

NATÁLIA DOS SANTOS RENATO

**FOTOSSÍNTESES EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS: ADAPTAÇÃO DE MODELO PARA A
PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

VIÇOSA
MINAS GÉRIAS- BRASIL
2009

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R354f
2009

Renato, Natália dos Santos, 1984-

Fotosínteses em cenários de mudanças climáticas :
adaptação de modelo para a produtividade potencial da
cana-de-açúcar / Natália dos Santos Renato. – Viçosa,
MG, 2009.

xv, 53f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Luiz Cláudio Costa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa

Referências bibliográficas: f. 51-53

1. Cana-de-açúcar - Produtividade - Simulação por
computador. 2. Mudanças climáticas. 3. Produtividade
agrícola. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

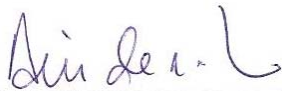
CDD 22.ed. 630.2515

NATÁLIA DOS SANTOS RENATO

**FOTOSSÍNTESES EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS
CLIMÁTICAS: ADAPTAÇÃO DE MODELO PARA A
PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVADA: 06 de fevereiro de 2009.



Prof. Aristides Ribeiro

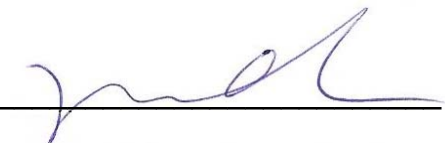


Dr. Carlos Fernando Lemos



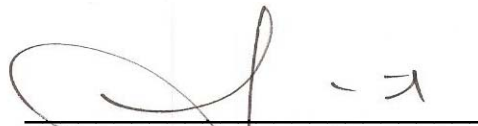
Prof. Gilberto Chohaku Sedyama

(Coorientador)



Prof. José Maria Nogueira Costa

(Coorientador)



Prof. Luiz Cláudio Costa

(Orientador)

Aos meus pais

Paulo Renato e Maria Auxiliadora

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela presença em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais Paulo Renato e Maria Auxiliadora, pelo exemplo de vida e pelo apoio incondicional.

Aos meus irmãos Bruno e Wilian pela amizade.

Ao Alisson que esteve sempre ao meu lado, pela compreensão, amor e carinho.

Ao Professor Luiz Cláudio, pela orientação

Aos co-orientadores Gilberto Sediya e José Maria, pelo apoio e sugestões no decorrer do trabalho

A todos os professores e funcionários do programa de pós-graduação em meteorologia Agrícola que contribuíram na minha formação.

Aos amigos do curso, em especial Roziane, Leydimere Janny e Rafael pelo incentivo durante todo o curso.

Às amigas de república pela convivência.

Às grandes amigas Fernanda e Tatiana pela eterna amizade

Ao João Batista pelos momentos de estudos e apoio durante a execução deste trabalho

À Amanda que sempre esteve disposta a ajudar mesmo de longe.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

À Universidade Federal de Viçosa e ao ensino público e gratuito pela oportunidade de realizar este trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

CONTEÚDO

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS..... | VI |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| LISTA DE TABELAS..... | XI |
| RESUMO | XII |
| ABSTRACT | XIV |
| INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| CAPÍTULO 1 DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE PREVISÃO DE PRODUTIVIDADE ADAPTADO PARA CONDIÇÕES DE MUDANÇAS NO CLIMA | 4 |
| 1.1. Introdução | 5 |
| 1.1.1. Modelagem..... | 5 |
| 1.1.2 Modelagem na agricultura | 7 |
| 1.1.3 Atividade fotossintética e respiração | 7 |
| 1.1.4 Modelo com adaptação as mudanças climáticas | 9 |
| 1.1.5 Objetivos | 10 |
| 1.2 Material e Métodos | 11 |
| 1.2.1 Descrição do modelo..... | 11 |
| 1.2.2 Dados climáticos | 12 |
| 1.2.3 Fotossíntese | 12 |
| 1.2.4 Respiração | 17 |
| 1.2.5 Desenvolvimento e partição de matéria seca | 18 |
| 1.2.6 Calibração do modelo..... | 22 |
| 1.2.7 Análise de sensibilidade | 24 |
| 1.3 Resultados e Discussão | 25 |
| 1.3.1 Modelo | 25 |
| 1.3.2 Efeitos da Temperatura e do CO ₂ na fotossíntese | 26 |
| 1.3.3 Sensibilidade na produtividade..... | 29 |
| 1.4 Conclusões | 31 |

| | | |
|-------------------|---|-----------|
| CAPÍTULO 2 | SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR EM CENÁRIOS FUTUROS | 32 |
| 2.1 | Introdução | 33 |
| 2.1.1 | Mudanças climáticas e modelagem..... | 33 |
| 2.1.2 | A cana-de-açúcar; aspectos econômicos e fisiológicos | 35 |
| 2.1.3 | Objetivos | 37 |
| 2.2 | Material e Métodos | 38 |
| 2.2.1 | Área de estudo e dados utilizados..... | 38 |
| 2.2.2 | Modelo utilizado..... | 38 |
| 2.3 | Resultados e Discussão | 40 |
| 2.3.1 | Projeções futuras com graus dias | 40 |
| 2.3.2 | Projeções futuras com ciclo fixo | 45 |
| 2.3 | Conclusões | 40 |
| | CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES | 49 |
| | REFERÊNCIAS | 51 |

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

| | |
|-----------------------|--|
| AFE: | Área foliar específica |
| Ca: | Concentração de CO ₂ atmosférico |
| Cc: | Concentração de CO ₂ no sítio da Rubisco |
| Ci: | Concentração intercelular de CO ₂ |
| D _j | Energia de desativação |
| DAP: | Dia após o plantio |
| ED: | Estádio de desenvolvimento |
| E _g : | Respiração de crescimento ou taxa de eficiência de conversão |
| E _{kmc} : | Energia de ativação para o K _{mc} |
| E _{kmo} : | Energia de ativação para o K _{mo} |
| E _{Vcmax} : | Energia de ativação para o V _{cmax} |
| f _{cyc} : | Fração de transporte de elétrons do ciclo do fotossistema |
| FFOL: | Parte aérea se transforma em folha |
| Fotossíntese: | Fotossíntese bruta da cultura |
| f _{pseudo} : | Fração de transporte de elétrons do ciclo pseudo |
| f _Q : | Fração de transporte de elétrons que segue o ciclo Q |
| FRAIZ: | Fração da raiz |
| FSEN: | Fator de senescência |
| GD: | Graus dias acumulado |
| GDT: | Graus dias total |
| h: | Número de prótons para a produção de 1 mol de ATP |
| l: | Lamela do cloroplasto |
| j ₂ : | Taxa de transporte de elétrons |
| J _{max} : | razão máxima de J ₂ |

| | |
|-----------------------|---|
| $J_{\max 25}$ | Limite superior de J_2 a 25°C |
| K_{mc} : | Constante de Michaelis-Mentem para o CO_2 |
| $K_{\text{mc}25}$: | Constante de Michaelis-Mentem para o CO_2 a 25°C |
| K_{mo} : | Constante de Michaelis-Mentem para o O_2 |
| $K_{\text{mo}25}$: | Constante de Michaelis-Mentem para o O_2 a 25°C |
| n | Índice de nitrogênio da folha |
| nb | Conteúdo mínimo de nitrogênio da fola |
| O_i : | Concentração de oxigênio intercelular |
| P_p : | Fotossíntese bruta |
| Q_{10} : | Fator de incremento da manutenção |
| R : | Constante universal dos gases |
| R_m : | Coeficiente da respiração de manutenção |
| T_b : | Temperatura base |
| TCAER: | Taxa de crescimento da parte aérea |
| TCCOL: | Taxa de crescimento do colmo |
| TCCUL: | Taxa de crescimento da cultura |
| TCCUL: | Taxa de crescimento da cultura |
| TCFOL: | Taxa de crescimento das folhas |
| TCRAIZ: | Taxa de crescimento da raiz |
| TD: | Total de dias do ciclo |
| T_m : | Temperatura média do ar |
| TSENF: | Taxa de senescência de folhas |
| V_c : | Taxa de carboxilação limitada pela enzima Rubisco |
| V_{cmax} : | Capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase |
| $V_{\text{cmax}25}$: | Capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase a temperatura de 25°C |

| | |
|-----------------------|--|
| V_j : | Taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétron |
| W_{acum} : | Peso seco acumulado da cultura |
| W_{colmo} : | Matéria seca acumulada no colmo |
| W_{folhas} : | Matéria seca acumulada nas folhas |
| W_{raiz} : | Matéria seca acumulada na raiz |
| X_{jn} | Fator de proporcionalidade |
| α_2 : | Eficiência quântica intrínseca da planta |
| ϕ : | Razão de carboxilação da PEP |
| ϕ_{2m} : | Eficiência máxima do transporte de elétrons na fotossíntese |
| θ : | Fator de convexidade para a resposta de J_2 à radiação fotossinteticamente ativa |
| τ : | Ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1: | Fluxograma com a estrutura base de um modelo..... | 5 |
| Figura 1.2: | Fluxograma da inter-relação dos principais componentes do modelo..... | 11 |
| Figura 1.3: | (a) Esquema das câmaras de topo aberto (OTCs) onde as plantas foram cultivadas. 1 – Cilindro de CO ₂ ; 2 – Válvula reguladora de fluxo; 3 – Entrada de CO ₂ no sistema; 4 – Entrada de ar atmosférico; 5 – Ventilador. (*) Presentes somente nas câmaras com 720ppm de CO ₂ (Souza, 2007). (b) Foto do experimento. | 23 |
| Figura 1.4: | Modelo desenvolvido no Model Maker para o cálculo da produtividade potencial da cana-de-açúcar. | 25 |
| Figura 1.5: | Gráfico das taxas de carboxilação (V _c e V _j) em função da temperatura do ar. | 26 |
| Figura 1.6: | Gráfico da fotossíntese bruta diária | 27 |
| Figura 1.7: | Gráfico da fotossíntese bruta diária, com o CO ₂ variando de 380 para 720 ppm, e a temperatura média diária de um período da simulação..... | 28 |
| Figura 1.8: | Análise de sensibilidade do modelo para o calculo da produtividade da cana-de-açúcar, relativa concentração de CO ₂ atmosférico..... | 30 |
| Figura 2.1: | Valores simulados das concentrações de CO ₂ ao longo dos anos para cenários futuros. (IPCC,2007)..... | 34 |
| Figura 2.2: | Valores simulados para a temperatura média da superfície da Terra ao longo dos anos para os cenários futuros (IPCC, 2007)..... | 34 |
| Figura 2.3: | Modelo para o cálculo da produtividade potencial da cana-de-açúcar..... | 39 |
| Figura 2.4: | Variação da produtividade potencial da cana-de-açúcar, utilizando o conceito de graus dias e da temperatura média anual simulada para a cidade de Ribeirão Preto. | 41 |
| Figura 2.5: | Variação da temperatura média anual e da duração do ciclo da cultura da cana-de-açúcar para a cidade de | |

| | | |
|-------------|--|----|
| | Ribeirão Preto, simulados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM. | 41 |
| Figura 2.6: | Variação da produtividade potencial da cana-de-açúcar, utilizando o conceito de graus dias e da temperatura média anual simulada para a cidade de Piracicaba. | 43 |
| Figura 2.7: | Variação da temperatura média anual e da duração do ciclo da cultura da cana-de-açúcar para a cidade de Piracicaba, simulados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM. | 44 |
| Figura 2.8: | Temperatura média anual e produtividade potencial da cana-de-açúcar, considerando ciclo fixo, para a cidade de Ribeirão Preto..... | 46 |
| Figura 2.9: | Temperatura média anual e produtividade potencial da cana-de-açúcar, considerando ciclo fixo, para a cidade de Piracicaba..... | 46 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1: Análise de sensibilidade do modelo para o cálculo da produtividade da cana-de-açúcar, relativa a temperatura média diária | 29 |
| Tabela 1.2: Análise de sensibilidade do modelo para o cálculo da produtividade da cana-de-açúcar, relativa a concentração de CO ₂ atmosférico..... | 29 |
| Tabela 2.1: Produtividade real da cana-de-açúcar do período de 2003 a 2008, para as cidades de Piracicaba e Ribeirão Preto, SP (IBGE)..... | 36 |
| Tabela 2.2: Projeção da variação percentual média da produtividade potencial da cana-de-açúcar, projetados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B), para a cidade de Ribeirão Preto, comparando com o ano base de 2005..... | 40 |
| Tabela 2.3: Projeção da variação percentual média da produtividade potencial da cana-de-açúcar, projetados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B), para a cidade de Piracicaba, comparando com o ano base de 2005..... | 42 |
| Tabela 2.4: Projeção da variação percentual média da produtividade potencial da cana-de-açúcar, projetados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1b), comparadas com o ano base 2005 | 45 |

RESUMO

RENATO, Natália dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2009. **Fotossínteses em cenários de mudanças climáticas: adaptação de modelo para a produtividade potencial da cana-de-açúcar.**), Orientador: Luiz Cláudio Costa, Coorientadores: Gilberto Chohaku Sedyama e José Maria Nogueira Costa.

Nos últimos anos, tem se observado uma grande preocupação com a resposta das culturas agrícolas aos possíveis aumentos da temperatura do ar e da concentração de CO₂ na atmosfera. Uma das dificuldades de se realizar tais estudos são os modelos de fotossíntese, que não foram desenvolvidos considerando o efeito do aumento na concentração de CO₂ na produtividade das culturas. Com o objetivo de simular produtividade potencial para cenários futuros, foi analisado um modelo com adaptações às condições de mudanças climáticas, o qual se destaca por incluir detalhadamente as reações bioquímicas de processos como a carboxilase e o transporte de elétrons, além de incorporar a temperatura média e a concentração de CO₂, variáveis marcantes no cenário futuro. Nesta pesquisa, foram utilizados dados meteorológicos diários, valores de taxas de fotossíntese e produtividade, obtidos em um experimento realizado em SP (SOUZA, 2007), além de dados de temperatura do ar e CO₂ projetados pelo modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B), em simulações para o período 2005-2020. Os resultados demonstram que o modelo responde satisfatoriamente ao aumento de CO₂ e temperatura do ar. Foi feita a projeção da produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar para as cidades de Ribeirão Preto e Piracicaba. Foram analisadas duas metodologias, a primeira considerando graus dias, o aumento da temperatura encurtou o ciclo da cultura e conseqüentemente a produtividade diminuiu. Ribeirão Preto teve as maiores variações com uma queda na produtividade no ano de 2012 de 49%, quando comparado com 2005. A segunda metodologia considerando o ciclo da cana-de-açúcar fixo, mostra que o aumento da temperatura e do CO₂ causará acréscimos na produtividade da referida cultura. Nas duas cidades, os maiores valores de

produtividade foram observados nos anos de 2011 e 2012, períodos de maior temperatura média e invernos mais quentes da série. A estimativa é de que nesses períodos, a produtividade potencial possa atingir valores até 66% maiores, quando comparados com os valores referentes de 2005. Os resultados mostraram que o modelo estudado apresenta-se como alternativa a modelos convencionais, alertando sobre as diferenças nas duas metodologias.

ABSTRACT

RENATO, Natália dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2009. **Photosynthesis in scenarios of climate change: adapting a model for the potential productivity of sugar cane.** Adviser: Luiz Cláudio Costa, Co-advisers: Gilberto Chohaku Sedyama and José Maria Nogueira Costa.

It has been observed in the last years an increasing concern about agriculture crop's responses due to the higher temperature and CO₂ concentration in the atmosphere. What made this job even harder were the photosynthesis models which weren't developed considering a higher CO₂ concentration effect on the crop productivity. In order to simulate potential productivity of future scenarios, a model was analyzed with adjustments to the climate change, which sticks out for including biochemical reactions with details on processes such as carboxylation and electron transports, besides having the average temperature and CO₂ concentration, important variables in the future scenario. It was used in this research daily meteorological informations, photosynthesis rate values and productivity as well, were obtained in a experiment in SP(Souza, 2007), and also air temperature data and CO₂ projected by the model ECHAM5/MPI-OM (scenario A1B) in simulations between 2005-2020. The results confirm the models answers well the CO₂ and the air temperature increasing. The potential productivity projection of sugar cane was studied in the cities of Ribeirão Preto and Piracicaba. Two methodologies were made, the first one considering day degrees, the temperature increasing reduced the crop cycle and due to that, a smaller productivity. Ribeirão Preto had the biggest differences with 49% productivity reduction in 2012 when compared to 2005. The second methodology considering a constant sugar cane cycle, shows the temperature and CO₂ increasing will cause a bigger productivity on the crop. The biggest productivity values were found in both cities in 2011 and 2012, the highest average temperature period and hottest winters in the series. The estimative of these periods, the potential productivity can reach values up to 66% higher than 2005 values. The results confirm that the studied model

presented as an alternative to conventional models, warning about the differences between the two methodologies.

INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, as mudanças climáticas são motivo de grande preocupação mundial. Tais alterações referem-se à variação do clima em escala global ou dos climas regionais ao longo do tempo. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), a temperatura média mundial já aumentou 0,6 °C nos últimos cem anos e aumentará entre 1,4 e 5,8 °C de 1990 a 2100, se as emissões de gases de efeito estufa permanecerem com as taxas atuais (IPCC, 2007). Esse aumento de temperatura será acompanhado ainda pela elevação do nível do mar e por uma maior frequência e intensidade de ocorrência dos eventos extremos.

Pesquisas desenvolvidas recentemente têm mostrado que as condições climáticas futuras poderão ter impactos substanciais na produtividade das culturas (LUO *et al.*, 2005; RICHTER; SEMENOV, 2005; ZHANG & LIU, 2005; OLIVEIRA, 2007; BATTISTI & NAYLOR, 2009). Esses impactos referem-se às taxas fotossintéticas, de respiração e à redução no ciclo das culturas. Uma das principais causas desses impactos é o aumento da temperatura do ar. No entanto, ainda existe uma série de incertezas sobre tais impactos, uma vez que a produtividade das culturas depende de uma série de fatores biofísicos e socioeconômicos, que são difíceis de quantificar (EWERT *et al.*, 2005).

Dentre as culturas agrícolas potencialmente afetadas pelas mudanças no clima, destaca-se a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). A planta tem sido usada para obtenção de álcool combustível: alternativa à queima do petróleo que está no subsolo, apresentando-se como fonte de energia renovável.

Na tentativa de se relacionar produtividade agrícola e clima, alguns modelos vêm sendo desenvolvidos, baseados em fundamentos estatísticos (FAO, 2003), ou modelos baseados em processos que também vêm sendo usados para estudos da produtividade potencial de culturas sob condições de mudanças climáticas (EASTERLING *et al.*, 2001; PARRY *et al.*, 2004). Observa-se, no entanto, a necessidade de adaptação dos modelos às variações que podem ocorrer nos processos fotossintéticos com as mudanças climáticas. Yin *et al.* (2004) mostram a importância de quantificar essas mudanças na assimilação de CO₂ no crescimento das culturas utilizando modelos.

Qiong *et al.* (2004) compararam alguns tipos de modelos e mostraram a importância de saber o comportamento deles com as futuras condições ambientais. A metodologia apresentada por Farquhar *et al.* (1980) e adaptada por Yin e Van Laar (2005) - que a partir daqui será denotada como Yin e Van Laar (2005) - deriva do conhecimento das relações entre vários tipos de moléculas envolvidas no processo bioquímico de fotossíntese. Esses modelos destacam-se por incluírem detalhadamente as reações bioquímicas de processos como a carboxilase e o transporte de elétrons, e também por terem como variáveis a temperatura média e a concentração de CO₂, que são as variáveis que mais serão afetadas no cenário futuro.

Na literatura, poucos são os registros sobre estudos com as equações propostas por Yin e Van Laar (2005). Tal fato pode ser atribuído às dificuldades em se medir os parâmetros necessários, tais como concentração de oxigênio intercelular; taxa de transporte de elétrons e razão de carboxilação da PEP. Atualmente, no entanto, essas limitações estão sendo gradualmente superadas. Souza (2007) desenvolveu estudos com medições de alguns dos parâmetros necessários citados e outras pesquisas estão seguindo o mesmo direcionamento.

Diante do exposto o presente estudo teve como objetivos gerais:

- Adaptar e testar um modelo de fotossíntese, considerando a metodologia proposta por Yin e Van Laar (2005), para a cultura da cana-de-açúcar.
- Simular a produtividade da cana-de-açúcar com o uso do modelo desenvolvido, considerando o cenário A1B de mudanças climáticas sugerido pelo IPCC.

CAPÍTULO 1

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE PREVISÃO DE
PRODUTIVIDADE ADAPTADO PARA CONDIÇÕES DE MUDANÇAS NO
CLIMA**

1.1. INTRODUÇÃO

1.1.1. Modelagem

Um modelo de simulação pode ser definido como uma equação ou conjunto de equações capazes de representar um sistema real. Se o sistema for dinâmico, o modelo deve ser capaz de simular suas mudanças ao longo do tempo.

Na modelagem em geral, o mais importante é a possibilidade do entendimento de um sistema de forma integral e holística (THORNLEY, 1976). Na Figura 1.1 visualiza-se um diagrama básico retratando a estrutura comum de um modelo.

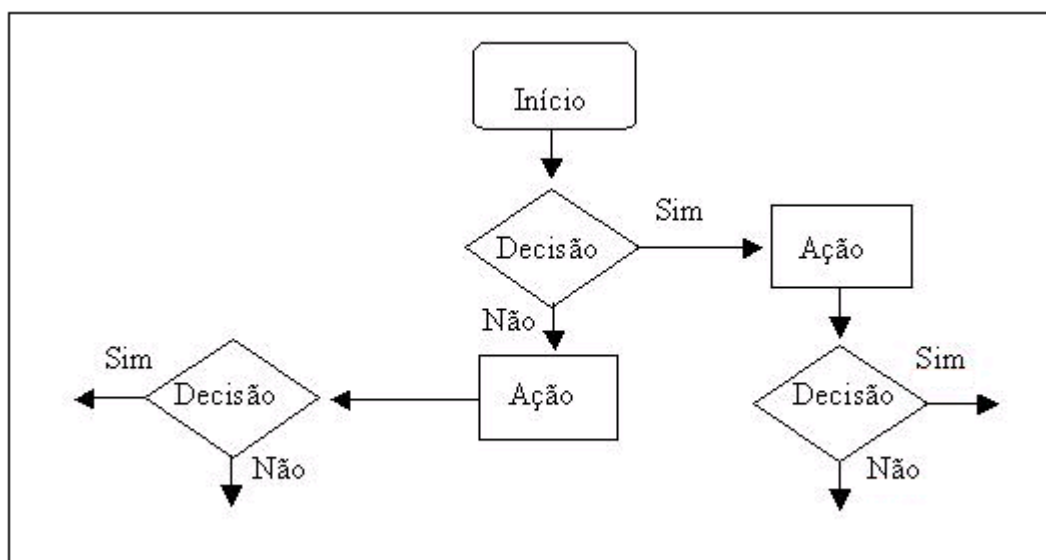


Figura 1.1: Fluxograma com a estrutura base de um modelo

Os conceitos de modelos de simulação surgiram da necessidade inerente do homem em compreender como a natureza e seus componentes funcionam. Para isso, foi necessário isolar o objeto de estudo, bem como parte do ambiente que interfere no mesmo, uma vez que, na natureza os objetos são interdependentes e se influenciam mutuamente. Esse conjunto funcional constitui um sistema que geralmente está inserido em um sistema

maior e mais complexo, representando dessa maneira, parte da realidade (PENNING DE VRIES, 1975, THORNLEY, 1976).

De uma maneira geral, os modelos são compostos por uma estrutura teórica, representada por equações matemáticas; de valores numéricos dos parâmetros dessas equações e de dados de entrada e de saída. Os modelos representam uma abstração da realidade utilizada para se obter clareza conceitual: reduzir a variedade e complexidade do mundo real a um nível que se pode entender e representar.

Devido à expansão mundial do desenvolvimento e utilização dos modelos, tornou-se necessária a classificação dos mesmos. Na literatura científica internacional, tem-se uma aceitação da classificação dos modelos em duas categorias principais: modelos empíricos e modelos baseados em processos.

Costa (1997), considerando modelos de sistemas agrometeorológicos, afirma que modelos empíricos, são simples, e têm como objetivo a descrição da relação quantitativa entre a taxa de crescimento das culturas e os fatores ambientais considerados, não se preocupando com os entendimentos físicos e fisiológicos dessas relações.

Segundo o mesmo autor, modelos baseados em processos fazem a descrição do que ocorre no sistema real, considerado, ou tentando considerar os princípios físicos e biológicos que ocorrem no ambiente em estudo (COSTA, 1997).

A aplicação de modelos de simulação é uma ferramenta de grande importância, que oferece diversas vantagens nos estudos da interação clima-cultura. Contudo, essa interação envolve uma complexidade de processos físicos, químicos e biológicos. Modelos vêm sendo utilizados como ferramenta de grande potencial na área de sistemas cultivados, possibilitando o estudo do conjunto, estimando o desempenho da cultura em diferentes áreas e situações (TOJO SOLER, 2004).

1.1.2 Modelagem na agricultura

A utilização de modelos objetivando quantificar os efeitos das variáveis ambientais no crescimento e desenvolvimento das culturas vem ocorrendo há mais de 250 anos.

Assis (2004) afirma que a temperatura do ar é uma das variáveis independentes mais utilizadas em modelo de previsão da variação temporal do acúmulo de fitomassa seca em diversas culturas, devido tanto à facilidade de obtenção, quanto ao seu relacionamento com a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa, necessária para a planta completar o seu ciclo.

Muitos são os trabalhos desenvolvidos no estudo de modelagem de sistemas agrícolas. Com a cultura da cana-de-açúcar, Boote *et al.* (1996) propuseram um modelo de produtividade considerando séries climáticas históricas de uma região para avaliar os riscos de queda na produção. Scarpari (2002) desenvolveu um modelo para previsões de açúcar teórico recuperável (ATR), utilizando dados como precipitação e temperatura.

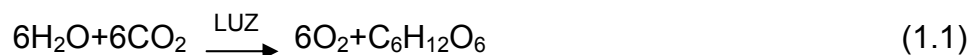
Oliveira (2007) estudou modelos baseados em processos para estimar a variabilidade da produtividade potencial das culturas de milho e feijão em algumas mesorregiões do estado de Minas Gerais. No referido estudo, foram utilizadas, como parte central no cálculo do balanço de carbono, as equações de Blackman, a hipérbole retangular, a exponencial negativa, a hipérbole não retangular e o uso eficiente da radiação.

Muitos modelos de culturas agrícolas baseiam-se na simulação da produção fotossintética e da partição dos fotossintetizados para seu crescimento, armazenamento e respiração; sendo estes, segundo Barbieri (1993), os processos fundamentais para o crescimento e desenvolvimento da planta.

1.1.3 Atividade fotossintética e respiração

A palavra fotossíntese significa “biossíntese que usa luz”, a atividade vital que as plantas realizam em função da luz solar, transformando a

energia luminosa em energia química. Por meio da clorofila, composto presente nas folhas, a seiva bruta é transformada em seiva elaborada. A reação da fotossíntese é baseada no processamento do dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e sais minerais (xilema) em compostos orgânicos, produzindo oxigênio gasoso (O_2) e glicose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), compondo a seiva elaborada (Equação 1.1)



No processo de fotossíntese, a planta produz a energia necessária para suas atividades fundamentais, formando a adenosina-trifosfato (ATP), “moeda” energética dos organismos vivos. Alguns fatores internos, como as estruturas das folhas e cloroplastos e o teor de pigmentos, outros externos, como luz, temperatura, salinidade, grau de hidratação e pressão parcial de CO_2 , podem afetar o processo de fotossíntese (LARCHER, 2006).

Diante do exposto, nota-se que o cálculo da taxa de fotossíntese é uma parte essencial nos modelos de simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas. No presente estudo, foi investigado o comportamento para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) que é do tipo C_4 . Esta denominação de plantas C_4 refere-se ao número de átomos de carbono presentes no primeiro produto da fixação do CO_2 .

O termo respiração tem sido empregado como a perda de CO_2 ou de matéria seca pela planta. A respiração é o processo pelo qual compostos altamente energéticos são sintetizados a partir dos carboidratos produzidos na fotossíntese. Assim, a respiração pode ser dividida, teoricamente, em respiração de crescimento e de manutenção (McCREE, 1974).

A respiração de manutenção representa a quantidade de energia (material) necessária para a manutenção dos processos fisiológicos da cultura, podendo também ser interpretada como o crescimento necessário para contrabalancear a degradação biológica dos tecidos. Já a respiração de crescimento ocorre para a síntese de nova biomassa.

1.1.4 Modelo com adaptação as mudanças climáticas

Nos últimos anos, tem se observado uma frequente preocupação com a resposta de culturas agrícolas para possíveis aumentos de temperatura e CO₂. Estudos desenvolvidos em diferentes partes do mundo têm mostrado que as condições climáticas futuras poderão ter impactos substanciais na produtividade das culturas (LUO *et al.*, 2005; RICHTER; SEMENOV, 2005; ZHANG; LIU, 2005; OLIVEIRA, 2007; BATTISTI & NAYLOR, 2009). Tais impactos referem-se às taxas fotossintéticas e de respiração e à redução no ciclo das culturas. A causa principal desses impactos é o aumento da temperatura do ar. No entanto, ainda existe uma série de incertezas sobre tais impactos, uma vez que a produtividade das culturas depende de uma série de fatores biofísicos e socioeconômicos, que são difíceis de quantificar (EWERT *et al.*, 2005).

Modelos vêm sendo desenvolvidos para tentar projetar a produtividade de culturas em cenários de temperaturas e CO₂ futuros (OLIVERIA, 2007). Qiong *et al.* (2004) compararam alguns tipos de modelos e mostraram a importância de saber o comportamento destes com as futuras condições ambientais. A metodologia apresentada por Yin e Van Laar (2005), aqui estudada, deriva do conhecimento das relações entre vários tipos de moléculas envolvidas no processo bioquímico da fotossíntese. Essas equações incluem detalhadamente as reações bioquímicas de processos como a carboxilase e o transporte de elétrons, e tem como variáveis a temperatura média e a concentração de CO₂.

Nota-se, portanto, que o desenvolvimento e calibração de modelos que relacionem produtividade agrícola e clima é de importância estratégica tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista ambiental, considerando-se os cenários brasileiro e mundial.

1.1.5 Objetivos

O presente estudo teve como objetivo adaptar e testar um modelo considerando a metodologia proposta por Yin e Van Laar (2005), que considera o efeito do aumento da temperatura do ar e da concentração de CO₂ atmosférico na produtividade das culturas. O estudo foi feito para a produtividade potencial da cana-de-açúcar.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, utilizou-se o ModelMaker, um programa computacional em que o usuário constrói seu próprio modelo a partir de equações propostas na literatura.

1.2.1 Descrição do modelo

Com a utilização do aplicativo ModelMaker foi descrito um modelo de simulação, baseado em processos determinísticos e dinâmico para a estimativa da produtividade potencial da cana-de-açúcar. Para tanto foi utilizada a metodologia proposta por Yin e Van Laar (2005) no módulo fotossíntese, junto aos módulos de respiração e partição de matéria seca propostos por McCree (1974) e Pereira e Machado (1986),

A Figura 1.2 mostra o fluxograma das estruturas básicas do modelo.

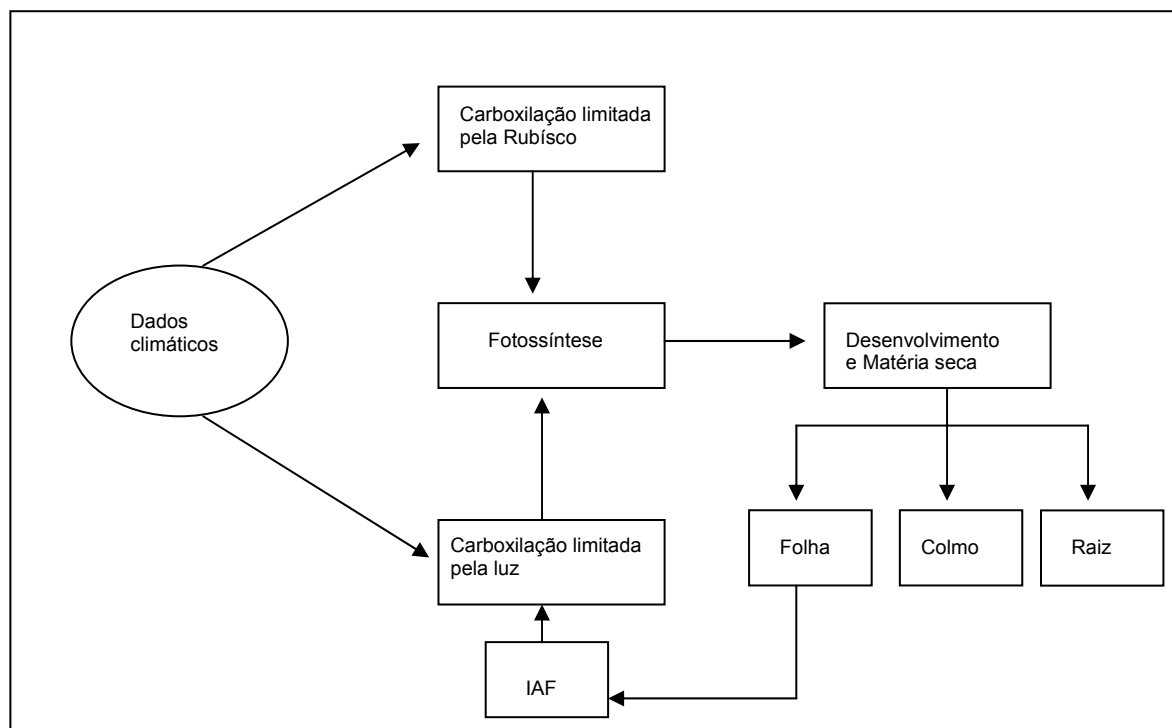


Figura 1.2: Fluxograma da inter-relação dos principais componentes do modelo.

1.2.2 Dados climáticos

Foram utilizados dados climáticos em base diária, coletados na Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (São Paulo), no ano de 2005. As variáveis utilizadas foram temperatura média do ar e concentração atmosférica de CO₂.

1.2.3 Fotossíntese

Para o cálculo da fotossíntese bruta foram utilizadas as equações propostas por Yin e Van Laar (2005). O modelo simula a fotossíntese em função da atividade da enzima Rubisco, temperatura e concentração de CO₂. O cálculo da radiação, que é um fator importante para o desenvolvimento da cultura é feito internamente pelo modelo, no módulo referente à taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétrons.

A fotossíntese pode ser calculada por meio da equação 1.2:

$$P_p = 44 \times 10^{-6} \left(1 - \frac{\tau}{C_c} \right) \min(V_c, V_j) \quad (1.2)$$

P_p : fotossíntese bruta (g CO₂ m⁻² folha s⁻¹)

V_c : taxa de carboxilação limitada pela enzima Rubisco (μmol CO₂ m⁻² folha s⁻¹);

V_j : taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétron (μmol CO₂ m⁻² folha s⁻¹);

τ : ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa (μmol mol⁻¹);

C_c : concentração de CO₂ no sítio da Rubisco (μmol mol⁻¹).

A concentração de CO₂ no sítio da Rubisco (C_c) é calculada pela equação 1.3:

$$C_c = 10C_i \quad (1.3)$$

C_i : concentração intercelular de CO_2 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$).

Segundo Goudriaan e Van Laar (1978), há uma relação C_i/C_a que pode ser calculada para as culturas do tipo C_3 e C_4 . Nessa relação, C_a denota a concentração de CO_2 atmosférico ($\mu\text{mol mol}^{-1}$).

O ponto de compensação da radiação fotossinteticamente ativa (τ) é alcançado quando a assimilação fotossintética de CO_2 iguala-se à quantidade de CO_2 liberado pela respiração, calculado de acordo com a equação 1.4:

$$\tau = 0.5 \cdot e^{\frac{-3.3801+5220}{298R(T_m+273)}} \cdot \frac{O_i K_{mc}}{K_{mo}} \quad (1.4)$$

T_m : Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);

K_{mc} e K_{mo} : Constantes de Michaelis-Mentem para o CO_2 e O_2 , respectivamente ($\mu\text{mol mol}^{-1}$);

R : Constante universal dos gases ($\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$);

O_i : Concentração de oxigênio intercelular (mol mol^{-1});

Com o aumento da radiação fotossinteticamente ativa, acima do ponto de compensação, a fotossíntese aumenta até certo ponto e depois os aumentos posteriores são eventualmente limitados pela capacidade de carboxilação da Rubisco ou pelo metabolismo das triose fosfato.

A taxa de carboxilação limitada pela Rubisco (V_c) foi calculada pela equação 1.5:

$$V_c = V_{cmax} C_c / [C_c + K_{mc} (1 + O_i / K_{mo})] \quad (1.5)$$

V_{cmax} : capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ folha s}^{-1}$).

Para o cálculo da capacidade máxima da enzima Rubisco (V_{cmax}), e das constantes de Michaelis-Mentem (K_{mc} e K_{mo}) foram utilizadas as equações, 1.6, 1.7 e 1.8, respectivamente ($\mu\text{mol mol}^{-1}$).

$$V_{cmax} = V_{cmax25} e^{\frac{[(T_m - 25)E_{V_{cmax}}]}{298R(T_m + 273)}} \quad (1.6)$$

$$K_{mc} = K_{mc25} e^{\frac{[(T_m - 25)E_{K_{mc}}]}{298R(T_m + 273)}} \quad (1.7)$$

$$K_{mo} = K_{mo25} e^{\frac{[(T_m - 25)E_{K_{mo}}]}{298R(T_m + 273)}} \quad (1.8)$$

V_{cmax25} : capacidade máxima da enzima Rubisco para a realização da função carboxilase a temperatura de 25°C ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ folha s}^{-1}$).

K_{mc25} e K_{mo25} : Constantes de Michaelis-Mentem para o CO_2 e O_2 a 25°C , respectivamente ($\mu\text{mol mol}^{-1}$);

$E_{V_{cmax}}$, $E_{K_{mc}}$ e $E_{K_{mo}}$: Energias de ativação para V_{cmax} , K_{mc} e K_{mo} , respectivamente (J mol^{-1}).

A taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétrons (V_j) é calculada pela equação 1.9:

$$V_j = j_2 \frac{(2 + f_Q - f_{cyc})C_c}{h \left[\frac{2(C_c - \tau_*)}{(1 - \phi) + (3C_c + 7\tau)} \right] (1 - f_{cyc})} \quad (1.9)$$

j_2 : taxa de transporte de elétrons ($\mu\text{mol eletron m}^{-2} \text{folha s}^{-1}$);

ϕ : razão de carboxilação da PEP (mol mol^{-1});

h : número de prótons para produção de 1 mol de ATP (mol mol^{-1});

f_{cyc} : fração de transporte de elétrons do ciclo do fotossistema;

f_Q : fração de transporte de elétrons que segue o ciclo-Q.

As relações de transportes de elétrons no ciclo da fotossíntese (f_{cyc} , f_Q e f_{pseudo}) devem satisfazer a equação 1.10:

$$1 - f_{cyc} - f_{pseudo} = + \frac{(4C_c + 8\tau)(2 + f_Q - f_{cyc})}{h(3C_c + 7\tau)} \quad (1.10)$$

f_{pseudo} : fração de transporte de elétrons do ciclo pseudo.

O limite superior de J_2 deve satisfazer a equação 1.11:

$$\theta J_2^2 - (\alpha_2 I + J_{max}) J_2 + \alpha_2 I J_{max} = 0 \quad (1.11)$$

θ : fator de convexidade para resposta de J_2 à radiação fotossinteticamente ativa

I : lamela do cloroplasto ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{folha s}^{-1}$);

J_{max} : razão máxima de J_2 ;

A razão máxima de j_2 (J_{\max}) é calculada pela equação 1.12:

$$J_{\max} = \frac{J_{\max 25} e^{\frac{(T_m - 25)E_{j_{\max}}}{298R(T_m + 273)}} (1 + e^{\frac{298S_j - D_j}{298R}})}{1 + e^{\frac{(T_m + 273)S_j - D_j}{R(T_m + 273)}}} \quad (1.12)$$

$J_{\max 25}$: Limite superior de J_2 a 25°C

S_j : Termo de entropia ($J K^{-1} mol^{-1}$)

D_j : Energia de desativação ($J mol^{-1}$)

O limite superior de J_2 a 25°C ($J_{\max 25}$) é calculado pela equação 1.13:

$$J_{\max 25} = X_{jn} (n - nb) \quad (1.13)$$

X_{jn} : fator de proporcionalidade;

n : nitrogênio na folha ($g m^{-2}$ folha);

nb : conteúdo mínimo de nitrogênio na folha ($g m^{-2}$ folha),

τ eficiência quântica intrínseca da planta ($mol mol^{-1}$), calculada pela equação 1.14:

$$\alpha_2 = \frac{1 - f_{cyc}}{1 + (1 - f_{cyc}) / \phi_{2m}} \quad (1.14)$$

ϕ_{2m} : Eficiência máxima do transporte de elétrons na fotossíntese

1.2.4 Respiração

A respiração de manutenção (R_m), que constitui o consumo de energia necessária à organização estrutural da planta, foi introduzida no modelo, segundo McCree (1974), como função tanto do peso seco acumulado da cultura (W_{acum}) quanto da variação de temperatura (equação 1.15).

$$R_m = r_m \times W_{acum} \times Q_{10}^{\frac{(T_m - t_b)}{10}} \quad (1.15)$$

R_m : respiração de manutenção ($\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);

r_m : coeficiente da respiração de manutenção ($\text{gCO}_2 \cdot \text{gMS}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

Q_{10} : fator de incremento da manutenção;

T_b : temperatura base ($^{\circ}\text{C}$)

A respiração de crescimento ou taxa de eficiência de conversão (E_g) foi considerada constante (0.79) no modelo de acordo com Pereira e Machado (1986).

1.2.5 Desenvolvimento e partição de matéria seca

Para o estudo do desenvolvimento da cultura foi utilizado duas metodologias, graus dias e ciclo fixo.

A primeira foi a soma térmica dos graus dias, de acordo com a equação 1.16 (Villa Nova *et al.*, 1972):

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_m - T_b) \quad (1.16)$$

T_m : temperatura média (°C);

T_b : temperatura base (°C)

O crescimento da cultura foi considerado por meio de um contador ED (equação 1.17), com uma escala variando de 0 a 1. Os valores seguiram o seguinte esquema: zero é atribuído para a emergência, 1 quando a cultura atingir a maturidade fisiológica.

$$ED = GD / GDT \quad (1.17)$$

GDT: graus dias total (°C).

Quando o contador atingir o valor 1, a simulação estará concluída.

À medida que se acumulam os graus-dia exigidos pela cultura, para a ocorrência dos eventos fenológicos, o módulo referente à partição de assimilados distribui a assimilação diária entre os órgãos da planta.

A segunda metodologia foi considerado fixo o ciclo da cana-de-açúcar, com 350 dias, e o contador EDf de acordo com a equação 1.18:

$$EDf = \frac{DAP}{TD} \quad (1.18)$$

DAP: Idade da cultura (dia após o plantio)

TD: Período entre o plantio e a colheita (total de dias do ciclo).

À medida que a planta se desenvolve e ocorrem seus eventos fenológicos, o módulo referente à partição de assimilados distribuirá a assimilação diária entre os órgãos da planta.

Matematicamente, o crescimento da cultura foi calculado pela equação 1.19 (THORNLEY 1976):

$$TCCUL = E_g \times (\text{fotossíntese} - R_m) \quad (1.19)$$

TCCUL: taxa de crescimento da cultura;

E_g : eficiência de conversão de material fotossintetizado em massa seca;

fotossíntese = fotossíntese bruta da cultura ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

Toda parte referente à partição de matéria seca da cana-de-açúcar foi feita de acordo com Pereira e Machado (1986).

A taxa de crescimento da raiz foi calculada pela equação 1.20:

$$TCRAIZ = FRAIZ \cdot TCCUL \quad (1.20)$$

TCRAIZ: taxa de crescimento da raiz;

TCCUL: taxa de crescimento da cultura ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

FRAIZ: Fração da raiz calculada pela equação 1.21.

$$\text{FRAIZ} = 0,9 - 1,125 \times \text{ED} \quad (1.21)$$

A fração da raiz (FRAIZ) foi determinada empiricamente e indica que, inicialmente, a maior parte do TCCUL é utilizada na formação das raízes, para dar sustentabilidade a cultura. Depois decresce linearmente com o estágio de desenvolvimento.

A parte aérea da cultura (TCAER) é calculada pela equação 1.22:

$$\text{TCAER} = \text{TCCUL} - \text{TCRAIZ} \quad (1.22)$$

A parte aérea se transforma em folha (FFOL) e o restante em colmo (1-FFOL). A fração da folha (FFOL) é calculada pela equação 1.23:

$$\text{FFOL} = 0,95 - 1,252 \times \text{ED} \quad (1.23)$$

Com restrições: $\text{FFOL} = 0,58$ para $\text{ED} \leq 0,3$ e $\text{FFOL} = 0,08$ para $\text{ED} \geq 0,9$. Portanto, as taxas de crescimento das folhas e do colmo são computadas de acordo com as equações 1.24 e 1.25:

$$\text{TCFOL} = \text{FFOL} \times \text{TCAER} \quad (1.24)$$

$$\text{TCCOL} = (1 - \text{FFOL}) \times \text{TCAER} \quad (1.25)$$

TCFOL: taxa de crescimento das folhas

TCCOL: taxa de crescimento do colmo;

TCAER: taxa de crescimento da parte aérea.

Existe uma constante renovação de folhas, sendo as folhas mais velhas substituídas por folhas mais novas e mais eficientes, para isso foi introduzido uma taxa de senescência de folhas (TSEN) para evitar que a área foliar cresça continuamente até valores irrealis, calculada pelas equações 1.26 e 1.27:

$$TSENF = FSEN \times TCFOL \quad (1.26)$$

$$FSEN = -0,444 + 2,222 \times ED \quad (1.27)$$

TSENF: Taxa de senescência de folhas;

FSEN: fator de senescência.

Com restrições: $FSEN = 0$ se $ED \leq 0,20$ e $FSEN = 1$ se $ED \geq 0,65$

Concomitantemente, deve haver também uma taxa de senescência das raízes, calculada pela equação 1.28:

$$TSEN = 0.5 \times FSEN \times TCRAIZ \quad (1.28)$$

Para o cálculo da matéria seca acumulada, em cada parte da cultura, foram utilizadas as equações 1.29, 1.30, 1.31 e 1.32:

$$W_{raiz} = W_{raiz}(t-1) + TCRAIZ - TSENR \quad (1.29)$$

$$W_{folhas} = W_{folhas}(t-1) + TCFOL - TSENF \quad (1.30)$$

$$W_{colmo} = W_{colmo}(t-1) + TCCOL \quad (1.31)$$

$$W_{acum} = W_{raiz} + W_{folhas} + W_{colmo} \quad (1.32)$$

As áreas foliares das culturas são acumuladas ao longo do crescimento das mesmas, totalizando o Índice de área foliar (IAF),

considerando-se a área foliar específica (AFE) e a partição de matéria seca para as folhas (PF), que varia ao longo do estágio de desenvolvimento da planta (equação 1.33).

$$IAF = AFE \times W_{\text{folha}} \quad (1.33)$$

AFE: área foliar específica ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$);

W_{folha} : partição da matéria seca para as folhas (g m^{-2});

1.2.6 Calibração do modelo

O modelo construído para o cálculo da produtividade potencial da cana-de-açúcar foi calibrado com os dados de produtividade e fotossíntese obtidos de um experimento realizado em laboratório para cultura da cana de açúcar em condições ideais (Souza, 2007). Os dados meteorológicos usados no estudo foram coletados na Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, situado no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI), a aproximadamente 1 km do local de realização do experimento (Cidade Universitária).

Durante o experimento citado (Souza, 2007), foram analisados parâmetros fisiológicos, bioquímicos e moleculares da cana-de-açúcar que foi cultivada a partir de toletes com uma gema, provenientes de plantas da variedade SP80-3280 (cedidos pelo Centro de Tecnologia Canavieira – Piracicaba), que foram previamente selecionados de acordo com a massa fresca, visando à uniformidade do plantio.

Os toletes foram plantados em vasos plásticos de aproximadamente $0,036 \text{ m}^3$ contendo em cada um dos vasos quatro toletes. Os vasos foram redistribuídos aleatoriamente nas quatro câmaras de tal forma que cada um dos tratamentos (ambiente ou controle – aproximadamente 370 ppm e elevado CO_2 – aproximadamente 720 ppm) ficasse com 28 plantas. Em duas das câmaras foi acoplado um cilindro de dióxido de carbono (CO_2) para que a atmosfera interna da câmara se mantivesse a uma concentração próxima

a 720 ppm desse gás. Nas outras duas foi injetado somente ar atmosférico (370 ppm de CO_2). As concentrações do gás no interior das câmaras foram monitoradas a cada dois dias com um medidor de CO_2 , modelo Texto 535.

Ao longo do experimento, a umidade do solo foi monitorada com auxílio de tensiômetros instalados em um vaso de cada câmara, de modo que a tensão da água do solo nunca ultrapassasse 20 kPa. A adubação foi realizada a cada 4 meses, seguindo as instruções do Centro de Tecnologia Canavieira. Foram montadas quatro câmaras de topo aberto de 1,5 metros de diâmetro e 4 metros de altura, providas de um sistema de circulação de ar. A Figura 1.3 mostra o esquema do experimento.

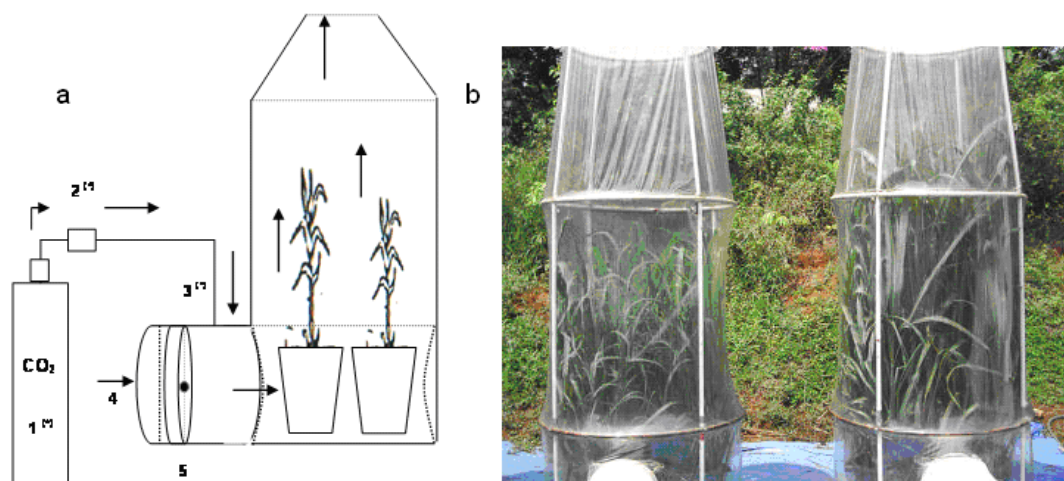


Figura 1.3: **(a)** Esquema das câmaras de topo aberto (OTCs) onde as plantas foram cultivadas. 1 – Cilindro de CO_2 ; 2 – Válvula reguladora de fluxo; 3 – Entrada de CO_2 no sistema; 4 – Entrada de ar atmosférico; 5 – Ventilador. (*) Presentes somente nas câmaras com 720ppm de CO_2 (Souza, 2007). **(b)** Foto do experimento.

O modelo foi calibrado por meio de tentativa e erro, ressaltando-se, que os parâmetros iniciais foram definidos de acordo com a literatura (PEREIRA & MACHADO, 1986; YIN & VAAN LAAR, 2005, SOUZA, 2007). A calibração foi simples, somente os parâmetros Ci/Ca e Nitrogênio (N) foram ajustados, de acordo com Goudriaan e Van Laar (1978) a relação Ci/Ca tem um valor de 0,4 para todas as culturas C4, neste trabalho, desenvolvido para a cana-de-açúcar foi utilizado 0,14. O índice de nitrogênio da folha, de

acordo com Allison *et al.* (1997), varia com a quantidade de nitrogênio no adubo e com o estágio de desenvolvimento da cana de 1 até 2,1 g m⁻² aqui foi utilizado um valor médio constate para todo período, 1, 8 g m⁻².

1.2.7 Análise de sensibilidade

Para o estudo da influencia dos elementos na simulação final da produtividade foi feita a análise de sensibilidade do modelo variando apenas um parâmetro, enquanto os outros permaneceram inalterados. Foi verificada a sensibilidade do modelo, com os dados de entrada (temperatura do ar e concentração de CO₂). Para os dados de temperatura média do foram acrescidos e reduzidos em cada valor diário 5% e 10%. Já para os dados de concentração de CO₂ atmosférico foi feita uma variação de ±10%, ±20% e ±30%.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Modelo

O modelo foi descrito e adaptado para calcular a produtividade potencial da cana-de-açúcar. Na Figura 14, observa-se a estrutura resultante que sintetiza o modelo. Em cada compartimento da Figura 1.4 foi introduzido as equações referentes aos cálculos das variáveis. As setas indicam a dependência de uma variável com as outras. Os parâmetros do modelo, que são valores fixos para a cultura da cana-de-açúcar, são declarados a parte em outra janela.

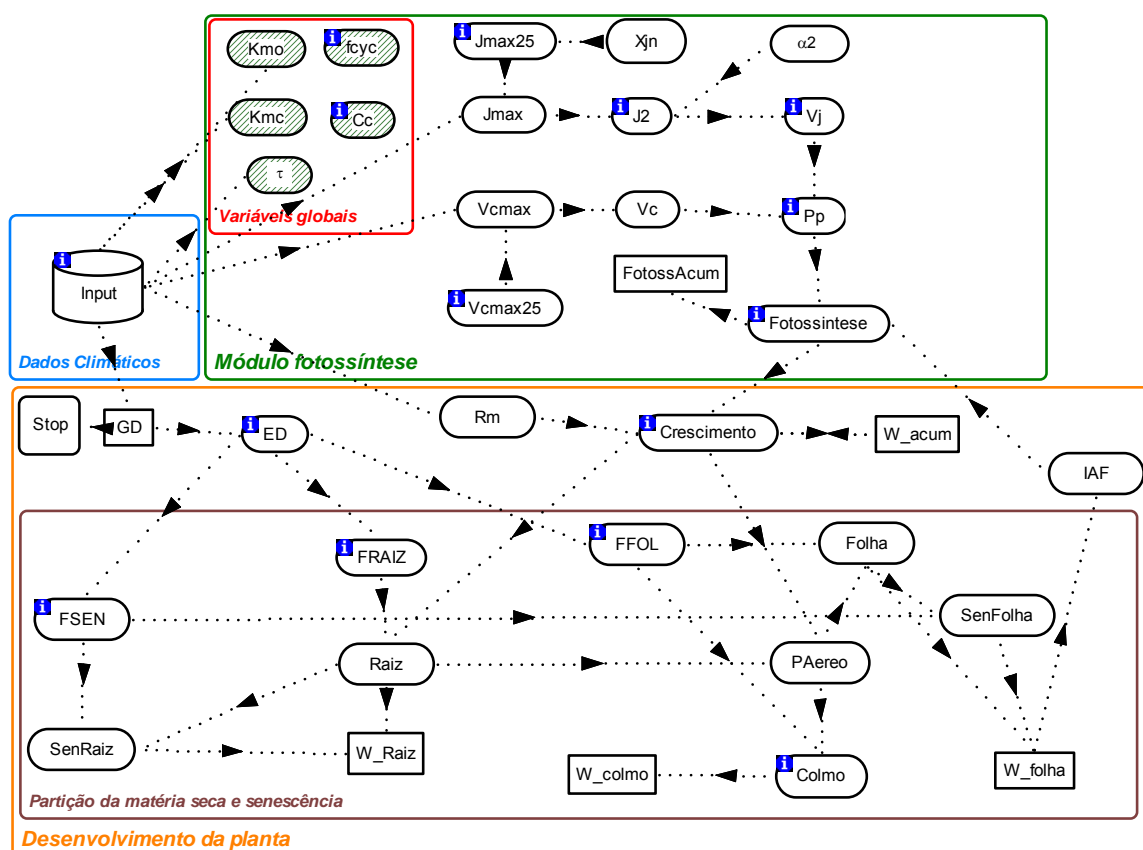


Figura 1.4: Modelo desenvolvido no Model Maker para o cálculo da produtividade potencial da cana-de-açúcar.

O modelo se mostrou muito sensível a variações nos parâmetros nitrogênio e na relação Ci/Ca. Tais parâmetros necessitam ser mais bem estudados, uma vez que tem grande influência na produtividade final simulada pelo modelo.

A sensibilidade do modelo aos dados de entrada (temperatura do ar e concentração de CO₂) é apresentada a seguir, com discussões para as taxas fotossintéticas (item 1.3.2.) e para a produtividade (item 1.3.3.).

1.3.2 Efeitos da Temperatura e do CO₂ na fotossíntese

A fotossíntese instantânea foi calculada a partir do valor mínimo entre as variáveis Vc (taxa de carboxilação limitada pela Rubisco) e Vj (taxa de carboxilação limitada pelo transporte de elétrons). A Figura 1.5 mostra o comportamento destas variáveis com a temperatura.

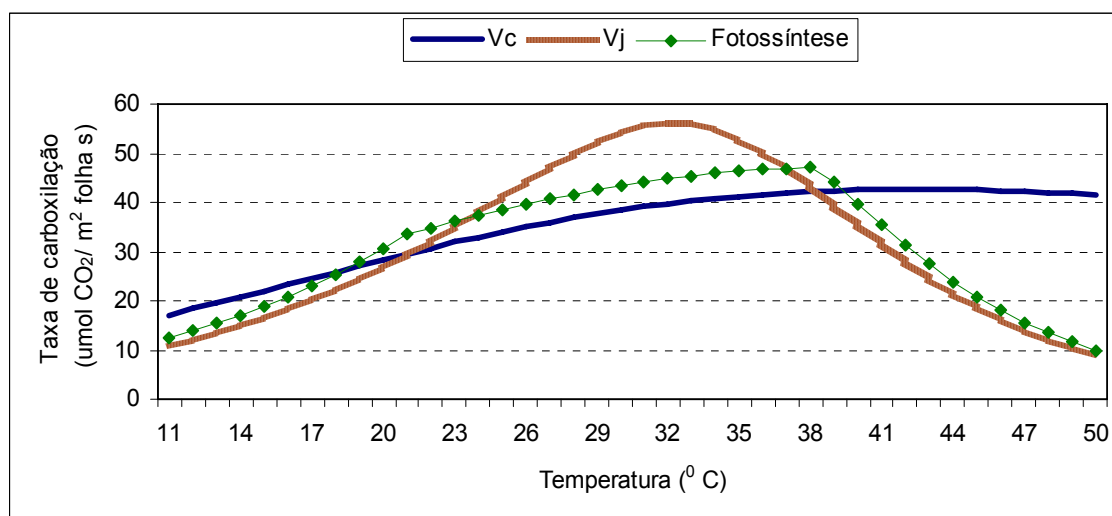


Figura 1.5: Gráfico das taxas de carboxilação (Vc e Vj) em função da temperatura do ar.

No gráfico da Figura 1.5, foi fixado o valor da temperatura entre 11 $^{\circ}\text{C}$ e 50 $^{\circ}\text{C}$ e a concentração de CO₂ atmosférico com 380 ppm, para um estudo da variação das taxas de carboxilação do modelo de fotossíntese proposto. Observa-se que no intervalo de temperatura menor que 22 $^{\circ}\text{C}$, a taxa de fotossíntese é limitada pela taxa de carboxilação da enzima Rubisco. A partir

de então, a fotossíntese passa a ter um comportamento mais linear e a ser limitada pela luz (transporte de elétrons).

A eficiência fotossintética máxima ocorre em 38^oC, a partir deste valor a taxa de fotossíntese começa a diminuir, sendo limitada pela capacidade de carboxilação da Rubisco ou pelo metabolismo das trioses fosfato.

A Figura 1.6 mostra a fotossíntese instantânea simulada com os dados de temperatura reais do experimento realizado em São Paulo por Souza (2007), no período 2005/2006, e com o CO₂ variando de 380 ppm para 720 ppm. Em alguns pontos observa-se uma grande diferença entre as duas simulações, estes pontos referem-se aos dias em que a temperatura foi mais elevada.

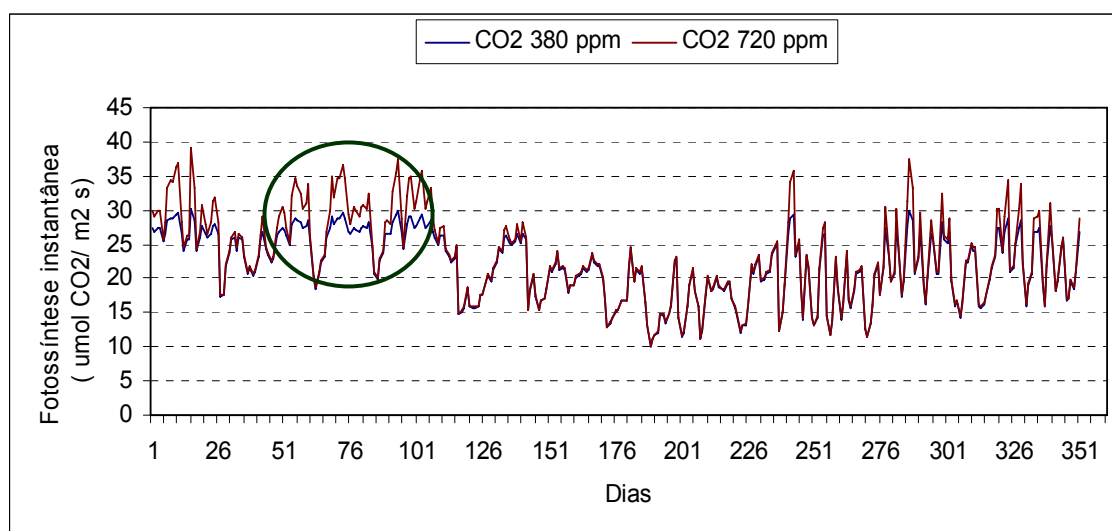


Figura 1.6: Gráfico da fotossíntese bruta diária, em função dos dias, iniciando em 7 de abril de 2005.

A Figura 1.7 corresponde a uma ampliação referente à parte da fotossíntese simulada pelo modelo destacada (circulada) na Figura 1.6, com o acréscimo dos dados de temperatura média diária.

Observa-se que a resposta da cultura é maior nos dias em que a temperatura também foi mais alta. Nestes dias, a diferença entre as duas simulações são claras, com o CO₂ elevado a taxa de fotossíntese instantânea é maior, atingindo valores em torno de 35 molCO₂m⁻²s⁻¹. Nos

dias correspondentes a temperaturas médias mais baixas, (próximos a 20°C) as taxas de fotossíntese também são mais baixas, não havendo diferença entre as duas simulações.

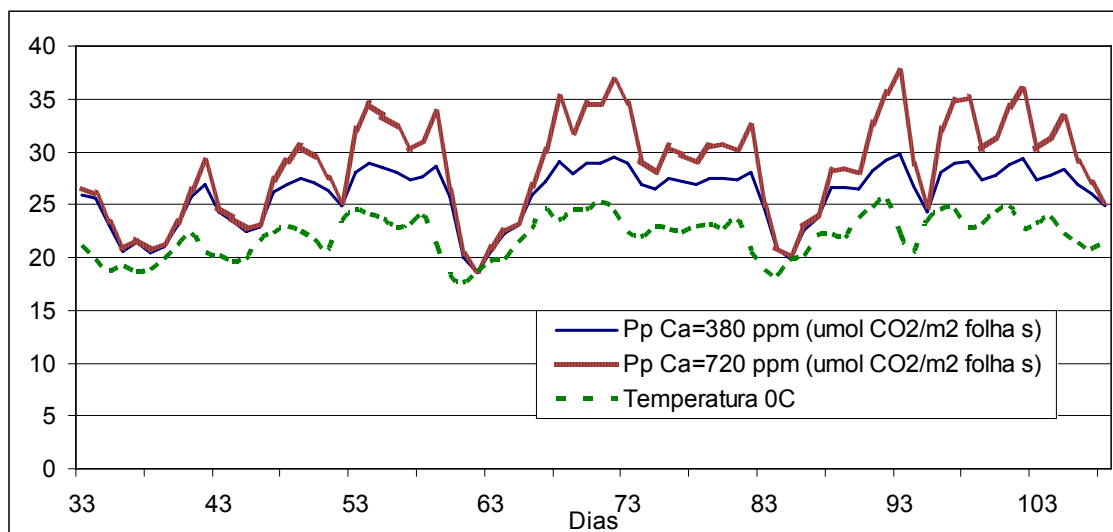


Figura 1.7: Gráfico da fotossíntese bruta diária, com o CO₂ variando de 380 para 720 ppm, e a temperatura média diária de um período da simulação.

Oliveira (2007), em seu estudo durante 50 semanas com a cana-de-açúcar em atmosfera com 720 ppm de CO₂, encontrou valores de fotossíntese instantânea variando de 15 a 35 $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Nas plantas crescidas em concentração de CO₂ elevado, o aumento da taxa fotossintética chegou a 30%, valores próximos ao simulados pelo modelo.

Vu *et al.* (2006) estudaram também a cana-de-açúcar em sistema com atmosfera de 720 ppm de CO₂, observaram um aumento de 20% nas taxas fotossintéticas, em alguns dias do experimento.

Leakey *et al.* (2004) registraram um acréscimo de até 41% na fotossíntese do milho crescido com alto CO₂ (549 ppm). Tal fato foi atribuído à seca, uma vez que, após o início da estação chuvosa, a diferença não foi mais observada.

1.3.3 Sensibilidade na produtividade

Os dados da análise de sensibilidade para produtividade são apresentados na Tabela 1.1 (temperatura) e na Tabela 1.2 (concentração de CO₂).

Tabela 1.1: Análise de sensibilidade do modelo para o cálculo da produtividade da cana-de-açúcar, relativa a temperatura média diária

| Varição na T _m (%) | -10 | -5 | +5 | + 10 |
|--|-----|-----|-----|------|
| Varição na produtividade graus dias (%) | +83 | +63 | -40 | -65 |
| Varição na produtividade ciclo fixo (%) | -44 | -15 | +10 | +18 |

Tabela 1.2: Análise de sensibilidade do modelo para o cálculo da produtividade da cana-de-açúcar, relativa a concentração de CO₂ atmosférico

| Varição do CO ₂ (%) | -30 | -20 | -10 | +10 | +20 | +30 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Varição na produtividade(%) | -58 | -28 | -11 | +19 | +30 | +40 |

Observa-se pela Tabela 1.1 que o modelo apresentou sensibilidade à variável de entrada analisada. A temperatura foi variada de -10% até +10% em cada valor diário utilizado; com isso, a produtividade variou de -65% até +83% para o método de desenvolvimento dos graus dias. Quando o ciclo da cana-de-açúcar foi considerado constante, a produtividade variou entre -44% e +18%.

A grande variação existente na produtividade simulada com o método dos graus dias foi devido à variação do ciclo da cultura. Acréscimos nos valores de temperatura causam um encurtamento das fases fenológicas da planta, como consequência, a produtividade final diminui. Por outro lado, decréscimos na temperatura acarretam em um aumento no ciclo e na produtividade da cultura.

Para o método de desenvolvimento em ciclo fixo, a observação anterior não é válida, uma vez que o aumento da temperatura reflete em um acréscimo na produtividade. Tais observações serão mais bem discutidas no

Capítulo 2, onde o modelo foi aplicado para uma série de dados de projeção futuras de temperatura em duas cidades produtoras de cana-de-açúcar em um período de 15 anos.

A análise de sensibilidade feita com o CO₂ na atmosfera, apresentada na Tabela 1.2, foi feita considerando-se uma concentração de 380 ppm e alterações de $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ e $\pm 30\%$. Observou-se uma variação na produtividade de -58% até $+40\%$.

Expandindo tal análise (Figura 1.8), observou-se que a partir da concentração 680 ppm, correspondente ao acréscimo de 60%, o modelo parece saturar não respondendo mais acréscimo de CO₂.

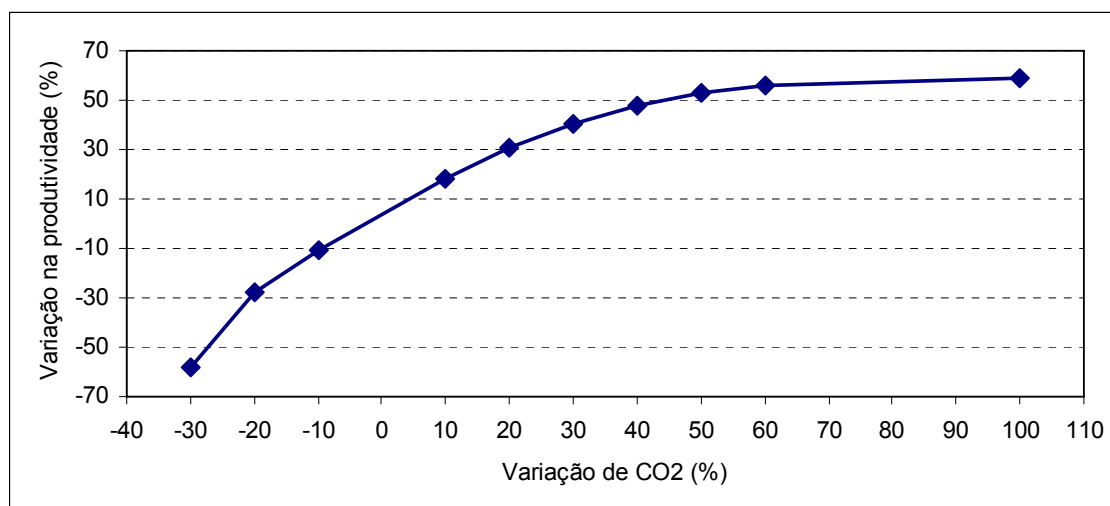


Figura 1.8: Análise de sensibilidade do modelo para o cálculo da produtividade da cana-de-açúcar, relativa concentração de CO₂ atmosférico.

O modelo simulou um acréscimo de 58% na produtividade para uma concentração de CO₂ de 722 ppm, valor semelhante aos obtidos por Souza (2007) e Vu *et.al.* (2006), que em experimentos com cana-de-açúcar em ambiente de CO₂ elevado (720 ppm) encontram uma produtividade 60% e 55% maiores, respectivamente.

1.4 CONCLUSÕES

O modelo de fotossíntese proposto apresentou sensibilidade as variáveis climáticas temperatura média e concentração de CO₂ atmosférico.

Na modelagem realizada durante o desenvolvimento do estudo, observou-se que em temperaturas reduzidas (inferiores a 20^oC), a concentração de CO₂ atmosférico não foi fator de influência na taxa fotossintética da cultura da cana-de-açúcar.

Por outro lado, em dias de temperatura elevada, a taxa de fotossíntese é mais fortemente influenciada pela concentração de CO₂. Como exemplo, cita-se a constatação de diferenças de até 30% na taxa fotossintética, quando comparadas concentrações de 380 ppm e 720 ppm.

Quando considerados valores potenciais de produtividade, o modelo apresentou sensibilidade às variáveis de entrada analisadas (temperatura e CO₂ atmosférico). Tal sensibilidade foi observada tanto para o método do ciclo fixo quanto para o método de graus dias.

CAPÍTULO 2
SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR
EM CENÁRIOS FUTUROS

2.1 INTRODUÇÃO

2.1.1 Mudanças climáticas e modelagem

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a temperatura média mundial já aumentou 0,6°C nos últimos 100 anos e aumentará entre 1,4 e 5,8°C de 1990 a 2100, se as emissões de gases de efeito estufa permanecer com as taxas atuais. Esse aumento de temperatura será acompanhado ainda pela elevação do nível do mar e por uma maior frequência e intensidade de ocorrência dos eventos extremos (IPCC, 2007).

Para analisar o comportamento futuro do clima, o IPCC estabeleceu um conjunto de cenários, com diferentes simulações de emissões de gases de efeito estufa. Os cenários de mudanças climáticas são os seguintes B1, A1T, B2, A1B, A2 e A1F. O A2 é o mais pessimista, que descreve uma alta emissão de gases de efeito estufa, prevendo uma concentração de CO₂ atmosférica para o ano de 2100 próximo a 900 ppm. O B2, o mais otimista, descreve uma situação com baixas emissões prevendo para 2100 uma concentração próxima a 500 ppm. O A1B que será usado neste trabalho é considerado um cenário intermediário.

Os cenários de emissões representam uma visão possível do comportamento futuro de emissões de substâncias que tem um efeito radiativo potencial (gases de efeito estufa e aerossóis), baseado numa combinação coerente e internamente consistente de suposições sobre forçantes controladoras, como demografia, desenvolvimento sócio-econômico e mudança na tecnologia, assim como suas interações (IPCC, 2007)

Nas Figuras 2.1 e 2.2 são visualizados gráficos que relacionam a concentração de CO₂ na atmosfera e o aumento da temperatura média da Terra de acordo com os cenários futuros proposto pelo IPCC.

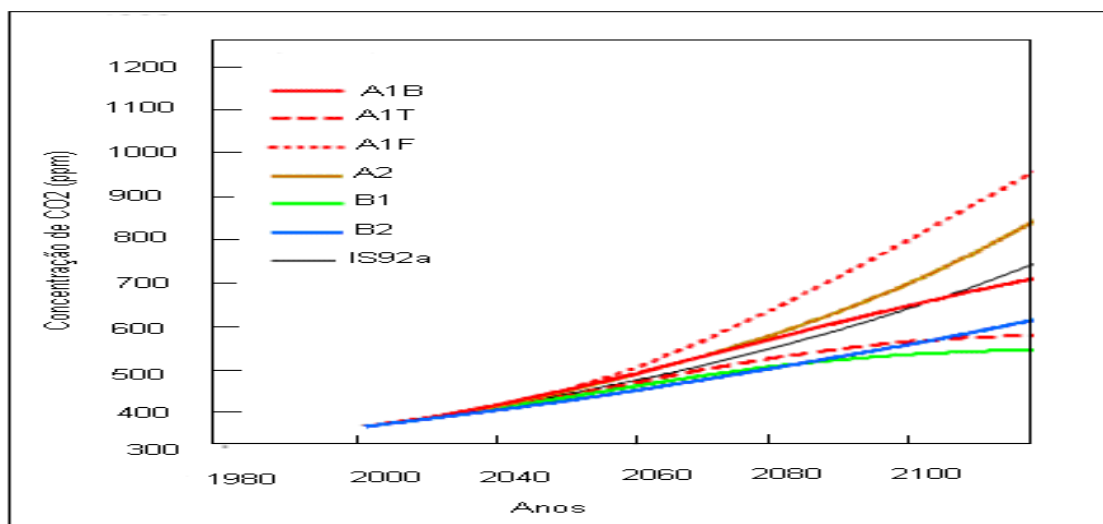


Figura 2.1: Valores simulados das concentrações de CO₂ ao longo dos anos para cenários futuros. (IPCC,2007).

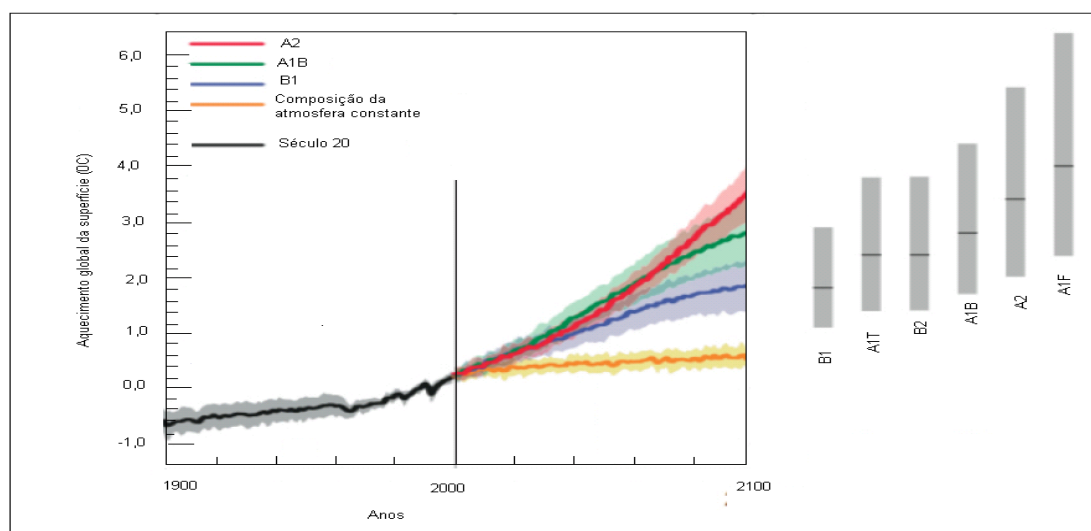


Figura 2.2: Valores simulados para a temperatura média da superfície da Terra ao longo dos anos para os cenários futuros (IPCC, 2007)

Os modelos matemáticos do sistema climático global são ferramentas usadas como instrumentos para projetar cenários prováveis de alterações climáticas para o futuro. Sabe-se que existe um grau de incerteza neste futuro cenário climático do planeta e em particular no Brasil (MARENGO & SOARES, 2005).

Na literatura encontram-se vários modelos com o propósito de traçar a dinâmica de circulação do planeta. Mas na prática, os centros mundiais mais

atuantes em hidrologia, meteorologia e oceanografia disponibilizaram tais concepções para atividades de planejamento, mitigação e desenvolvimento científico. As pesquisas para retratar os fenômenos são conduzidas em duas escalas: uma “global”, de baixa resolução, produzidas por modelos de circulação geral (CGM's); e outra em escala “regional”, de alta resolução, estruturadas em modelos de circulação regional (RCM's).

Há duas grandes fontes de incertezas ao utilizar estes modelos. A primeira é que não se sabe precisamente a trajetória futura das emissões dos gases de efeito estufa, que depende de decisões humanas sobre o caminho sócio-econômico-ambiental desejado e que venha a ser efetivamente implementado. A segunda é que os modelos matemáticos são representações imperfeitas da natureza e que diferentes modelos climáticos diferem substancialmente em suas projeções para o clima do futuro, dado o mesmo cenário de concentrações de gases de efeito estufa. Uma maneira de abordar estas duas incertezas é utilizar vários cenários de emissões de gases de efeito estufa, em diferentes modelos climáticos (NOBRE, 2005).

As mudanças climáticas afetarão diversos setores da atividade humana, especialmente a agricultura. Uma tentativa de amenizar o crescente problema do aquecimento global é o uso da energia limpa, como por exemplo, obtido através da cana-de-açúcar. Ao se utilizar o álcool da cana-de-açúcar como combustível, deixa-se de queimar o petróleo que está no subsolo e, como consequência, tem-se uma diminuição na emissão de CO₂ para atmosfera.

2.1.2 A cana-de-açúcar; aspectos econômicos e fisiológicos

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura bastante difundida no Brasil, sendo principalmente utilizada para produção de açúcar e álcool. Segundo a CONAB (2008), o Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar: a safra 2008/09 está estimada em 558,72 milhões de toneladas, superior em 11,4% à safra anterior. A produção total de açúcar está estimada em 32,78 milhões de toneladas e representa um acréscimo em relação à safra passada de 4,81%. Para a produção de álcool, os

números indicam um volume de produção da ordem de 27,09 bilhões de litros, com um expressivo aumento na produção nacional de 17,73%.

Dos estados brasileiros, São Paulo é o que representa quase 60% da safra nacional (CONAB, 2008). A Tabela 2.1 mostra a produtividade real da cana-de-açúcar, nos últimos anos de duas importantes cidades produtoras de São Paulo.

Tabela 2.1: Produtividade real da cana-de-açúcar do período de 2003 a 2008, para as cidades de Piracicaba e Ribeirão Preto, SP (IBGE)

| Produtividade cana-de-açúcar (t/ha) | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Piracicaba | 80 | 78 | 81 | 80 | 80 |
| Ribeirão Preto | 70 | 70 | 72 | 70 | 70 |

Segundo Veiga *et al.* (2006), a produtividade média da cana-de-açúcar, no Brasil, no período de 1970 a 2004, aumentou de forma significativa, variando de 46,23 t/ha na safra 1970/71 a 73,88 t/ha na safra 2004/05.

A importância dessa cultura está fundamentada, de um lado na produção açucareira, responsável por divisas em termos de exportações, e de outro, na produção de álcool etílico, que com o crescente problema energético e de poluição nas grandes cidades, principalmente a elevada demanda de combustíveis, passou a constituir importante alternativa para substituição de determinados derivados do petróleo.

A cana-de-açúcar tem sua brotação ótima à temperatura de 32°C, e paralisa em valores inferiores a 16°C. É uma planta com metabolismo C4, tendo alta eficiência fotossintética e ponto de saturação luminosa elevada. Portanto, quanto maior a intensidade luminosa, maior seu desenvolvimento e acúmulo de açúcar (BARBIERI, 1981).

Maule *et al.* (2001) conduziram um experimento com nove cultivares de cana-de-açúcar, em diferentes solos e mostraram que temperaturas mais

elevadas e radiação solar favoreceram o desenvolvimento vegetal da cana-de-açúcar. Considerando a planta com 12 meses, em diferentes épocas de colheita.

A influência de fatores como a temperatura, em diferentes culturas, tem sido tema de alguns trabalhos (MEARNS *et al.* 1997, OLIVEIRA 2007), feitos a partir de modelos de simulação.

O efeito do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera sobre a fotossíntese de plantas C₄ é uma questão muito discutida entre os cientistas. Diferentemente das espécies C₃, para as quais os efeitos da alta concentração de CO₂ são bem conhecidos, ainda não foi determinado um padrão geral de respostas para plantas C₄ (AINSWORTH & LONG, 2005). O aumento na taxa fotossintética em culturas C₄ como resposta ao aumento na concentração atmosférica de CO₂ tem sido estudado (GHANNOUM *et al.*, 2000; LEAKEY *et al.*, 2004; VU *et al.*, 2006, SOUZA 2007), mas a discrepância entre as respostas encontradas ainda é enorme.

Souza (2007), em um experimento, mostrou que a cana de açúcar tem capacidade para sequestro de carbono e potencial para aumento de produtividade em condições de alta concentração de CO₂, onde as plantas crescidas nessas condições tiveram um acúmulo de biomassa nas folhas de 25%, no colmo de 60% e a matéria seca total de 40% maiores que as plantas controle crescidas em CO₂ ambiente. Vu *et al.* (2006) observaram como resultado após 16 meses de plantio da cana em CO₂ elevado, um acúmulo na biomassa das folhas de 13,5% e no colmo de 55,5%.

2.1.3 Objetivos

O presente estudo teve como objetivo simular a produtividade potencial da cana-de-açúcar, considerando-se o cenário A1B de mudanças climáticas proposto pelo IPCC, classificando produtividade potencial como o estudo do máximo que uma cultura pode produzir se não houver fatores limitantes. Para tanto foi utilizado o modelo adaptado no Capítulo 1.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área de estudo e dados utilizados

Foram feitas simulações para as cidades de Ribeirão Preto e Piracicaba, grandes produtoras de cana-de-açúcar do estado de São Paulo.

Nas simulações foram usadas as condições climáticas projetadas por um modelo de circulação geral da atmosfera GCM's, que descrevem os principais processos físicos e dinâmicos do sistema climático, o modelo ECHAM5/MPI-OM, desenvolvido no Instituto Max Planck de Meteorologia em Hamburgo, Alemanha.

Foram utilizadas as projeções climáticas de 2005 a 2020 do cenário A1B.

2.2.2 Modelo utilizado

Foi utilizado um modelo descrito no software Model Maker (Figura 2.3), modelo desenvolvido no capítulo 1, que simula a produção de matéria seca diária a partir da temperatura média diária.

O acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar foi calculado a partir de dados diários, baseada na taxa de fotossíntese bruta, estimada a partir da metodologia proposta por Yin e Van Laar (2005). Esta metodologia deriva do conhecimento das relações entre vários tipos de moléculas envolvidas no processo bioquímico de fotossíntese, destacando-se por incluírem detalhadamente as reações bioquímicas de processos como a carboxilase e o transporte de elétrons, e também por terem como variáveis a temperatura média (T_m) e a concentração de CO_2 (C_c).

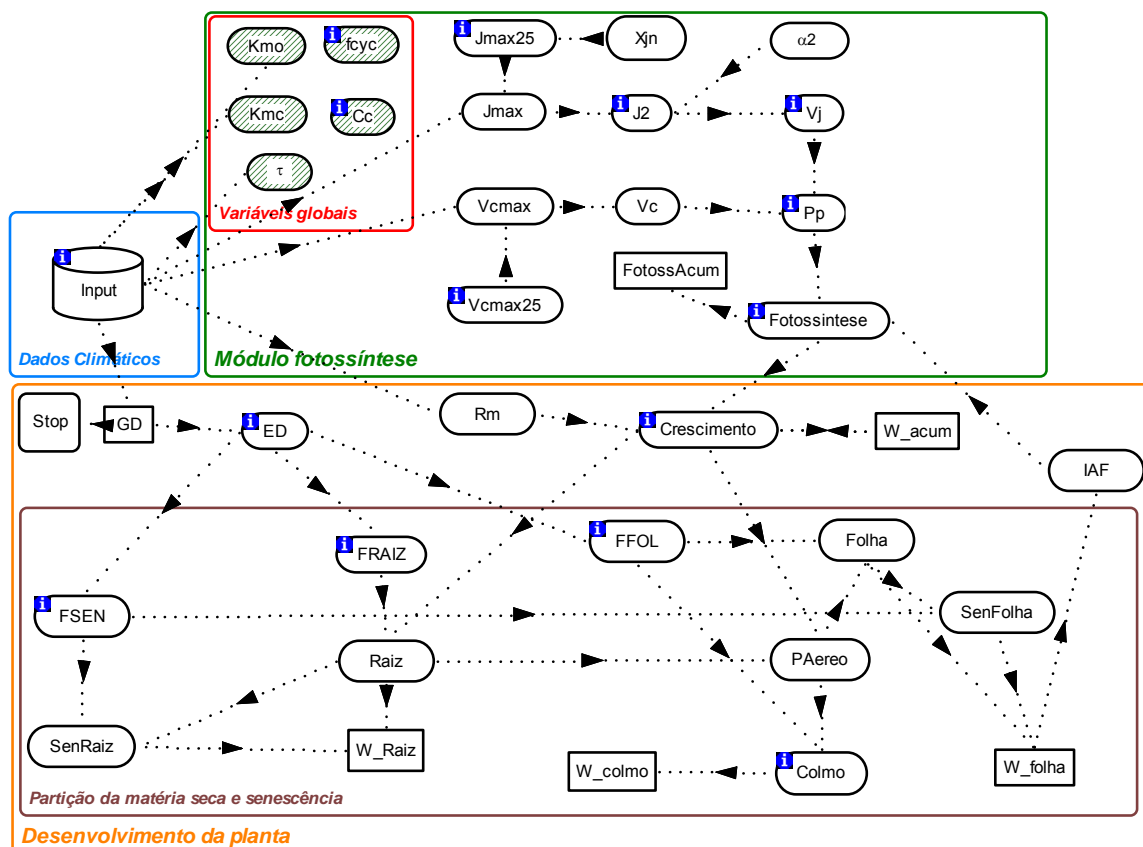


Figura 2.3: Modelo para o cálculo da produtividade potencial da cana-de-açúcar.

A respiração de manutenção, que constitui o consumo de energia necessário à organização estrutural da planta, foi introduzida segundo McCree (1974), como função tanto da matéria seca da cultura quanto da variação de temperatura.

A partição da matéria seca entre as partes da cultura foi feita de acordo com Pereira e Machado (1989).

O estudo do desenvolvimento da cultura foi feito a partir de duas metodologias: A primeira usando a soma térmica dos graus dias (VILLA NOVA *et al.*, 1972) e a segunda mantendo o ciclo da cana-de-açúcar como ciclo fixo (DOORENBOS & KASSAN, 1979)

O modelo foi calibrado com os dados de produtividade e fotossíntese obtidos em um experimento, realizando em laboratório para cultura da cana de açúcar em condições ideais (SOUZA, 2007).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Projeções futuras com base em graus dias

As estimativas das variações percentuais médias na produtividade potencial da cana-de-açúcar, em resposta às condições climáticas futuras, são apresentadas na Tabela 2.2, para a cidade de Ribeirão Preto, no período de 2005-2020, comparados com o ano base 2005. As simulações foram feitas a partir de dados diários de temperatura e CO₂ para o cenário A1B, do modelo ECHAM5/MPI-OM. Estes resultados são referentes à primeira metodologia, a qual o desenvolvimento da cultura é calculado a partir da soma térmica graus dias.

Tabela 2.2: Projeção da variação percentual média da produtividade potencial da cana-de-açúcar, projetados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B), para a cidade de Ribeirão Preto, comparando com o ano base de 2005

| 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|--------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|---------|
| -- | 31,15% | 32,92% | 5,18% | 2,27% | -3,41% | -24,43% | -20,63% |
| 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
| -0,20% | 10,34% | -0,46% | 1,34% | 32,65% | 6,40% | 18,98% | 3,76% |

As simulações mostram que quando comparadas com o ano base, 2005, a produtividade potencial de Ribeirão Preto teve uma variação de -20% até 32%. As maiores quedas aconteceram nos anos de 2011 e 2012 diminuindo 24% e 20% a produtividade, os maiores acréscimos ocorreram em 2006 e 2017, com um aumento 32%.

A Figura 2.4 mostra a produtividade potencial da cana-de-açúcar e a temperatura média anual de Ribeirão Preto no período estudado.

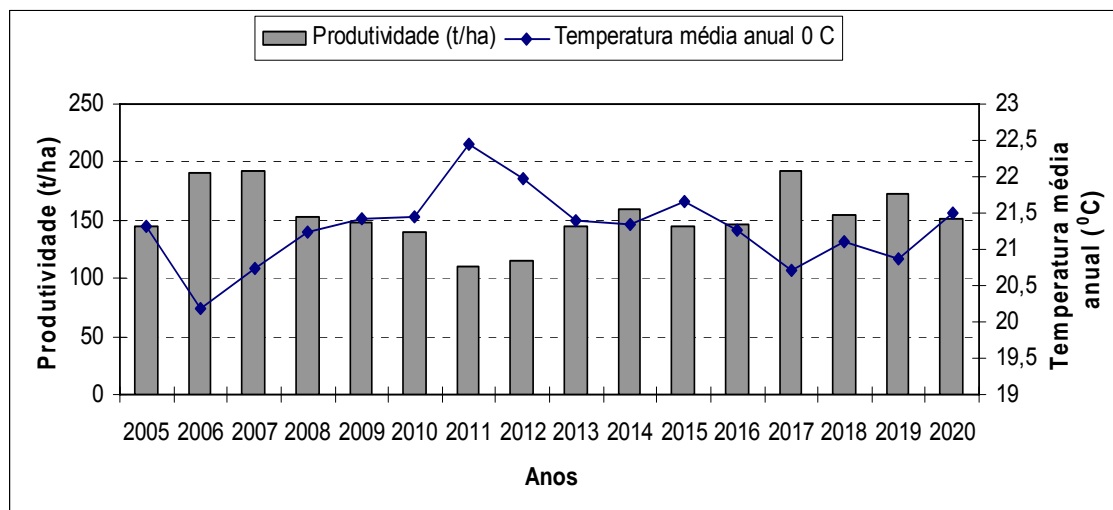


Figura 2.4: Variação da produtividade potencial da cana-de-açúcar, utilizando o conceito de graus dias e da temperatura média anual simulada para a cidade de Ribeirão Preto.

Observa-se pela Figura 2.4 que, quando a temperatura média anual simulada aumenta a produtividade diminuiu, e quando a temperatura média anual diminuiu a produtividade aumenta. Esta variação é principalmente devida, a variação no ciclo da cultura.

A Figura 2.5 mostra a temperatura média anual e número de dias do ciclo da cana-de-açúcar.

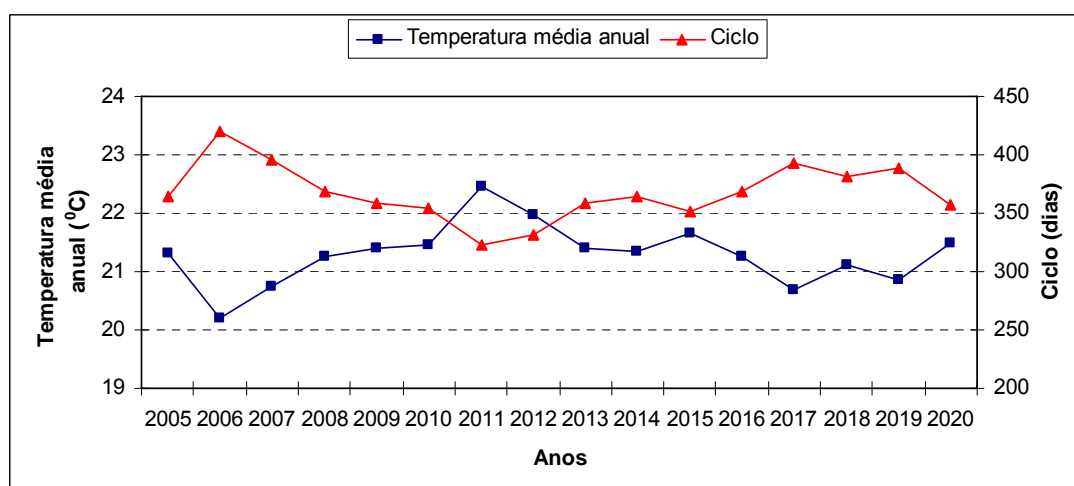


Figura 2.5: Variação da temperatura média anual e da duração do ciclo da cultura da cana-de-açúcar para a cidade de Ribeirão Preto, simulados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM.

A diminuição da produtividade potencial da cana-de-açúcar foi devido à grande redução no ciclo da cultura, que chegou a 42 dias no ano de 2011, correspondendo a 12% no total do ciclo, quando comparando com o ano de 2005. Com isso a cultura não teve tempo de se desenvolver. O ano de 2006 que teve a menor temperatura média, o ciclo da cultura aumentou 15%.

O mesmo estudo foi feito para a cidade de Piracicaba, estimando as variações percentuais médias na produtividade potencial da cana-de-açúcar, para a primeira metodologia (graus dias), durante o período de 2005-2020, comparados com o ano base 2005 (Tabela 2.3).

Tabela 2.3: Projeção da variação percentual média da produtividade potencial da cana-de-açúcar, projetados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1B), para a cidade de Piracicaba, comparando com o ano base de 2005

| 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| - | 19,71% | 26,92% | -0,23% | -6,86% | -5,02% | -39,08% | -49,48% |
| 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
| -1,37% | 10,17% | 2,75% | 10,36% | 40,33% | 8,06% | 5,36% | -12,55% |

As estimativas mostram que quando comparados com 2005, a produtividade potencial da cana-de-açúcar teve uma variação de -49% até 40%, para a cidade de Piracicaba. Os anos de 2011 e 2012 tiveram as maiores quedas de 39% e 49%, e o ano de 2017 o maior incremento na produtividade de 40%

A Figura 2.6 mostra a produtividade potencial da referida cultura e a temperatura média anual.

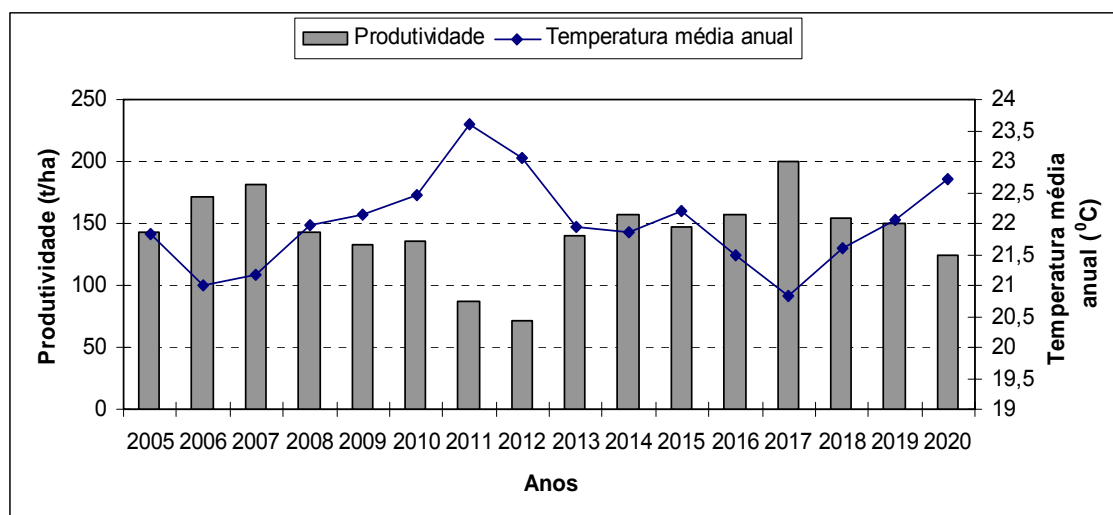


Figura 2.6: Variação da produtividade potencial da cana-de-açúcar, utilizando o conceito de graus dias e da temperatura média anual simulada para a cidade de Piracicaba.

Da mesma forma que ocorreu com a cidade de Ribeirão Preto, os anos que tiveram temperaturas mais elevada, diminuíram a produtividade, já os anos com temperatura mais baixa a produtividade aumentou. Acredita-se que esta variação seja devida principalmente, a variação no ciclo da cultura.

A Figura 2.7 mostra o número de dias do ciclo da cultura e a temperatura média anual para a cidade de Piracicaba. A maior redução no ciclo da cana-de-açúcar foi no ano de 2011 diminuindo 52 dias, correspondendo a 15% do ciclo, quando comparado com o ano base 2005. Já o ano de 2017 com menor temperatura média anual, teve seu ciclo com 44 dias a mais correspondendo a 12% no total do ciclo.

Para as duas regiões estudadas a maior estimativa de perda na produtividade são os anos de 2011 e 2012, que além de terem as maiores temperaturas médias anuais, possuem um inverno com temperaturas elevadas comparadas com os outros anos.

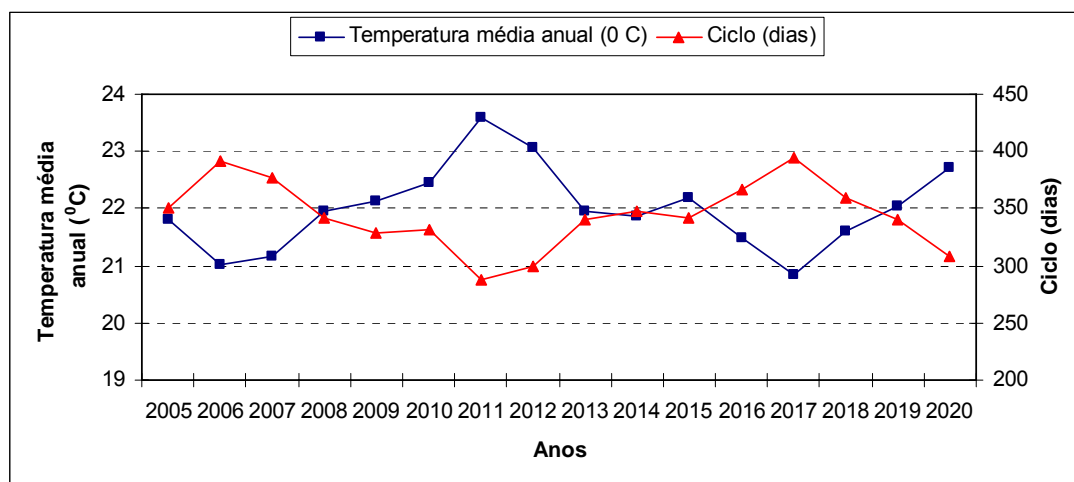


Figura 2.7: Variação da temperatura média anual e da duração do ciclo da cultura da cana-de-açúcar para a cidade de Piracicaba, simulados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM.

Ribeirão Preto teve um aumento de $1,3^{\circ}\text{C}$, na temperatura média anual em 2011 diminuindo em 24% a produtividade. Para a cidade de Piracicaba este mesmo ano teve uma queda na produtividade de 39% e um aumento de $1,8^{\circ}\text{C}$ na temperatura, porém este não foi a maior perda para a cidade de Piracicaba. Em 2012 com um aumento de $1,3^{\circ}\text{C}$ na temperatura média a produtividade diminuiu 49%, acredita-se que isso tenha ocorrido devido às altas temperaturas simuladas para o período de inverno deste ano.

De acordo com Maule *et al.* (2001), a produtividade da cana-de-açúcar varia com a época de plantio, a temperatura e as condições hídricas do solo têm grande importância no período de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Oliveira (2007), ao simular a produtividade do milho (cultura C4) para cenários futuros, mostrou uma queda na produtividade com o aumento da temperatura. De acordo com o estudo de Mearns *et al.* (1997), um aumento de 2°C na temperatura média reduziria a produtividade, simulada no modelo CERES-Wheat, em 25%, para o trigo (cultura C3, com o ciclo de 100 a 120 dias) nos Estados Unidos.

Os estudos mostram que, quando os estádios de desenvolvimento da cultura são considerados a partir da soma térmica dos graus dias um

acréscimo na temperatura, tem como consequência um encurtamento das fases fenológicas da planta e a produtividade final, conseqüentemente, é menor, uma vez que com temperatura elevada a taxa de fotossíntese instantânea da cana-de-açúcar é maior, e mesmo com as taxas de respiração de manutenção mais elevada o acúmulo de matéria seca aumenta. Entretanto, tal fato é compensado com a diminuição do tempo para a cultura crescer em cada estágio do desenvolvimento.

Considerando que graus dias pode ser apenas uma referência, na qual descreve o desenvolvimento da planta. Foi feita uma segunda metodologia para calcular o estágio fonológico da cultura, onde foi considerado constante o ciclo da cultura (350 dias) como cana-de-ano.

2.3.2 Projeções futuras com ciclo fixo

As estimativas para as variações percentuais médias na produtividade potencial da cana-de-açúcar, comparadas com o ano base 2005, considerando o ciclo fixo são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.4: Projeção da variação percentual média da produtividade potencial da cana-de-açúcar, projetados a partir dos dados do modelo ECHAM5/MPI-OM (cenário A1b), comparadas com o ano base 2005

| Ribeirão Preto | | | | | | | |
|----------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
| ano-base | -9,92% | -2,81% | 8,93% | -2,99% | -7,55% | 36,62% | 53,57% |
| 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
| 1,32% | 22,32% | 9,92% | 26,74% | -6,23% | 16,69% | -7,69% | 9,33% |
| Piracicaba | | | | | | | |
| 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
| ano-base | 4,95% | -8,00% | 13,65% | 1,81% | 0,07% | 27,83% | 52,11% |
| 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
| 6,22% | 23,89% | 1,16% | 20,35% | -21,66% | 16,64% | 11,95% | 21,89% |

As estimativas mostram que, quando comparados com o ano base 2005, a produtividade potencial da cana-de-açúcar teve uma variação de -21% até 52%, para a cidade de Piracicaba e de -7% a 53% para a cidade de Ribeirão Preto.

Os anos de 2011 e 2012 foram os que tiveram um maior aumento na produtividade nas duas cidades, 36% e 53% em Ribeirão Preto, e 27% e 52% em Piracicaba. A maior perda de produtividade em Ribeirão Preto acontece no ano de 2019 com uma queda de 7%, em Piracicaba já foi no ano de 2017 com uma diminuição de 21% na produtividade.

As Figuras 2.8 e 2.9 mostram a produtividade potencial da cana-de-açúcar considerando o ciclo fixo, e a temperatura média anual, para as duas cidades estudadas.

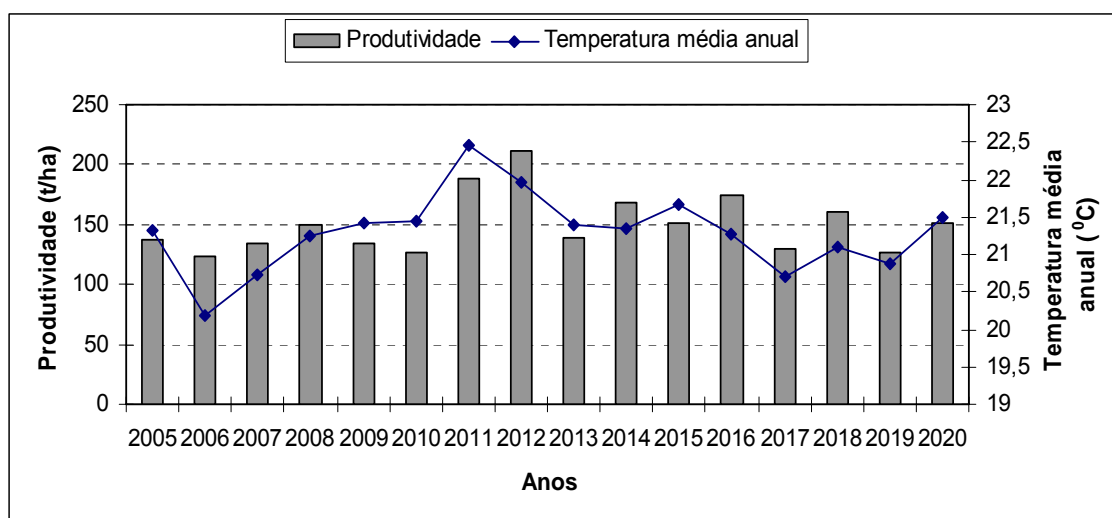


Figura 2.8: Temperatura média anual e produtividade potencial da cana-de-açúcar, considerando ciclo fixo, para a cidade de Ribeirão Preto.

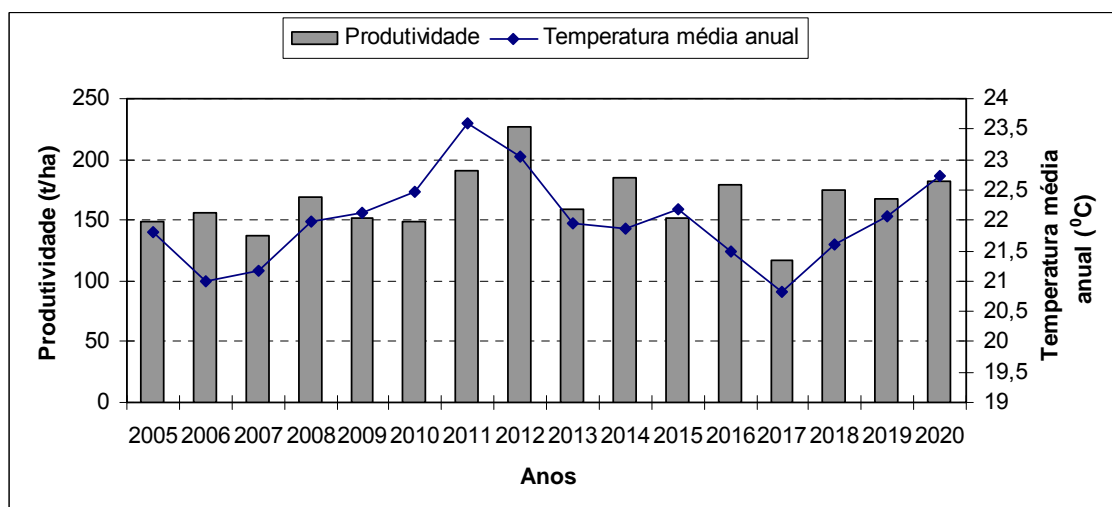


Figura 2.9: Temperatura média anual e produtividade potencial da cana-de-açúcar, considerando ciclo fixo, para a cidade de Piracicaba.

Em ambas as cidades, observa-se que, quando o ciclo da cana-de-açúcar é considerado fixo, a produtividade aumenta quando a temperatura aumenta e diminui quando a temperatura está mais baixa.

Maule *et al.* (2001) mostram que temperaturas mais elevadas e radiação solar favoreceram o desenvolvimento vegetal da cana-de-açúcar, considerando ciclo fixo.

Observa-se um pequeno aumento na produtividade nos últimos anos, devido ao aumento na concentração de CO₂. Simulando a produtividade potencial da cana-de-açúcar com os dados de temperatura diários projetados para 2020, usando as concentrações correspondentes a 2005 e 2020, que foram de 376 ppm e 418 ppm respectivamente, tem-se um incremento de 15% na produtividade para o ano com 418 ppm. Souza (2007) mostrou em experimento que aumentando a concentração de CO₂ de 370 para 720 ppm as taxas fotossintética aumentaram e a produtividade aumentou em 60%.

Como na segunda metodologia fixaram-se as fases fenológicas da planta, a cultura mesmo com a temperatura mais elevada teve tempo para desenvolver. O aumento da temperatura foi então, benéfico para a cana-de-açúcar, que com as taxas de fotossínteses mais altas, teve um maior acúmulo de matéria seca, mesmo considerando aqui as taxas de respiração de manutenção aumentando com a temperatura.

O modelo de Doorenbos e Kassan (1979) considera a duração do ciclo da cultura como fixo. Terramoto (2003), com o uso deste modelo para a cana-de-açúcar com o ciclo fixo de 350 dias, encontrou variações na produtividade da cana de até 79% dependendo da época de plantio, Neste modelo, no entanto, consideraram-se restrições hídricas.

É importante ressaltar que os resultados aqui apresentados referem-se à produtividade potencial, e que são necessários estudos mais específicos, uma vez que neste trabalho, as simulações não consideraram restrição hídrica e nutricional, pragas e doenças, nem a ocorrência de eventos extremos.

2.4 CONCLUSÕES

Quando o modelo proposto considera o desenvolvimento da cultura com o método em graus dias, observou-se que em anos com temperaturas médias anuais elevadas, o ciclo da cana-de-açúcar diminui, e conseqüentemente tem-se uma menor produtividade potencial.

Por outro lado, quando o modelo simulou a produtividade considerando o método de ciclo fixo, os valores de produtividade potencial previstos foram maiores em anos com maiores temperaturas médias anuais, uma vez que, nesse caso, a cultura ainda dispõe de tempo suficiente para o seu desenvolvimento: aumentos nas temperaturas não acarretam mudanças nos estágios fenológicos.

A simulação dos dados de produtividade potencial nas cidades de Ribeirão Preto e Piracicaba considerando-se o cenário A1B proposto pelo IPCC indicam que, a ferramenta aqui desenvolvida pode ser usada como alternativa aos modelos convencionais, alertando para as diferenças nas duas metodologias.

CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES

O modelo de fotossíntese analisado nessa dissertação, usando a metodologia de Yin e Van Laar (2005), com adaptações às mudanças climáticas, apresentou sensibilidade às variáveis climáticas temperatura média do ar e concentração de gás carbonico atmosférico.

Durante o estudo observou-se que, em dias de temperatura elevada, a taxa de fotossíntese é mais influenciada pela concentração de CO₂. Constatou-se diferenças de até 30% na taxa de fotossíntese, quando comparadas concentrações de 380 ppm e 720 ppm. Por outro lado, temperaturas reduzidas, a concentração de CO₂ atmosférico não foi fator de influência na taxa fotossintética da cultura da cana-de-açúcar.

Para estudar a produtividade potencial da cana-de-açúcar, o modelo de fotossíntese foi acoplado a um módulo de desenvolvimento da cultura, que foi feito de acordo com dois métodos (graus dias e ciclo fixo), os quais apresentaram resultados opostos.

Quando o modelo proposto considerava o desenvolvimento da cultura pelo método da soma térmica dos graus dias, em anos com temperaturas médias anuais elevadas, o ciclo da cana-de-açúcar era reduzido, e consequentemente uma menor produtividade potencial era prevista. Já em anos com temperaturas médias anuais baixas, o ciclo e a produtividade aumentavam.

Por outro lado, quando o modelo simulou a produtividade considerando o método de ciclo fixo, os valores de produtividade potencial previstos foram maiores em anos com maiores temperaturas médias anuais, uma vez que, nesse caso, a cultura ainda dispõe de tempo suficiente para o

seu desenvolvimento: aumentos nas temperaturas não acarretam mudanças nos estágios de desenvolvimentos.

As simulações feitas com o cenário A1B do IPCC, para as duas cidades, Ribeirão Preto e Piracicaba, mostram resultados de previsão de produtividade potencial da cana-de-açúcar diferentes para os dois métodos. Na metodologia dos graus dias é considerada apenas uma referência a partir da soma térmica, mas no modelo de simulação é necessário que fixe os graus dias total em um valor constante, e com isso, não se considera, por exemplo, as variações em torno da temperatura média apresentada ao longo de um dia. Também não é considerada nesse método uma possível adaptação da cultura com o passar dos anos.

Já quando o ciclo da cana-de-açúcar é considerado fixo, a cultura é estudada como cana-de-ano, independente das temperaturas diárias referentes a este ano. Como consequência, tem-se como resultado um aumento na produtividade potencial da cana-de-açúcar, quando cenários de alta temperatura são considerados.

Como sugestões para futuros estudos os seguintes tópicos podem ser considerados:

- Maiores estudos sobre a influência da temperatura no ciclo da cultura.
- Acoplar ao modelo módulos como balanço hídrico e fatores do solo para a tentativa de previsões de produtividade reais.
- Experimentos com a cultura da cana-de-açúcar com CO₂ elevado, juntamente com temperaturas elevadas.

REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, E.A. & LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free air-CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, v.165 p. 351-372, 2005.
- ALLISON, J.C.S; WILLIAMS, H.T.; PAMMENTER, N.W. Effect of specific leaf nitrogen on photosynthesis of sugarcane, **Annals of Applied Biology**, V. 131, p.339-350, 1997.
- ASSIS, J. P. **Modelo estocástico para estimação da produtividade potencial de milho em Piracicaba-SP**. 2004. 192 f. Tese – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2004.
- BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. Tese, universidade de São Paulo, Piracicaba, 142p 1981.
- BATTISTI, D.S. & NAYTOR, R.I. Historical Warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. **Science**, v. 323, p. 240-244, 2009
- BOOTE, K.J, JONES, J.W., PICKERING, N.B., Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, v.88, p. 704-716, sep/oct. 1996.
- CONAB: Companhia **Nacional de Abastecimento. Cana-de-açúcar, levantamento de produção**, SAFRA 2008/2009. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em jan 2009.
- COSTA, L. C. Modelagem e simulação em agrometeorologia. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 10. Piracicaba, 1997. **Anais**. Piracicaba: SBA, 1997. p.3-6
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. **Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage**. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Paper,33)
- EASTERLING, W. E.; MEANS, L. O.; HAYS, C. J.; MARX, D. Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios. Part II. Accounting for adaptation and CO₂ direct effects. **Climate Change**, v.51, p.173-197, 2001.

EWERT, F.; ROUNSEVELL, M. D. A.; REGINSTER, I.; METZGER, M. J.; LEEMANS, R. Future scenarios of European agricultural land use. I. Estimating changes in crop productivity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.107, p.101-116, 2005.

FAO. Food and Agriculture Organization. **World agriculture: towards 2015/2030**. A FAO Perspective. London: Earthscan Publications LTDA, 2003.

FARQUAR, G.D., VON CAEMMERES, S. AND BERRY, J.A., A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. **Planta** 149, p. 78-90, 1980.

GHANNOUM, O., VON CAEMMERER, S., ZISKA, L.H. E CONROY, J.P. The growth response of C₄ plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment. **Plant, Cell and Environment**, v.23, p.931-942, 2000.

GOUDRIAAN & J, VAN LAAR, H.H., Relations between resistance, CO₂-concentration and CO₂-assimilation in maize, beans, lalang grass and sunflower. **Photosynthetica**. v.12, p.241-249.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso em jan 2009.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press: Cambridge, 2007.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. Tradução: Carlos Henrique Britto de Assis Prado. São Carlos: RiMa, 2006. 531p.

LEAKEY, A.D.B., Bernacchi, C.J., Dohleman, F.G., Ort, D.R. & Long, S.P. Will photosynthesis of maize (*Zea mays*) in the US Corn Belt increase in future [CO₂] rich atmospheres? An analyses of diurnal courses of CO₂ uptake under free-air concentration enrichment (FACE). **Global Change Biology** v.10, p. 951- 962, 2004.

LUO, Q.; BELLOTI, W.; WILLIAMS, M.; BRYAN, B. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.132, p. 273-285, 2005.

MAULE, F.R.; MAZZA, A.J.; MARTHA, G.B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, v.58, n.2, p.295-301, 2001.

MARENGO, J.A.; SOARES, W.R. **Impacto das mudanças climáticas no Brasil e possíveis futuros cenários climáticos**: Síntese do terceiro relatório do IPCC de 2001. CPTEC-INPE, p.29 2005.

McCREE, K. J. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum, as function of dry weight, photosynthesis rate and temperature. **Crop Science**, Madison, v.14, p.509-514, 1974.

NOBRE, C. A. **Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudança do clima**. In: Brasil, Presidência da República. Núcleo de Assuntos Estratégicos. Mudança do Clima: Negociações internacionais sobre a mudança do clima. Brasília. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, v. 1 parte 2, p. 147-216, 2005

OLIVEIRA, L.J.C, **Mudanças climáticas e seus impactos na produtividade das culturas do Feijão e do milho no estado de Minas Gerais**, UFV, MG, 2007.

PARRY, M. L.; ROSENZWEIG, C.; IGLESIAS, A.; LIVERMORE, M.; FISCHER, G. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. **Global Environmental Change**, v.14, p.53-67, 2004.

PENNING DE VRIES, F.T.W. The cost of maintenance processes in plant cells. **Annals of Botany**. Wageningen, v.39, p.77-92, 1975.

PEREIRA, R.A. & MACHADO, C.E., Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar, **Bragantina**, v. 45, p. 107-122, 1986.

QIONG, G., ZHANG, X., HUANG, Y., XU, H., A comparative analysis of four models of photosynthesis for 11 plant species in the loess Plateau, **Agricultural and forest meteorology**, v.126, p. 2003-222, 2004.

RICHTER, G.M.; SEMENOV, M.A. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. **Agricultural Systems**, v. 84, p. 77-97, 2005.

SCARPARI, S.M, **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum.spp*) através de parâmetros climáticos**. Dissertação, Piracicaba, SP, 2002.

SOUZA, A.P, **A cana-de-açúcar e as mudanças climáticas: efeitos de uma atmosfera enriquecida em CO₂ sobre o crescimento desenvolvimento e metabolismo de carboidratos de *Saccharum ssp***. Dissertação de mestrado, USP, SP, 2007.

TERRAMOTO, E.R., **Avaliação e aplicação de modelos de estimativas de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) baseado em parâmetros do solo e do clima**, Tese, Piracicaba, SP, 2003.

THORNLEY, J. H. M. **Mathematical models in plant physiology: A quantitative approach to problems in plant crop physiology**. London: Academic Press, 1976. 318 p.

TOJO SOLER, C. M. **Uso do modelo Ceres-Maize para previsão de safra do milho “safrinha”**. 2004. 146 f. Tese, Piracicaba,SP, 2004.

VU, J.C.V., ALLEN Jr, L.H. & GESCH, R.W. Up-regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated growth CO₂. **Plant Science** v.171, p. 123-131, 2006.

YIN, X., SCHAPENDONK, A.H.C.M, Simulating the partitioning of biomass and nitrogen between root and shoot in crop and grass plants. NJAS-Wageninge **Journal of Life Sciences** v. 51, P. 407-426, 2004.

YIN, X., VAN LAAR. H. H, **Crop Systems Dynamics an ecophysiological simulation model for genotype-by-environment interactions**, Wageningem Academic Publishers, The Netherlands, 2005.

ZHANG, X. C.; LIU, W. Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 131, p.127-142, 2005.
67.