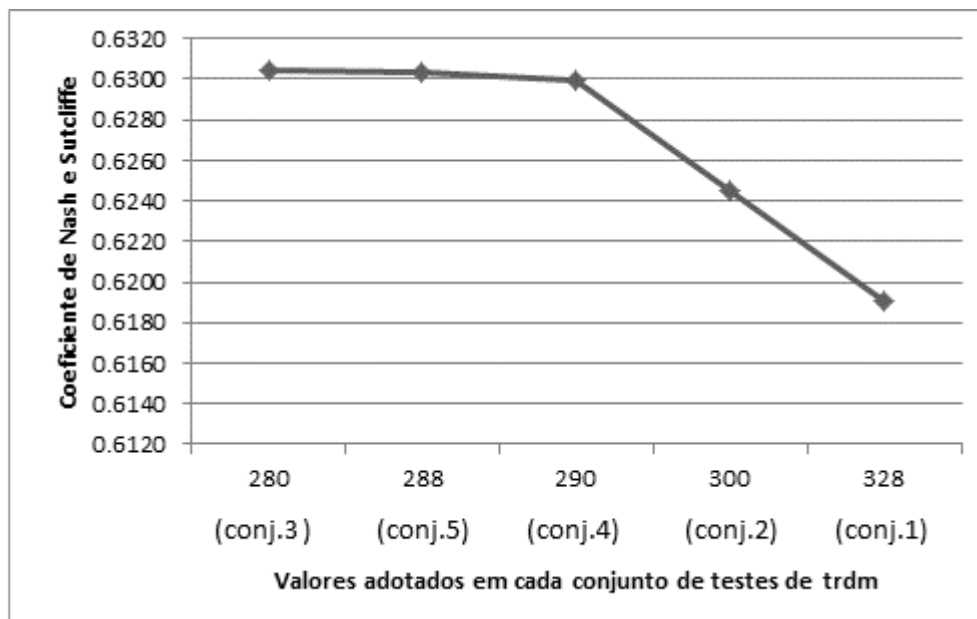
o valor de 0.2. A figura 5.12 permite visualizar o comportamento da medida de desempenho dada por NS, conforme os valores testados iam sendo variados.

Ressalta-se que, apesar da pequena variação do valor de NS entre os conjuntos testados, ainda assim, nota-se que houve uma tendência linear de crescimento. À proporção que se aumentava o valor adotado, maior tornavam-se os valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe. Diante da importância deste parâmetro com relação ao fluxo de CO<sub>2</sub>, esperava-se que seu resultado fosse mais significativo. Entretanto, acredita-se que sua calibração trouxe uma melhora à adequação do modelo mesmo que mínima e que valores muito pequenos, reduzem a capacidade mínima de abertura dos estômatos presumida pelo modelo, prejudicando assim o desempenho da simulação dos fluxos, uma vez que este parâmetro regula a troca de CO<sub>2</sub> entre a vegetação e o ambiente. Encerrada esta calibração, fixou-se seu valor naquele indicado por NS e passou-se a calibrar o parâmetro seguinte.

Na tabela 5.14 são encontrados os valores adotados nos testes aplicados à calibração da temperatura crítica para a respiração foliar e a figura 5.13 mostra a sensibilidade ocorrida com relação à variação dos valores adotados.

**Tabela 5.14.** Valores adotados na calibração do parâmetro de temperatura crítica para a respiração foliar (*trdm*).

<i>Conjunto</i>	<i>trdm (K)</i>	<i>NS</i>
1	328	0,6828
2	300	0,6884
3	280	0,6943
4	290	0,6938
5	288	0,6941



**Figura 5.13.** Sensibilidade do coeficiente de Nash e Sutcliffe às variações da temperatura crítica para respiração foliar.

Todos os organismos interagem com seu ambiente físico através das trocas de energia. Segundo Elhringer ((1992), *apud* Tribuzy (2005)), a temperatura é de fundamental importância afetando toda atividade metabólica das plantas. É um dos fatores que afetam a atividade fotossintética uma vez que o vegetal procura adequar sua respiração foliar às condições do ambiente, alterando, assim as trocas gasosas ocorrentes. A assimilação de CO<sub>2</sub> nas plantas é o resultado de um conjunto de processos que são regulados por fatores intrínsecos e extrínsecos à planta.

A fotossíntese é um dos processos fisiológicos mais sensíveis ao calor, visto que temperatura entre 35 °C e 45 °C tendem a inibir a taxa fotossintética (Berry e Björkman (1980) *apud* Tribuzy (2005)). Considerando-se que a soja pertence à classe de plantas C<sub>3</sub>, sabe-se que elevadas temperaturas afetam consideravelmente seu rendimento quântico<sup>6</sup>.

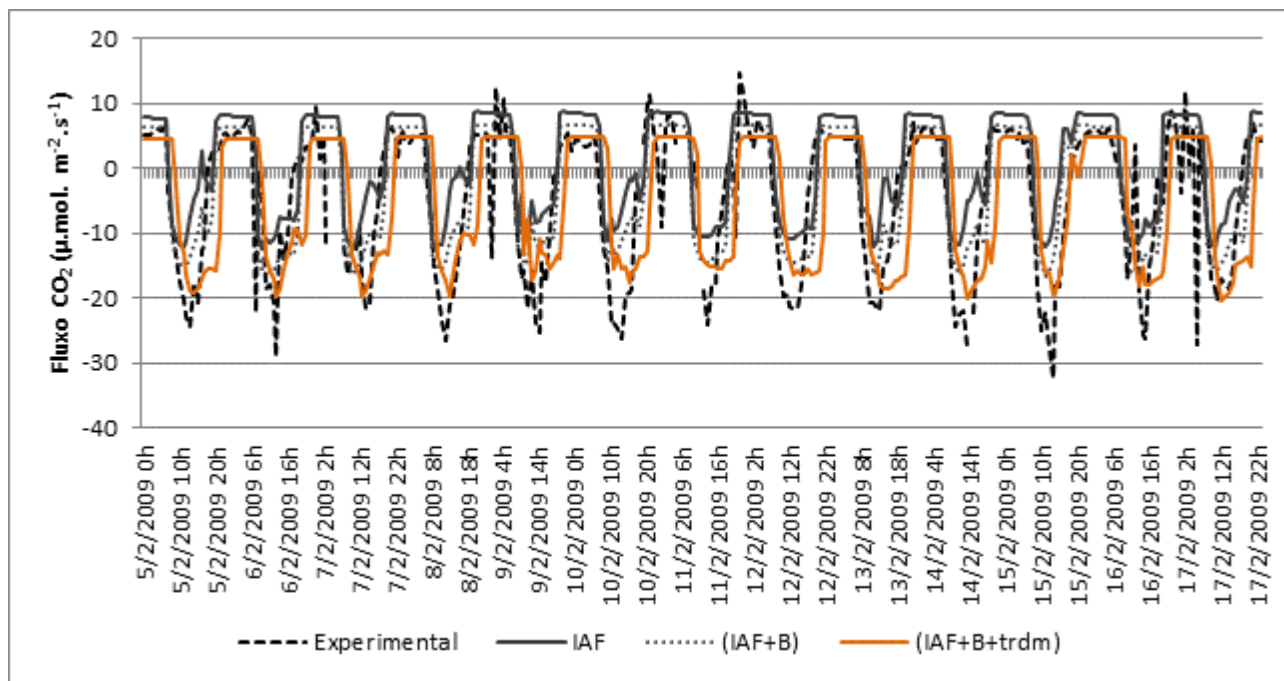
A tabela 5.14 traz os valores testados na calibração do parâmetro de temperatura crítica para a respiração foliar (*trdm*). Observando-a, constata-se que o valor adotado no conjunto 3 representou o melhor valor expresso por NS, apesar deste ter sofrido pouca variação entre os conjuntos testados.

<sup>6</sup> Rendimento quântico equivale ao número de moles de CO<sub>2</sub> absorvido pelo número de fótons captado (Casaroli et al, 2007)

Avaliando-se a figura 5.13, é possível verificar que, mesmo a variação do coeficiente de Nash e Sutcliffe ter sido mínima entre os conjuntos adotados na calibração, ocorre certa tendência relacionada à variação dos valores atribuídos ao parâmetro, em que valores mais elevados resultaram num NS mais baixo, enquanto o menor valor, adotado no conjunto 3, resultou em uma melhora na medida de desempenho. Presume-se, portanto que, mesmo que este parâmetro tenha representado uma variação mínima da medida de desempenho, as temperaturas menos elevadas adequaram-se mais a sua calibração, pois ocasionam menos alterações na respiração foliar o que reflete na simulação dos fluxos.

As calibrações dos parâmetros deste módulo constituem fundamental importância, pois auxiliam na determinação da assimilação de CO<sub>2</sub> e da condutância estomática presumidas pelo modelo. Contudo, verificou-se que dentre os três parâmetros testados, o índice de área foliar demonstrou maior sensibilidade à adequação desta sub-rotina, visto que ocorreu maior variação dos coeficientes de Nash e Sutcliffe entre seus conjuntos de valores testados. O mesmo não foi observado nos demais parâmetros, cuja variação de NS foi mínima entre os conjuntos. No entanto, a temperatura crítica para a respiração foliar, embora não tenha apresentado tanta variação entre as medidas de desempenhos relacionadas aos seus conjuntos de teste, ainda assim, trouxe um incremento significativo ao coeficiente de Nash e Sutcliffe referente à simulação final, efetuada após a calibração de todos os parâmetros. Esta melhoria no NS trazida com a calibração de (*trdm*) está diretamente relacionada à influência que este parâmetro exerce com relação ao desempenho da atividade fotossintética, sendo que esta por sua vez está relacionada à assimilação de CO<sub>2</sub>, influenciando nos fluxos deste.

A figura 5.14 demonstra a variação do fluxo de CO<sub>2</sub> experimental com relação a estes fluxos simulados após a calibração de cada um dos parâmetros deste módulo. Avaliando-a é possível observar que houve uma melhora na adequação destes fluxos simulados com relação ao observado, lembrando que a cada parâmetro calibrado, todos os anteriores (inclusive aqueles referentes aos demais módulos) já haviam sido fixados em seu melhor valor.



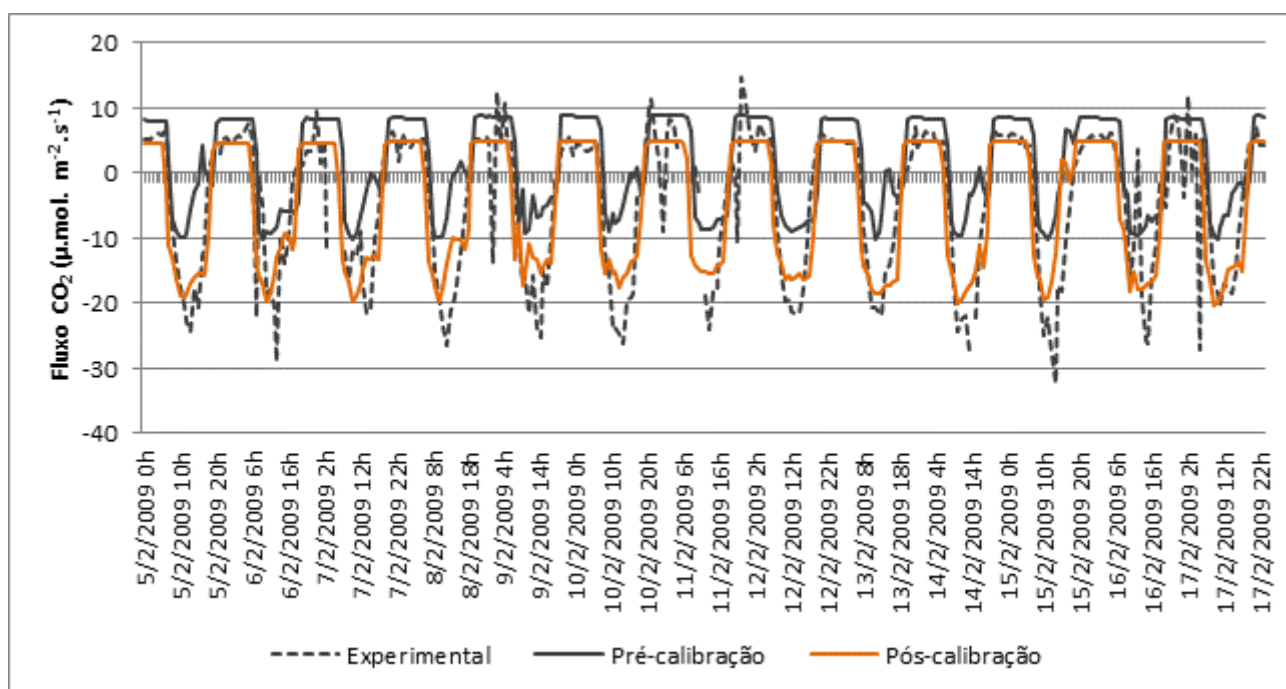
**Figura 5.14.** Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> experimental e os simulados após a calibração sequencial dos parâmetros do módulo de fotossíntese e condutância estomática, cujos valores foram fixados ao longo do processo.

A calibração dos módulos não foi realizada em todos os parâmetros a eles pertencentes. Optou-se por calibrar aqueles que obtiveram maiores valores referentes à medida de desempenho dada por NS. Para esta conclusão realizou-se previamente um breve teste com diversos parâmetros do modelo, obtendo-se para cada um deles, um valor referente ao coeficiente de Nas e Sutcliffe, e a partir deste coeficiente selecionou-se os parâmetros que seriam calibrados neste estudo. Como análise final do processo de calibração, pode-se dizer que dentre os parâmetros, considerando-se todos os módulos, aqueles que exerceram maior influência na adequação dos fluxos de CO<sub>2</sub> simulados ao fluxo experimental, foram: altura da base do dossel ( $Z_1$ ), altura do topo do dossel ( $Z_2$ ), fração de cobertura vegetal ( $V$ ), porosidade do solo ( $\theta_s$ ), índice de área foliar (IAF) e temperatura crítica para respiração foliar ( $trdm$ ). Ressaltando-se que ( $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $V$ ) tratam dos parâmetros morfológicos referentes ao módulo aerodinâmico; ( $\theta_s$ ) refere-se à propriedade física do solo, trabalhada no módulo de difusão hidráulica do solo; enquanto (IAF e  $trdm$ ) referem-se ao módulo de fotossíntese e condutância estomática



mínima, onde o primeiro representa um parâmetro variante com o tempo e o segundo é um parâmetro fisiológico.

Para uma avaliação qualitativa da importância da calibração do modelo, plotou-se a figura 5.15 que exibe um comparativo entre o fluxo de CO<sub>2</sub> experimental, o fluxo de CO<sub>2</sub> que foi simulado, mantendo-se os valores *default* referente aos parâmetros de cada módulo, conforme Sellers *et al* (1996b) (simulação pré-calibração) e os fluxos simulados após a calibração dos parâmetros tratados anteriormente (simulação pós-calibração).



**Figura 5.15.** Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> experimental e os simulados antes da calibração e após a calibração dos parâmetros.

Avaliando-se a figura 5.15, verifica-se que a calibração resultou em um melhor ajuste do fluxo de CO<sub>2</sub> simulado, quando comparado ao obtido experimentalmente. Isto é perceptível ao se avaliar a diferença entre os comportamentos dos fluxos simulados antes do processo de calibração e após este. Contudo, mesmo obtendo uma melhoria significativa (conforme indicado pelo coeficiente de Nash e Sutcliffe que se encontram expressos na tabela 5.14), ainda assim, o modelo tende a subestimar os valores dos fluxos. Durante o ciclo diurno os valores foram mais subestimados que aqueles que representam o ciclo noturno, cujos fluxos simulados acompanharam melhor o observado.

**Tabela 5.15.** Coeficiente de Nash e Sutcliffe referente às simulações antes da calibração (pré-calibração) e após este processo (pós-calibração).

<i>Desempenho do modelo na simulação do fluxos de CO<sub>2</sub></i>	<i>NS</i>
Pré-calibração	0,29
Pós-calibração	0,69

Observando-se a tabela 5.15, constata-se que apesar de terem sido calibrados apenas alguns parâmetros do modelo, ainda assim esse processo permitiu que se obtivesse um ganho expressivo na qualidade da simulação. Portanto, com a calibração do modelo SiB2 para a cultura de soja no município de Cruz Alta, tem-se uma substancial melhoria na estimativa dos fluxos em questão, sempre considerando que apesar da melhoria proporcionada pela calibração, ainda assim, o modelo tende a subestimar os fluxos de CO<sub>2</sub>, principalmente durante o período diurno.

Contudo, salienta-se que em processos de modelagem é difícil atingir valores perfeitos na adequação ao dado observado, desse modo, a partir da conclusão desta etapa, o modelo encontra-se mais adequado à área de estudo, estando pronto para a avaliação de seu desempenho na adoção dos dados de reanálise CFSR-NCEP como condições de contorno atmosféricas.

## **5.2 Avaliação da adoção do CFSR como condição de contorno inicial na simulação de fluxos de CO<sub>2</sub> pelo modelo SiB2.**

A reanálise do NCEP consiste da combinação de um modelo de previsão (CFS) e um sistema de assimilação de dados, obtidos a partir de diversas fontes. Estes dados foram implementados para uma climatologia de 30 anos, referente aos anos de 1979 a 2009. Em razão do seu período de abrangência, verifica-se a possibilidade de utilizar os dados de reanálise em estudos climatológicos. Igualmente é possível adotá-los no suprimento de dados meteorológicos, em regiões carentes de sua observação. Contudo, antes de sua utilização é necessário que seja realizada a avaliação de seu desempenho.

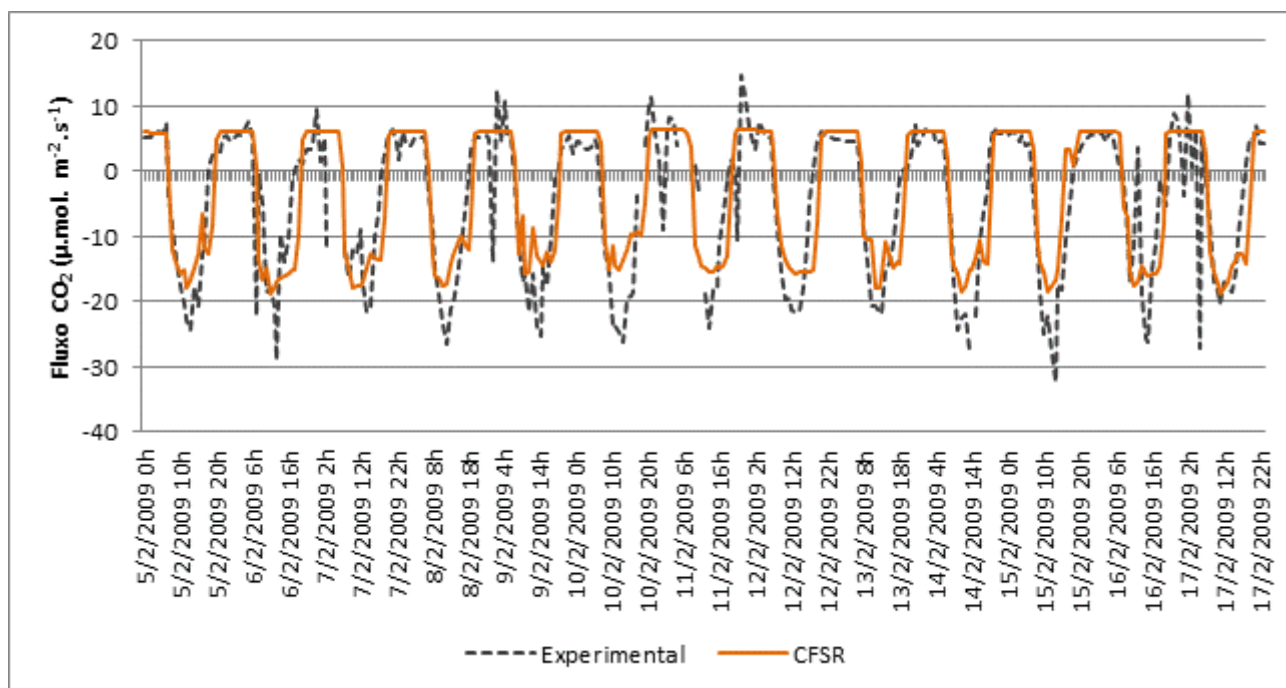
Neste estudo realizou-se a avaliação destes dados na obtenção de fluxos de CO<sub>2</sub> pelo modelo SiB2, sendo os resultados desta avaliação demonstrados a seguir.

Após a calibração de alguns parâmetros do modelo, obteve-se uma melhoria na representação dos fluxos de CO<sub>2</sub> simulados. Este procedimento foi necessário para adequar da melhor maneira possível à simulação à realidade observada, proporcionando maior conhecimento sobre o modelo e seu funcionamento, verificando os parâmetros mais sensíveis à simulação dos fluxos em estudo e assim, poder utilizar os dados do CFSR como condições de contorno iniciais no modelo para obtenção destes fluxos. Todos estes procedimentos auxiliaram na avaliação desta reanálise.

No que tange as condições iniciais, salienta-se que são fornecidas através de um arquivo em formato ASCII e representam o estado físico da atmosfera. São constituídas por variáveis de precipitação (mm), temperatura do ar (°C), pressão atmosférica (hPa), radiação de onda curta (W/m<sup>2</sup>) e velocidade do vento (m/s), que atuam como condições de contorno atmosféricas, utilizadas como forçantes de inicialização necessárias à execução do modelo.

Para a realização desta etapa, o arquivo utilizado inicialmente, com dados meteorológicos do INMET, foi substituído pelo arquivo montado com os dados do CFSR. Neste arquivo estão contidas as variáveis de precipitação (mm), pressão atmosférica de superfície (hPa), radiação incidente de onda curta (W/m<sup>2</sup>), temperatura do ar (°C) e velocidade do vento (m/s). A partir da elaboração do arquivo de entrada com as reanálises, foi efetuada a implementação do modelo na simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub>. A validação foi realizada com base no Coeficiente de Nash e Sutcliffe, medindo o grau de associação entre valores experimentais (observados) e os calculados, desta forma analisando o comportamento dos dados simulados após a inicialização do modelo com os dados CFSR.

A figura 5.16 traz um comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> obtidos experimentalmente e os simulados com a utilização da reanálise em questão.



**Figura 5.16.** Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> experimental e os simulados a partir da inicialização do modelo com dados de reanálise.

Segundo uma análise visual embasada na figura 5.16, verifica-se que as curvas que representam os fluxos simulados a partir da inicialização do SiB2 com dados do CFSR foram bem aproximadas daquelas que representam os fluxos obtidos pela torre micrometeorológica. Nesta avaliação, nota-se que os fluxos provenientes do modelo acompanham a curva daqueles obtidos por medições experimentais, representando de forma coerente tanto os períodos diurnos, caracterizado pelas taxas negativas da troca líquida de CO<sub>2</sub> (NEE), em razão da absorção deste pela cultura; quanto os períodos noturnos, onde ocorrem taxas positivas devidas ao predomínio do processo de respiração. Entretanto, mesmo acompanhando a curva do fluxo experimental, o simulado a partir da inicialização com o CFSR tendeu a subestimar os valores destes fluxos, principalmente no período diurno. Esta mesma característica foi observada na simulação pós-calibração.

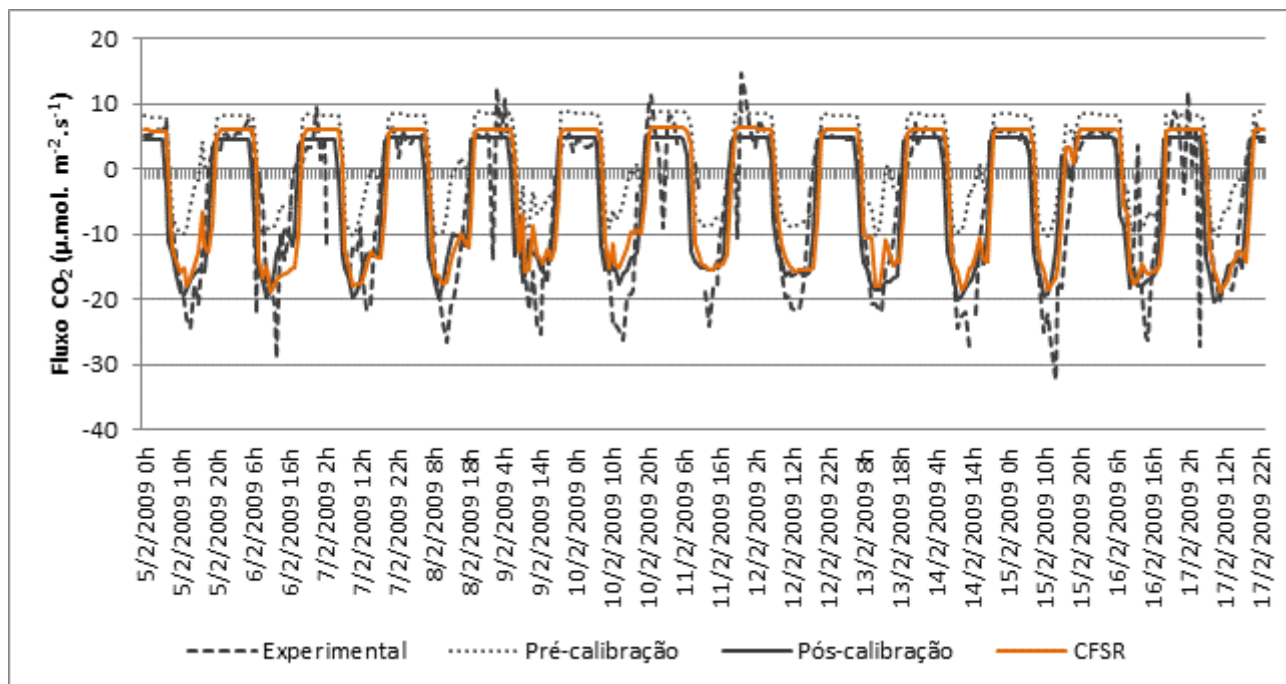
Em seguida são demonstrados, na tabela 5.16, os Coeficientes de Nash e Sutcliffe correspondentes às simulações pré-calibração, pós-calibração e CFSR, sendo este referente àquelas simulações realizadas com o uso da reanálise como variáveis de inicialização. Em análise a esta tabela, verifica-se que o valor de NS para a simulação CFSR foi de 0,64, o que não representa grandes variações com relação à simulação a partir da inicialização com dados meteorológicos experimentais (pós-calibração), cujo

valor de NS foi 0,69. Embora o desempenho desta reanálise de última geração tenha sido bom quando comparado à simulação com dados do INMET, convém ressaltar que o CFSR correspondeu a valores satisfatórios do Coeficiente de Nash e Sutcliffe apenas para o período utilizado na comparação com os fluxos experimentais (05 a 17 de fevereiro), o qual equivaleu ao período de floração da cultura de soja. Desse modo, torna-se possível apenas afirmar que para o período de floração, o CFSR correspondeu satisfatoriamente à simulação a partir da inicialização com dados meteorológicos observados, sendo considerada aceitável de acordo com seu NS para a simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub>. Para estender esta afirmativa aos demais períodos do ciclo da soja, será necessário efetuar esta análise baseada em outras datas.

**Tabela 5.16.** Coeficiente de Nash e Sutcliffe referente às simulações antes da calibração (pré-calibração), após a calibração (pós-calibração) e obtidos a partir da inicialização com dados de reanálise (CFSR).

<i>Desempenho do modelo na simulação do fluxos de CO<sub>2</sub></i>	<i>NS</i>
Pré-calibração	0,29
Pós-calibração	0,69
CFSR	0,64

A figura 5.17 trás um comparativo entre os fluxos simulados obtidos nos três momentos (pré-calibração, pós-calibração e CFSR) e aqueles obtidos experimentalmente a partir da torre micrometeorológica.



**Figura 5.17.** Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> experimental e os simulados em três momentos

Avaliando-se a figura 5.17, constata-se que ao longo de todo o processo o modelo manteve-se subestimando os valores dos fluxos simulados, principalmente nos períodos diurnos. Contudo, apesar desta característica, nota-se considerável melhora nos fluxos após realizado o processo de calibração, verificando-se também que a simulação com a adoção da reanálise CFSR representou bem os fluxos simulados. Destaca-se ainda que a simulação CFSR apresentou maiores valores de CO<sub>2</sub> para o período noturno, resultando em maiores valores da respiração noturna. E ao longo do período diurno manteve-se muito próxima da curva dos valores simulados Pós-calibração.

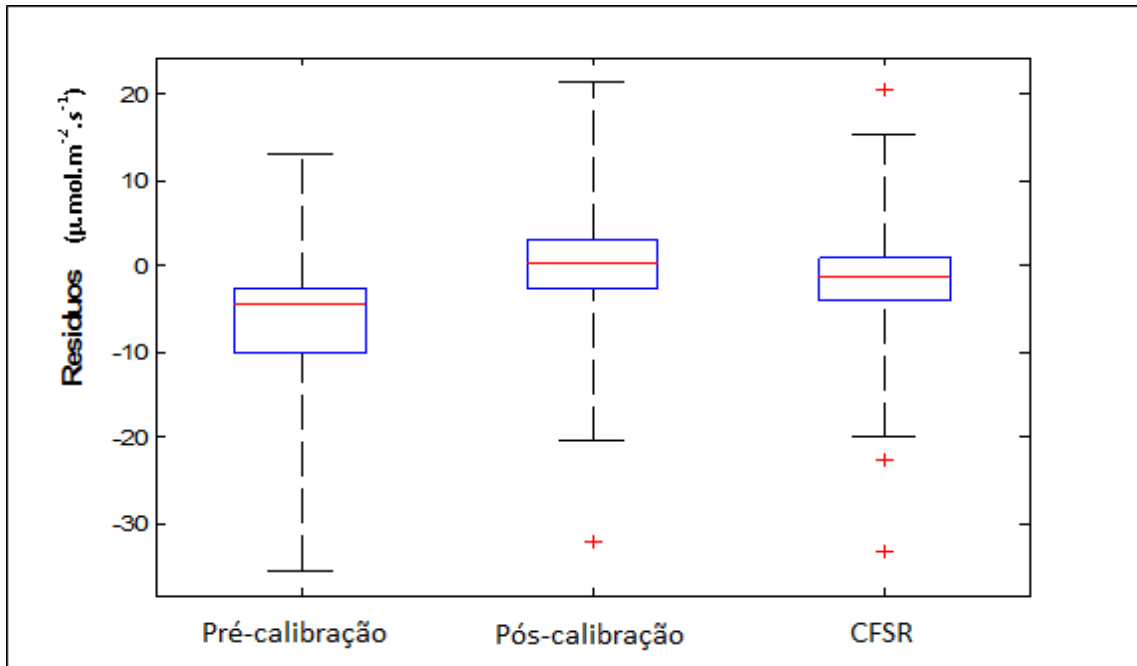
Por tais razões, constata-se que os fluxos de CO<sub>2</sub> simulados a partir da reanálise corresponderam bem aos fluxos obtidos experimentalmente. Verifica-se, portanto, que estes dados do CFSR podem ser utilizados em estudos de fluxos de CO<sub>2</sub> desenvolvidos em áreas onde não haja estações meteorológicas para o fornecimento das condições de contorno atmosféricas, ou ainda aplicada à simulação para regiões que não disponham de uma série muito longa de dados meteorológicos, aplicando-se também em estudos climáticos a cerca destes fluxos. Neste sentido, convém ressaltar que a calibração do modelo à região de estudo, faz-se necessária frente à adequação ao local e à obtenção de

resultados aceitáveis, destacando-se ainda que esta afirmativa aplica-se ao período avaliado durante todo o processo, o qual equivale ao estágio de floração da soja.

### 5.3 Análise de resíduos

Neste item serão analisados os resíduos das simulações realizadas antes e após a calibração e da simulação realizada a partir da adoção de dados de reanálise como condições de contorno para o modelo. Os resultados são apresentados na forma de diagrama de caixa. Para verificar se a metodologia proposta apresentou ganhos, os fluxos calculados foram comparados com aqueles obtidos a partir de uma torre experimental.

A figura 5.18 apresenta os resíduos das simulações pré-calibração, pós-calibração e CFSR, com referência ao dado experimental. Observa-se que a mediana da simulação com calibração e com CFSR mantiveram-se em torno de zero, o que representa que os resíduos mantiveram valores pequenos. Constata-se, ainda que nos gráficos (pós-calibração e CFSR) ocorre menor dispersão dos valores, quando comparado ao gráfico referente à simulação pré-calibração. A simulação com CFSR apresentou mais *outliers* que as demais, o que pode ser a representação de valores extremamente altos ou baixos com relação ao experimental. Em síntese, é possível verificar que de maneira geral a simulação em que se utilizaram os dados de reanálise manteve um comportamento semelhante àquela em que foi realizada a calibração dos parâmetros. Considerando-se que o modelo apresentou melhoria em seu desempenho após a calibração e considerando-se ainda que a simulação com CFSR não resultou em valores muito discrepantes com relação àquelas obtidos pós-calibração, confirma-se então, que os dados de reanálise utilizados nesta pesquisa podem ser utilizados no suprimento das condições de contorno atmosféricas, em simulações de fluxos de CO<sub>2</sub> com o modelo de superfície SiB2 para áreas onde ocorram carência de uma série mais completa ou até mesmo escassez de dados meteorológicos, lembrando que para o desempenho aceitável o modelo necessita ser adequado à área de estudo.



**Figura 5.18.** Resíduos do modelo de simulação dos fluxos de  $\text{CO}_2$  (diagrama de caixa). A linha horizontal no interior das caixas representa o percentil 50 (mediana), o final das caixas os percentis 25 e 75; o símbolo de cruz representa valores extremos.



# Capítulo 6

## 6.1 Conclusões

Esta pesquisa buscou avaliar o comportamento dos fluxos de CO<sub>2</sub> simulados pelo modelo de superfície SiB2, a partir da adoção dos dados de reanálise CFSR-NCEP como condições de contorno atmosféricas. O estudo foi aplicado em um sítio experimental de soja localizado em Cruz Alta no Rio Grande do sul. A validação dos resultados obtidos compreendeu a análise estatística dos parâmetros simulados em comparação com os dados observados obtidos pela torre micrometeorológica localizada sobre a área do cultivo. Para esta análise foi utilizado o Coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS) na determinação do grau de associação entre os valores, observado e os simulado.

Antes de realizar a simulação com a reanálise, foi necessário efetuar a calibração do modelo para a área de estudo. Este procedimento foi desenvolvido de forma manual, respeitando a ordem sequencial das sub-rotinas ou módulos do modelo, sendo testados individualmente os parâmetros referentes a cada módulo.

No primeiro módulo, aerodinâmico, foram testados os parâmetros morfológicos que tratam da altura da base do dossel ( $Z_1$ ), altura do dossel ( $Z_2$ ), fração de cobertura vegetal ( $V$ ) e distribuição do ângulo foliar ( $X_L$ ). Em seguida calibrou-se o módulo de transferência radiativa, testando-se o parâmetro de reflectância da folha viva no visível ( $\alpha_v, l$ ). O terceiro módulo calibrado foi o de difusão hidráulica do solo, e os parâmetros trabalhados foram porosidade do solo ( $\theta_s$ ), profundidade individual das camadas ( $zdepth$ ) e expoente de umidade ( $bee$ ). Finalizando o processo de calibração, testou-se

os parâmetros que tratam do índice de área foliar (IAF), condutância estomática mínima (B) e temperatura crítica para a respiração foliar (*trdm*). Dentre os parâmetros testados, aqueles que apresentaram maior influência na adequação do fluxo simulado ao observado foram:  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $V$ ,  $\theta_s$ , IAF e *trdm*.

No que se refere ao processo de calibração, verificou-se que este resultou em um melhor ajuste do fluxo de  $\text{CO}_2$  simulado, quando comparado ao obtido experimentalmente. No entanto, mesmo obtendo-se uma melhoria significativa, conforme indicado pela medida de desempenho (NS), ainda assim, o modelo tende a subestimar os valores dos fluxos. Durante o ciclo diurno os valores foram mais subestimados que aqueles que representam o ciclo noturno, cujos fluxos simulados acompanharam melhor o observado. Contudo, verifica-se que de modo geral a calibração promoveu melhor adequação do modelo à área de estudo.

Findado o processo de calibração, partiu-se para a adoção dos dados de reanálise CFSR como condição de contorno atmosférica, necessária à inicialização do modelo. Suas variáveis foram adotadas em substituição às variáveis meteorológicas obtidas pela estação do INMET. Para tanto, foi elaborado um arquivo de entrada em formato ASCII, no qual estavam contidas variáveis horárias de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), pressão atmosférica de superfície (hPa), precipitação (mm), radiação de onda curta incidente ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e velocidade do vento (m/s).

Com relação ao resultado da simulação, a partir da adoção do CFSR como variável de inicialização, verificou-se que as curvas que representam os fluxos simulados foram bem aproximadas daquelas que representam os fluxos obtidos pela torre micrometeorológica. Entretanto, mesmo com a adoção desta reanálise, o modelo continuou subestimando os fluxos simulados, principalmente no período diurno.

Para a determinação do grau de associação entre os valores do fluxo de  $\text{CO}_2$  simulados com CFSR e aquele obtido experimentalmente, adotou-se o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS), o qual resultou no valor de 0,64. Quando comparado à medida de desempenho obtida na simulação Pós-calibração (0,69), nota-se não houve grandes variações entre as simulações. Esta diferença encontrada entre os fluxos simulados Pós-calibração e CFSR, pode estar relacionada às diferenças existentes entre as resoluções

espaciais de cada fonte de dados, visto que as variáveis do INMET tem uma resolução pontual, enquanto o CFSR possui resolução de 0,5°.

Considerando-se que a calibração do modelo adequou-o à área de estudo e apreciando-se, ainda, que os valores de NS estão dentro do aceitável, constata-se que a adoção desta reanálise no suprimento das condições de contorno atmosféricas, foi satisfatória para o período avaliado, o qual equivale ao estágio de floração da cultura de soja.

## **6.2 Perspectivas para trabalhos futuros**

Um trabalho bastante relevante seria o de estender a série de dados do CFSR-NCEP para um período mais longo com a finalidade de se obter uma climatologia dos fluxos de CO<sub>2</sub> sobre o cultivo de soja. Se isto for aplicado ao sítio experimental de Cruz Alta o período a ser adotado deverá ser de 1985 a 2009, uma vez que as lavouras experimentais da FUNDACEP tiveram início no referido ano, o que não constituiria uma climatologia tendo em vista que os anos adotados seriam inferiores ao período de 30 anos. Assim, surge outra ideia que seria aplicar a série total da reanálise (30 anos) para alguma área do Estado que tenha dados de cultivo de soja para este período total.

Outro trabalho interessante seria o de realizar a calibração deste modelo para outros cultivos agrícolas visando à obtenção dos fluxos de CO<sub>2</sub> também utilizando os dados de reanálise CFSR-NCEP, com o intuito de verificar como esta reanálise se comporta na avaliação dos referidos fluxos em outros tipos de cultivos.

Por fim seria interessante verificar o uso da parametrização de superfície SiB do modelo BRAMS, com o intuito de se obter prognósticos de fluxos de CO<sub>2</sub> para determinados sistemas de cultivo, sendo que a adoção deste modelo regional possibilitaria a realização de um downscaling aumentando a resolução dos dados de entrada (CFSR) para 1km, podendo gerar correlações melhores quando comparados aos dados experimentais.

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA, T.S. **Respostas espectrais da soja sob diferentes condições hídricas e de preparo do solo**. 2008. 100f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ALVES, S.J. **Dinâmica de crescimento de aveia preta sob diferentes doses de nitrogênio e ajuste de modelo matemático de rendimento potencial em função de parâmetros climáticos**. 2002. 71f. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Agronomia Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

BERLATO, M.A., FONTANA, D.C. Variabilidade interanual de chuva pluvial e rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.119-125, 1999.

BERRY, J.A. & BJORKMAN, O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. **Annual Review of plant Physiology**, v.31, p.491-453, 1980.

BONAN, G. Ecological climatology: concepts and applications. **Cambridge University Press**, 678 p., 2002.

BREDA, N.J.J. et al. Comparisons of long-term soil water storage behavior under pasture and forest in three areas of Amazonia. In J>H>C. Gash, C.A.Nobre, J.M.Robers,

R.L.Victoria (eds) **Amazon Deforestation and Climate** . Chinchester : John Wiley, p.57-77, 1996.

CASAROLI, D. et al. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja-ums revisão. **Revista da FZVA**. Uruguaiana , v.14, n.2, p.102-120, 2007.

COELHO, M.M. **Estudo da respiração do solo em floresta de transição no sudoeste da Amazônia**. 2005. 51f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em física e meio ambiente, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Departamento de Física, Universidade Federal do Mato Grosso. Cuiabá, 2005.

COLLATZ, G.J. et al. **SiB2:Documentation and Fortran code listing**. Version 1.0. Biospheric Sciences. December, 1993

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica para grandes bacias**. 2001. 270f. Tese de doutorado–Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos. Safra 2010/2011**. Quarto levantamento, janeiro 2011. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília. Conab, 2011.

COSTA, J.A. **Cultura de soja**. Porto Alegre, RS, I. Manica, J.A.Costa, 1996. 233p

DIAS, A.A.C. **Procedimentos de medição e aquisição de dados de uma torre micrometeorológica em Sinop-MT**. Dissertação de mestrado. 2007, 75p. Instituto de Ciências Exatas e da Terra - Universidade Federal do Mato Grosso.2007.

DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. **Efeitos da água no rendimento das culturas**. 1994, . 306 p Tradução de H. R. Gheyi; A. A. de Souza; F. A. V. Damasceno; J. F. de Medeiros (Estudos da FAO: Irrigação e drenagem, 33). Universidade Federal da Paraíba. 1994.

DURÃES, F.O.M. et al.(2002) Base fisiológica da relação entre rendimento final e fotossíntese do milho. **Disponível em:** <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/487333/1/Basefisiologica.pdf>. Acesso em 27 de junho de 2012

ELHERINGER, J.R. Temperature and energy budgets. In: Pearcy, R.W., Elheringer, J.R., Mooney, H.A. , Rundel, P.W. (Ed). **Plant Ecophysiological ecology**, New York: Chapman & Hall, cap.8, p.117-135, 1992.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA Clima Temperado. Pelotas, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2006. **Disponível em:** [http://www.cpact.embrapa.br/eventos/2006/reuniao\\_tecnica/indicadores\\_soja2006.pdf](http://www.cpact.embrapa.br/eventos/2006/reuniao_tecnica/indicadores_soja2006.pdf). Acesso em: 20 de agosto de 2011

ESCOBAR, L.F. et al. Fluxos de CO<sub>2</sub> na cultura de soja sob sistema de plantio direto avaliado pelo método de covariância dos vórtices. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO. **Anais..** Gramado. 2007

ESCOBAR, L.F. **Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo no Planalto Médio do Rio Grande do Sul.** 2008. 104f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo. Universidade Federal de Santa Maria. 2008.

FARIAS, J.R.B. et al. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FONTANA, D.C. et al. Balanço de radiação da soja em região subtropical. **Revista Brasileira de Pesquisa Agropecuária.** Brasília, v 26(3), 411-418, 1991.

GOMES, J.B et al. Índice de área foliar, produção de biomassa e fluxos de CO<sub>2</sub> em uma pastagem no sudoeste da Amazônia. In. XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, **Anais..**Belo Horizonte, 2009002E

HANAN, N.P. et al. Testing a model of CO<sub>2</sub>, water and energy Exchange in Great Plains tallgrass Prairie and wheat ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology** 130, 59-69. 2005.

HEIFFIG, L.S. et al. Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. **Bragantia: revista de ciências agrônômica**, Campinas, v.65, p.285-295. 2006

KRYSAKOVA, V. et al. Development and test of a spatially distributed hydrological water quality model for mesoscale watersheds. **Ecol.Model.**, 106, 261-289, 1998.

KUCHARICK, C.J.; BRYE, K.R. Integrated Biosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer. **Journal of Environmental Quality**, v.32, 247-268, 2003.

LLOPART, M.P. **Calibração do modelo SiB2 em módulos sequenciais para a Floresta Amazônica**. 2009, 90p. Dissertação de mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. 2009.

MAGHETTINI, M. & PINTO, E.J.A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte, Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 552p. 2007

MONTEIRO, J.E.B.A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, D.F., INMET, 2009. 530 p.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2ed. São José dos Campos, UFV, 2004, 250p.

MOSIER, A.R. et al. Mitigating agricultural emissions of nitrous oxide. **Climate Change** 40, 7-39, 1998.

PAIVA, A.S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Revista de Engenharia Agrícola**. N.1,V.25, 2005.

QUADRO, M.F.L. et al. Avaliação do transporte de umidade e precipitação associada à ZCAS no verão do HS através da nova geração de reanálises. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA (CBMET), 2010, **Anais..** Belém do Pará: CPTEC, 2010.

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL.(34:2006:Pelotas) **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2006/2007.** Pelotas, EMBRAPA Clima Temperado, 237 p, 2006

RODRIGUES, C.P. **Estudo de fluxos de carbono utilizando geotecnologias.** 2010. 93f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ROSSETO, C.A.V & NAKAGAWA, J. Época de colheita e desenvolvimento vegetativo da aveia preta. **Scientia Agricola**, v.58, n.4, p.731-736, 2001.

SAHA, S., et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 1015-1057. 2010.

SALDANHA, C. B. **Previsão de longo prazo da umidade do solo na bacia do rio Uruguai.** 2009.161 f. Tese de doutorado (Doutorado em Hidrologia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SALINET, L.H. **Avaliação fisiológica e agronômica de soja geneticamente modificada para maior tolerância à seca.** 2009. 76f. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

SANTOS, O.S.(Org.). **A cultura de soja – 1. Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná.** Rio de Janeiro, RJ, Globo, 1988. 299p.

SELLERS, P.J et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of the atmospheric sciences.* **American meteorological society.** V.43, NO.6, 1986, p.505-531.



SELLERS, P.J et al. Calibration simple biosphere model (SiB) for Amazon Tropical Forest using field and remote sensing data. Part I. Average calibration with field data. **Journal of Applied Meteorology**. 1989 28: 727-759.

SELLERS, P.J., et al. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. **J. Climate**. 9, 676-705. 1996a.

SELLERS, P.J., et al. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. **J. Climate**. 9, 706-737. 1996b.

SETTER, T.L. Partitioning of carbon among competing sinks. In: Shannon, J.C; Knievel, D.P., Boyer, C.D. (Ed) Regulation of carbon and nitrogen reduction and utilization in maize. Rockville: **American Society of plants Physiologists**. 261-271. 1986.

SMITTH, P. et al. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Agriculture. In.: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), **Climate Change** 2007: Mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

SOTTA, E.D. **Fluxo de CO<sub>2</sub> entre o solo e a atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia Central**. 1998, 99f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do Convênio INPA/UA. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade da Amazônia. Manaus, 1998.

STRECK, E.V. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2ed. rev. e ampl. EMATER, 2008, 222p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Tradução Eliane Romanato Santarém (et al). 4 ed. Porto Alegre. Artmed. 2009. 848p.

TRIBUZY, E.S. 2005. **Variações da temperatura foliar do dossel e o seu efeito na taxa assimilatória de CO2 na Amazônia Central**. Tese de doutorado, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2005.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. – USDA. 2011. **Disponível em:** < <http://www.fas.usda.gov> >. Acesso em: 11 de abril de 2012

VERNETTI, F.J. **Soja: genética e melhoramento**. Campinas, SP, Fundação Cargill, 1983. 2v

WEBLER, G. **Validação do modelo Agro-Ibis para um sítio experimental de soja no Rio Grande do Sul**. 2011. 60f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2011.

YORINORI, J.T. **Cancro da haste da soja: epidemiologia e controle**. EMBRAPA-CNPSO, 75p, Londrina, PR, 1996.

# Apêndice A

## **Avaliação dos métodos de estimativa das variáveis meteorológicas**

O conhecimento a cerca das variáveis meteorológicas é fundamental para o desenvolvimento de diversos estudos de modelagem, seja de âmbito atmosférico hidrológico ou de superfície. A adoção de tais dados permite que se obtenham as características climáticas da região em estudo, análise imprescindível para a compreensão das dinâmicas físicas ocorrentes em tal ambiente.

Em estudos destinados à modelagem de fluxos de superfície, estes dados são fundamentais na determinação das condições de contorno atmosféricas, sendo esta uma condição necessária à inicialização do processo de modelagem. Com vistas a fornecer subsídios para que modelos de superfície definam o estado da atmosfera, diversas variáveis meteorológicas são empregadas, entre elas: precipitação (mm), temperatura do ar (°C), pressão atmosférica (hPa), velocidade do vento (m/s), radiação incidente ( $W;m^2$ ), entre outros.

No entanto, a problemática que envolve estes dados consiste na escassez de estações de monitoramento, uma vez que diversas regiões não dispõem de uma estação meteorológica para a medição de tais parâmetros. Outro problema observado, este em regiões onde ocorre o monitoramento, relaciona-se à falta de uma série de dados mais completa e longa, o que prejudica o desenvolvimento de diversos estudos.

Com vistas a buscar soluções para os problemas que envolvem a escassez destes dados, alguns centros meteorológicos desenvolveram uma fonte alternativa dos mesmos. Neste sentido foi criada a reanálise, que são dados que provém de uma

climatologia desenvolvida a partir da combinação de um modelo de previsão e um sistema de assimilação de dados (Quadros *et al*, 2010).

O projeto de reanálise do NCEP (*National Centers for Environment Predictions*), denominado de CFSR (*Climate Forecast System Renalysis*) usa um sistema avançado de análise/previsão para reconstruir medidas climáticas sobre uma grade espacial regular de 1979 a 2009. A estrutura dos dados é baseada na combinação de um conjunto de observações de satélites geoestacionários, radiossonda, observações de superfície e observações oceânicas (Saha *et al*, 2010).

Com o intuito de verificar o comportamento simultâneo das variáveis obtidas pelo método tradicional (INMET) e aquelas obtidas a partir de bases alternativas (CFSR), foi realizada uma abordagem exploratória. Esta abordagem foi aplicada a cada uma das variáveis adotadas na inicialização do modelo e permitiu que se visualizasse o grau de associação e a tendência de variação conjunta que apresentam.

Ressalta-se que a avaliação foi efetuada apenas para o período de 05 a 17 de fevereiro de 2009, uma vez que este foi o período adotado na validação do processo de calibração do modelo de superfície SiB2, conforme capítulo 4. As variáveis analisadas foram: precipitação (mm), temperatura do ar (°C), pressão atmosférica (hPa), velocidade do vento (m/s) e radiação de onda curta incidente ( $W/m^2$ ). Esta associação encontra-se demonstrada através de um diagrama de dispersão (figura A1).

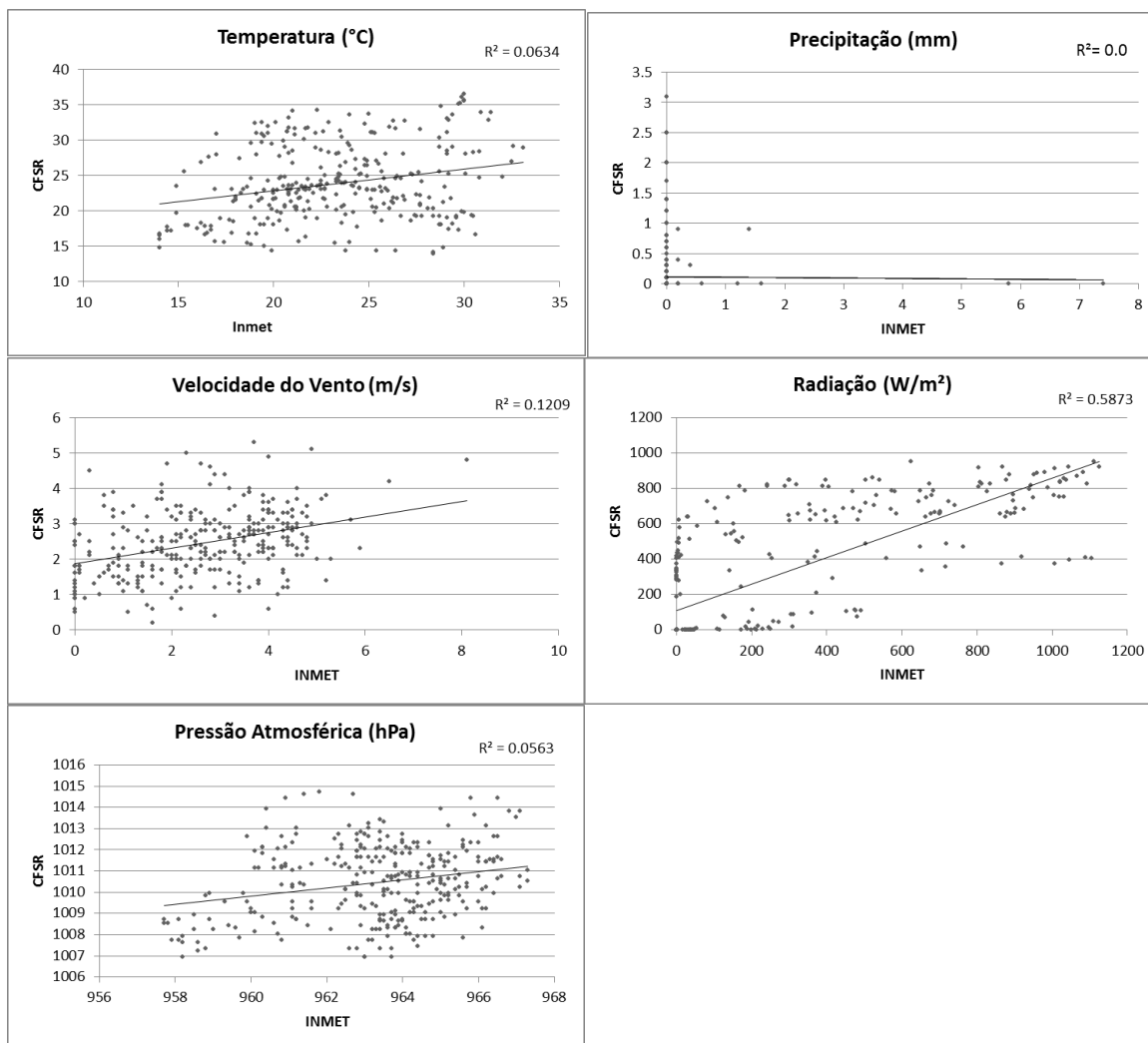


Figura A1. Relação entre as variáveis obtidas a partir da estação meteorológica do INMET e as variáveis obtidas a partir da reanálise CFSR-NCEP.

A medida da variação conjunta observada no diagrama de dispersão é a correlação entre duas variáveis. Essa medida é realizada numericamente por meio dos coeficientes de correlação que representam o grau de associação entre duas variáveis. Nesta abordagem adotou-se o Coeficiente de Pearson que apresentará uma correlação linear quando os pontos do diagrama de dispersão se aproximam de uma reta, sendo que este varia de -1 a 1 e é dado pela equação:

$$\rho_{x,y} = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y}$$

onde  $\sigma_{x,y}$  é a covariância entre as variáveis X e Y;  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  são os desvios-padrão das variáveis X e Y, respectivamente.

Esta correlação pode ser positiva (para valores crescentes de X, há também uma tendência para valores crescentes em Y) ou negativa (para valores crescentes em X, a tendência é serem observados valores decrescentes em Y). É importante salientar que variáveis altamente correlacionadas não apresentam necessariamente uma relação de causa e efeito, uma vez que a correlação representa simplesmente a tendência que as variáveis apresentam quanto sua relação conjunta (Maghettini, 2007). Desse modo, à medida de correlação não indica necessariamente que há evidências de relações causais entre duas variáveis. Quando duas variáveis (X e Y) são estatisticamente independentes, o coeficiente de correlação linear é igual a zero.

Em análise à figura A1, verifica-se que dentre as cinco variáveis analisadas apenas a radiação apresentou uma correlação linear mais significativa, sendo que, neste caso, 59% da variância total da variável dependente (CFSR), são explicados pela variável independente (INMET). Nos demais casos o coeficiente de determinação assumiu valores muito baixos, indicando que a variância de suas variáveis dependentes é pouco explicada pela variável independente, ou seja, estatisticamente são consideradas independentes.

Desse modo, verifica-se que apenas a radiação de onda curta incidente apresenta correlação entre o dado de reanálise CFSR e o dado observado INMET. Com relação à velocidade do vento apenas 12% da variância do CFSR é explicada pela variável do INMET, sendo a maior independência atribuída à precipitação, cuja relação de dependência é inexistente.

Findado esta avaliação exploratória, realizou-se uma segunda avaliação, porém esta, com o intuito de verificar para qual variável o modelo de superfície SiB2 apresentou maior sensibilidade na simulação do fluxo de CO<sub>2</sub>. Destaca-se que esta avaliação foi estabelecida após o processo de calibração do modelo.

Para esta avaliação reduziu-se os valores de cada uma das variáveis meteorológicas, assumindo-se esses valores reduzidos na inicialização do modelo. A redução foi de 90% e 40% e foram aplicadas isoladamente a cada variável. O período

adotado para análise foi o mesmo adotado no processo de validação da calibração (05 a 17 de fevereiro de 2012).

A figura A2 trás um comparativo entre os fluxos observado e simulado após o processo de calibração (com a adoção normal das variáveis meteorológicas) e os fluxos simulados após a redução de 90% de cada variável isoladamente. Já a figura A3 trás este mesmo comparativo para a redução de 40%.

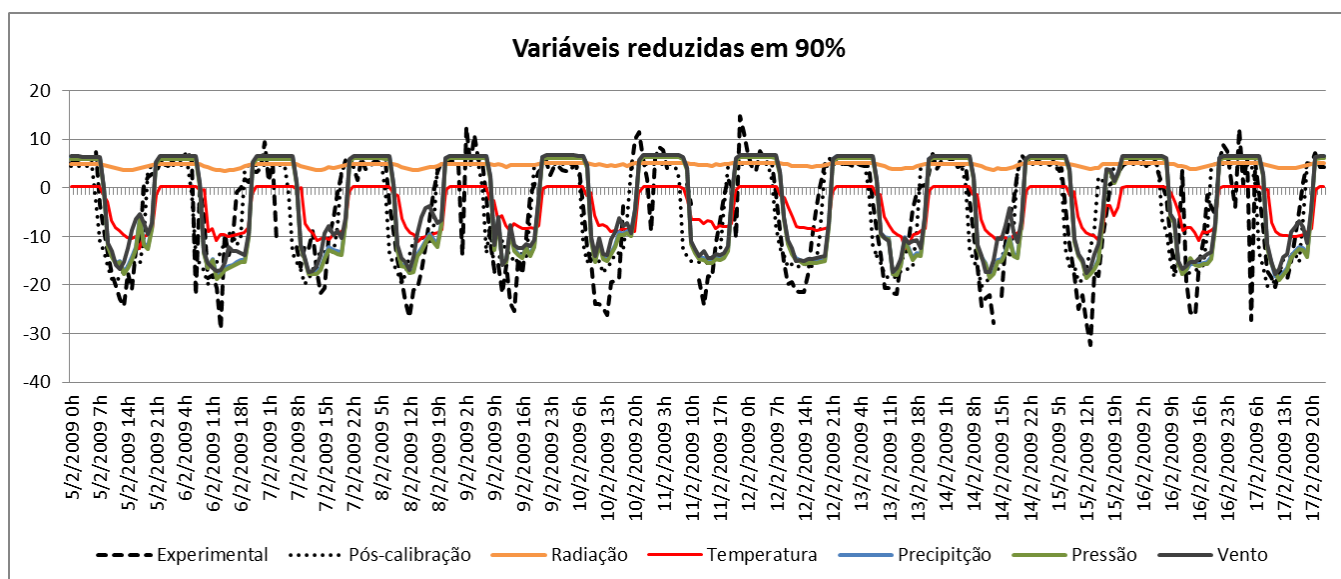


Figura A.2. Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> obtido experimentalmente, pós-calibração e após a redução das variáveis individualmente em 90%.

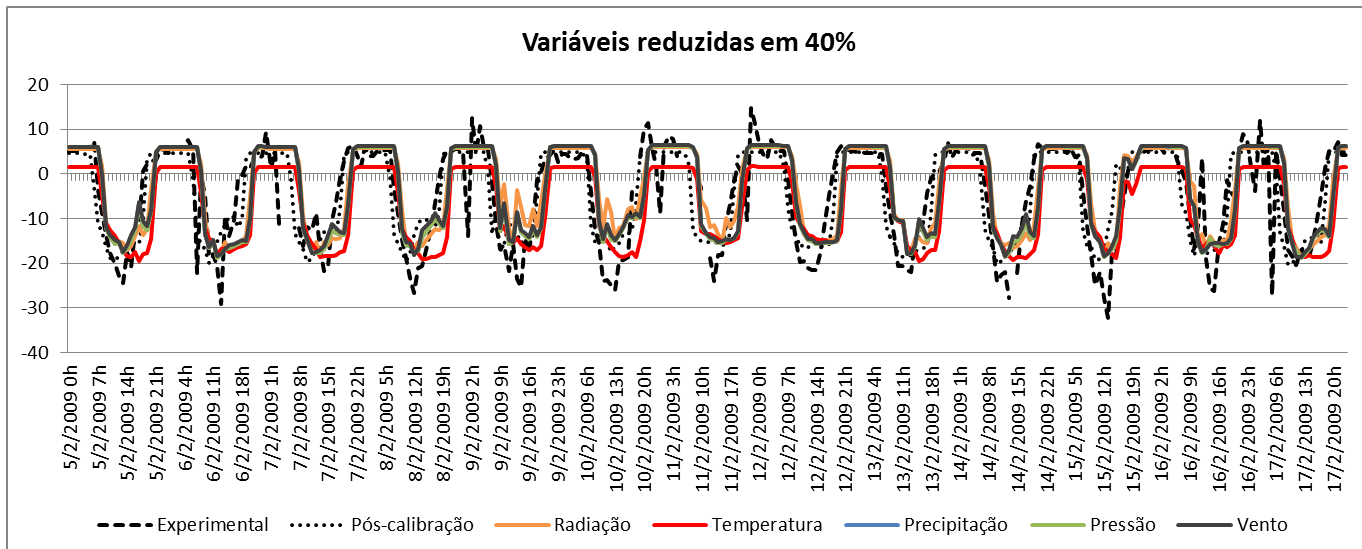


Figura A.3. Comparativo entre os fluxos de CO<sub>2</sub> obtido experimentalmente, pós-calibração e após a redução das variáveis individualmente em 40%.

Com base na análise das figuras A.2 e A.3 é possível verificar que as variáveis que representaram maior sensibilidade à simulação do fluxo de CO<sub>2</sub> pelo modelo SiB2, foram a radiação de onda curta incidente e a temperatura do ar. Dentre estas, a radiação demonstrou maior sensibilidade, verificando-se que, ao ser reduzida em 90%, inviabilizou a simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub>, considerando-se também que foi a única a apresentar uma correlação mais significativa entre as variáveis do INMET e do CFSR.

No que tange o comparativo entre as variáveis meteorológicas, convém ressaltar que os dados do INMET, por serem obtidos experimentalmente, referem-se a medidas pontuais. Já a reanálise CFSR, por tratar-se de dados obtidos a partir de um modelo global (CFS), apresentam uma resolução de 0,5°, desse modo, sua representação para a coordenada da área de estudo, consiste em uma média referente à grade incidente naquela área, em que qualquer ponto dentro desta grade apresentará mesmo valor. Por esta razão, considerando as diferentes resoluções espaciais entre as duas fontes de dados, os resultados de correlação são justificáveis quando indicam independência entre as variáveis.

Destaca-se, ainda, que o SiB2 trata-se de um modelo complexo que não depende apenas das condições de contorno atmosféricas para a simulação dos fluxos de CO<sub>2</sub>. Além das variáveis meteorológicas adotadas na sua inicialização, o modelo exige a definição de uma série de parâmetros que auxiliam na descrição do bioma em estudo,



conforme demonstrado nos resultados do processo de calibração, descritos no capítulo 5. Por esta razão, verifica-se que mesmo que as variáveis de reanálise tenham sido consideradas estatisticamente independentes das variáveis do INMET, ainda assim, justifica-se a adoção dos dados do CFSR no suprimento das condições de contorno atmosféricas, pelo fato do modelo não basear-se apenas nestes dados para efetuar sua simulação.