

Universidade de São Paulo
Escola Superior De Agricultura “Luiz De Queiroz”

Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da
cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP

Júlia Ribeiro Ferreira Gouvêa

Dissertação apresentada para obtenção
do título de Mestre em Agronomia. Área de
concentração: Física do Ambiente Agrícola

Piracicaba
2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Júlia Ribeiro Ferreira Gouvêa
Engenheira Ambiental

**Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da
cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**

Orientador:

Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

Dissertação apresentada para obtenção do
título de Mestre em Agronomia. Área de
concentração: Física do Ambiente Agrícola

Piracicaba
2008

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Gouvêa, Júlia Ribeiro Ferreira

Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP / Júlia Ribeiro Ferreira Gouvêa. - - Piracicaba, 2008.
98 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Agrometeorologia 2. Balanço hídrico 3. Cana-de-açúcar 4. Modelos matemáticos
5. Mudança climática I. Título

CDD 633.61

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Dedico aos meus pais, José Roberto e Helenice,
pelo amor incondicional, pelo apoio e por acreditarem e confiarem em mim.
Ao meu irmão André, por me ensinar que é preciso ter bom humor para ser livre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Paulo Cesar Sentelhas, pela amizade, confiança, ensinamentos e por toda a força dada durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe, pela ajuda com a tradução, pela união e amizade.

Ao meu namorado Thiago, pelo amor, carinho, paciência e compreensão.

À minha família e amigos, pelo apoio e pelas visitas que tornaram minha estada em Piracicaba mais agradável e divertida.

Às minhas queridas amigas Ana e Jack, pelas longas conversas, sugestões e incansáveis discussões. À Andrea e Greice, pelo carinho e ajuda.

Ao Prof. Fábio Marin, pela amizade e por me mostrar um novo caminho.

Ao Prof. Luiz Roberto Angelocci, pelo incentivo.

Ao colega Marcelo Cabral dos Santos pela colaboração.

À Ana Haraguchi pela amizade e apoio com a tradução.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Ângela, Chiquinho, Fernando e Eduardo, por terem me ajudado sempre que precisei.

À Silvia Zinsly pelas correções e colaboração.

Ao Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP, por permitir a realização do curso de mestrado e o desenvolvimento desta pesquisa.

À Capes, pela bolsa de estudos.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 A produção da cana-de-açúcar no Brasil	17
2.2 A cultura da cana-de-açúcar	18
2.2.1 Fatores condicionantes da produção de cana-de-açúcar	18
2.2.1.1 Fatores climáticos	18
2.2.1.1.1 Radiação solar	19
2.2.1.1.2 Temperatura.....	19
2.2.1.1.3 Disponibilidade hídrica	20
2.2.1.1.4 Fotoperíodo.....	21
2.2.1.1.5 Concentração de CO ₂ na atmosfera	21
2.2.1.2 Fatores edáficos.....	23
2.2.1.3 Fatores da cultura	25
2.3 Necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar.....	26
2.4 Modelos agrometeorológicos de estimativa da produtividade de culturas	28
2.5 Método da Zona Agroecológica	31
2.6 Efeito da deficiência hídrica sobre a produtividade das culturas.....	33
2.6.1 Evapotranspiração	33
2.6.2 Balanço hídrico	35
2.7 Aquecimento global e mudanças climáticas	36
2.7.1 Impactos das mudanças climáticas na agricultura.....	39

3 MATERIAL E MÉTODOS.....	42
3.1 Localização e dados climatológicos.....	42
3.2 Estimativa da produtividade potencial da cana-de-açúcar.....	43
3.2.1 Determinação da produtividade potencial bruta padrão (PPB _P).....	44
3.2.1.1 Determinação dos coeficientes cTc e cTn.....	45
3.2.1.2 Determinação do coeficiente de índice de área foliar (C _{IAF}).....	45
3.2.1.3 Correção para a respiração (C _{RES}).....	45
3.2.1.4 Determinação do coeficiente de colheita (C _{COL}).....	46
3.2.1.5 Determinação do coeficiente de umidade (C _{UM}).....	46
3.3 Estimativa da produtividade real em função da deficiência hídrica.....	46
3.3.1 Estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc).....	47
3.3.2 Determinação do balanço hídrico da cultura (BH).....	48
3.3.3 Estimativa da produtividade real.....	48
3.3.4 Calibração do modelo de estimativa das produtividades potencial e real.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
4.1 Impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica regional em Piracicaba, SP.....	59
4.1.1 Balanço hídrico climatológico normal.....	59
4.2 Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana-de-açúcar em Piracicaba, SP.....	62
4.3 Panorama do setor canavieiro diante das mudanças climáticas na região de Piracicaba, SP.....	84
5 CONCLUSÕES.....	86
REFERÊNCIAS.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de água pela cana de açúcar, obtido em condições de campo	20
Tabela 2 - Coeficientes de cultura (K_c) para cana planta e cana soca em diferentes períodos de desenvolvimento	48
Tabela 3 - Coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) calibrados para a cultura da cana-de-açúcar em diferentes períodos de desenvolvimento	49
Tabela 4 - Projeção do aquecimento médio global da superfície no final do século XXI.	51
Tabela 5 - Cenários futuros do clima com combinações de alteração de temperatura e precipitação, de acordo com os prognósticos do modelo A1B do IPCC (2007).....	55
Tabela 6 - Cenários futuros do clima com as alterações de insolação, de acordo com os prognósticos do modelo A1B do IPCC (2007)	56
Tabela 7 - Cenários futuros do clima, baseados nas combinações de alteração de produtividade decorrente do aumento de CO_2 , de acordo com os prognósticos do modelo A1B do IPCC (2007) e pelo avanço tecnológico, segundo os dados do CENSO e do PAM (produção agrícola municipal) do IBGE (2007)	57
Tabela 8 - Produtividade média da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, baseada nas informações do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA – (IBGE, 2007), considerando-se os dados do CENSO para os anos de 1980 e 1985 e do PAM – Produção Agrícola Municipal – para os anos de 1990 a 2006.....	57
Tabela 9 - Chuva, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real, deficiência hídrica e excedente hídrico anuais, obtidos por meio do balanço hídrico normal, para o cenário atual e para os cenários de mudanças climáticas	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar	27
Figura 2 - Concentrações de dióxido de carbono atmosférico (CO ₂) do ano 1000 a 2000	38
Figura 3 - Área plantada por município com a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo	43
Figura 4 - Relação entre a produtividade real estimada pelo modelo da FAO e observada em condições de campo, nos municípios de Jaú e Jaboticabal, SP, para as variedades. RB72454, SP801842 e SP801816, do primeiro ao terceiro corte	50
Figura 5 - Projeções das mudanças na temperatura em relação ao período de 1980 a 1999, baseadas nas projeções médias do Multi-modelo de Circulação Geral da Atmosfera-Oceano para a média do cenário A1B do RECE ao longo das décadas de 2020 a 2029 (à esquerda) e 2090 a 2099 (à direita)....	52
Figura 6 - Mudanças relativas na precipitação (em porcentagem) para o período de 2090 a 2099, em relação ao período de 1980 a 1999, com base no cenário A1B do RECE, para os meses de dezembro a fevereiro (à esquerda) e de junho a agosto (à direita). As áreas brancas são onde menos de 66% dos modelos concordam com o sinal da mudança e as áreas pontilhadas são onde mais de 90% dos modelos concordam com o sinal da mudança.....	52
Figura 7 - Relação entre a chuva e a insolação, na escala decendial, nos períodos de (a) primavera/verão e (b) outono/inverno, em Piracicaba, SP.	54
Figura 8 - Tendência tecnológica da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, baseada em informações do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA – (IBGE, 2007), considerando-se os dados do CENSO para os anos de 1980 e 1985 e do PAM – Produção Agrícola Municipal – para os anos de 1990 a 2006	58
Figura 9 - Deficiência hídrica, excedente hídrico e chuva anuais para a condição atual (C0) e para os diferentes cenários de mudanças climáticas (C1 a C21), para o município de Piracicaba, SP	61
Figura 10 - Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) anuais para a condição atual (C0) e para os diferentes cenários de mudanças climáticas (C1 a C21), para o município de Piracicaba, SP	61
Figura 11 - Extrato do balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, dos cenários C0, C1, C2, C3, C4 e C5	64

Figura 12 - Extrato do balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, dos cenários C6, C7, C8, C9, C10 e C11	65
Figura 13 - Extrato do balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, dos cenários C12, C13, C14, C15, C16 e C17	66
Figura 14 - Extrato do balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, dos cenários C18, C19, C20 e C21	67
Figura 15 - Produtividade potencial para a cana planta e para as canas socas (precoce, média e tardia) nas condições atuais e nos diferentes cenários de mudanças climáticas, em Piracicaba, SP. A barra vermelha representa o desvio padrão.....	69
Figura 16 - Produtividade real para a cana planta e para as canas socas (precoce, média e tardia) nas condições atuais e nos diferentes cenários de mudanças climáticas, em Piracicaba, SP. A barra vermelha representa o desvio padrão.....	71
Figura 17 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C0 e C1. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total	73
Figura 18 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C2 e C3. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total	74
Figura 19 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C4 e C5. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total	75
Figura 20 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C6 e C7. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total	76

- Figura 21 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C8 e C9. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total 77
- Figura 22 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C10 e C11. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total..... 78
- Figura 23 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C12 e C13. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total..... 79
- Figura 24 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C14 e C15. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total..... 80
- Figura 25 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C16 e C17. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total..... 81
- Figura 26 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C18 e C19. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total..... 82
- Figura 27 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C20 e C21. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total..... 83

RESUMO

Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP

Estudos recentes mostram que as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera vêm aumentando desde a Revolução Industrial. A esse acréscimo de gases, originado principalmente por atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento, atribui-se a responsabilidade principal pelo aquecimento global. Além da temperatura, a precipitação também tem sofrido variações decorrentes dessas práticas e as projeções climáticas para este século indicam a possibilidade de graves conseqüências para a humanidade. Dentre as atividades econômicas, a agricultura é a mais dependente dos fatores climáticos e as alterações desses fatores afetarão a produtividade das culturas, com efeito sobre o agronegócio como um todo. No presente trabalho, foi utilizado um modelo agrometeorológico para estimar a produtividade da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP, e, com base nos cenários futuros apresentados no quarto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), foram avaliados os possíveis impactos que alterações de temperatura, precipitação, insolação e concentração de CO₂ na atmosfera poderão causar na produtividade dessa cultura, levando em conta também os avanços tecnológicos. Utilizando-se os cenários de mudanças climáticas adotados para a execução deste estudo, observa-se aumento na evapotranspiração potencial (ETP). A evapotranspiração real também tende a aumentar, porém o aumento não é tão acentuado quanto o da ETP, pois a influência do aumento da temperatura é minimizada pela variação no regime hídrico. Os resultados evidenciam uma redução na disponibilidade dos recursos hídricos, com aumento das deficiências e redução dos excedentes. O aumento da temperatura acarretará aumento da produtividade potencial (PP), já que essa variável afeta positivamente a eficiência do processo fotossintético das plantas C4. Com relação às produtividades reais (PR), nas quais o efeito do déficit hídrico sobre a PP é considerado, observa-se padrão semelhante de variação dos valores obtidos em relação à PP. Ao analisar os cenários de mudanças climáticas, nota-se que a PR tende a aumentar, basicamente, devido ao acréscimo de temperatura, de CO₂ e ao avanço tecnológico. A variação da resposta entre os diferentes cortes de cana deve-se ao fato de que os mesmos permanecem no campo em diferentes períodos do ano. Observa-se que a variação das PRs nos diferentes cenários obedece ao mesmo padrão das PPs de cada tipo de cana e que a PR acompanha a tendência da PP, desde que o déficit hídrico seja o mesmo. Se houver aumento ou diminuição no déficit hídrico, a PR integrará os efeitos das variáveis que condicionam a PP, bem como o déficit hídrico. O aumento da produtividade da cana-de-açúcar observado na ocorrência de mudanças climáticas globais poderá ter impactos importantes no setor canavieiro, como a possibilidade de a cultura ser expandida para regiões que estão inviabilizadas de produzir. No entanto, com o aumento da temperatura e a conseqüente elevação das taxas de evapotranspiração, haverá maiores deficiências hídricas, o que exigirá o uso da irrigação, especialmente para as canas socas precoces e médias, que enfrentaram períodos mais longos com baixa disponibilidade de água no solo.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Balanço hídrico; Modelos agrometeorológicos;
Cana-de-açúcar

ABSTRACT

Climate changes and their expected impacts on the sugarcane crop in the Piracicaba region, state of São Paulo, Brazil

Recent studies show increasingly higher concentrations of greenhouse effect gases in the atmosphere since the Industrial Revolution. The major responsibility for the global warming is attributed to such increase, caused by gases resulting mainly from anthropic activities like burning fossil combustibles and deforestation. Other than temperature, precipitation has also suffered variations due to these practices; furthermore, the climatic projections for this century indicate the possibility of severe consequences for human beings. Agricultural activity depends largely on climatic factors, hence changes in these factors will affect the yield rate of crops, thus adversely affecting the agribusiness as a whole. In this work, an agricultural meteorological model was used to estimate the yield rate of sugarcane activity in the Piracicaba region, SP. Based on future scenarios presented in the fourth report by the Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC) and taking into consideration technological advances, it was proceeded an evaluation on the yielding rate of that crop, of the possible impacts caused by changes in temperature, precipitation, insolation and CO₂ concentration in the atmosphere. Through the climate change scenarios adopted in this study, it can be observed an increase of the potential evapotranspiration (ETP). Actual evapotranspiration itself also tends to increase, although in a lesser degree than the ETP, since the influence of an increase in temperature is minimized by the variation of the hydrological regimen. The results show a reduction in the availability of water resources, with an increase in deficiencies and a reduction in excesses. Increasingly higher temperatures will cause an increase of the potential productivity (PP), since that variable affects positively the efficiency of the photosynthetic processes of C4 plants. Regarding the actual productivities (PR), in which the effect of the water deficit on PP is considered, it can be observed that the variation is similar to the one obtained for PP. This increase is due to an increase in temperature, in CO₂ and to technological advance. The variation of response among different cuts of sugarcane arises from their staying in the field in different periods of the year. The variation of the PRs in different scenarios follows the same pattern as the PPs of each kind of sugarcane, provided that the water deficit is the same. If an increase or decrease of the water deficit occurs, the PR will integrate the effects of the variables that condition PP, as well as the water deficit. The observed increase in sugarcane productivity resulting from global climate changes may have important impacts on the sugarcane sector, such as the possibility that the crop will expand to regions now unfeasible for production. However, with the increase in temperature and the consequent increase in the evapotranspiration rates there will be higher hydric deficiencies, which will require the use of irrigation, especially for early and medium sugarcane ratoon crops hit by longer periods of low availability of water in the soil.

Keywords: Climate changes; Water balance; Agrometeorological models; Sugarcane

1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera e que possibilita a ocorrência de vida no planeta. Esse fenômeno é decorrente da presença de gases como o dióxido de carbono (CO_2), o ozônio (O_3) e o metano (CH_4) que, juntamente com o vapor d'água, possuem a propriedade de absorver e refletir parte dos raios infravermelhos, contribuindo para aquecer a superfície terrestre. Por possuírem essa característica, esses gases são conhecidos como gases de efeito estufa (GEE). O aumento expressivo da concentração desses gases na atmosfera, decorrentes do processo de industrialização, notadamente a partir de meados do século XIX, vem contribuindo significativamente para a intensificação do efeito estufa e do aquecimento global.

A utilização de recursos naturais como carvão e petróleo, bem como a derrubada e queima de florestas, vêm fazendo com que a quantidade de gases de efeito estufa, principalmente o CO_2 , aumentasse exponencialmente até os dias de hoje. Esse aumento contínuo de gases na atmosfera acarretou uma maior retenção da radiação infravermelha emitida pela Terra e, conseqüentemente, aumento da temperatura do ar atmosférico. O aquecimento global, além do efeito na elevação da temperatura, poderá causar aumento na freqüência de eventos extremos, como secas, chuvas, ondas de calor e de frio, derretimento das geleiras e das calotas polares, entre outras conseqüências.

A agricultura é um sistema tecnológico artificial, desenvolvido pelo homem com o objetivo de produzir alimentos, fibras e energia. Essa atividade econômica depende das condições do tempo e do clima, sendo esses os principais fatores responsáveis pelas variações das safras agrícolas. A agrometeorologia é a ciência que estuda as condições atmosféricas e suas influências sobre as atividades agrícolas. As relações entre o clima e a agricultura são bastante complexas, pois os fatores ambientais afetam tanto o crescimento e o desenvolvimento das plantas, como também todas as etapas das atividades agrícolas, como o preparo do solo para semeadura, data de semeadura, colheita, transporte e armazenamento dos produtos. O clima também tem efeito sobre a inter-relação das plantas com doenças e pragas que podem danificar as plantações, causando prejuízos sociais e econômicos difíceis de serem quantificados ou revertidos.

Fenômenos meteorológicos adversos de difícil previsibilidade em médio prazo, como geadas, secas, chuva excessiva ou granizo, tornam a agricultura uma atividade de alto risco.

A modelagem pode ser definida como uma representação simplificada da realidade. Os modelos surgiram a partir da necessidade do homem de compreender como a natureza e seus componentes se inter-relacionam.

Na agricultura, a aplicação desses modelos constitui uma ferramenta que nos permite conhecer quantitativamente a influência das condições climáticas sobre o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas agrícolas. Com a modelagem, torna-se possível avaliar os principais fatores de restrição ao desenvolvimento agrícola e as melhores estratégias para o incremento da produção, como planejamento do uso do solo, adaptação de culturas e variedades, monitoramento e previsão de safras, controle de doenças e pragas, estratégias de pesquisas e planejamento. Além disso, sua utilização permite minimizar riscos ambientais e custos de produção, o que pode ser um importante subsídio para a definição de políticas públicas e de tomadas de decisão.

Segundo Goldemberg (2007), os padrões atuais de produção e consumo de energia são baseados nas fontes fósseis, o que gera emissões de poluentes locais e gases de efeito estufa, pondo em risco o suprimento de longo prazo do planeta. O autor diz que é preciso mudar esses padrões estimulando o uso de energias renováveis e, nesse sentido, o Brasil apresenta uma condição bastante favorável em relação ao resto do mundo. A utilização de biomassa, além de ser comercialmente competitiva com o petróleo, é mais limpa, renovável e permite gerar empregos.

Atualmente, a preocupação com o ambiente, a redução dos estoques e a alta do preço dos combustíveis fósseis vêm acarretando diversas mudanças no setor energético brasileiro. A procura por fontes de energia renováveis e menos poluentes beneficia a produção da cana-de-açúcar, já que o álcool é uma importante fonte de energia alternativa que contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre e a emissão de gases gerados por sua combustão é compensada pela fixação de CO₂ para o crescimento da planta. Assim, a utilização de um modelo de estimativa de produtividade para a região de Piracicaba, SP, local onde a cana-de-

açúcar exerce importante papel econômico, pode ser uma ferramenta eficaz para a análise do comportamento da cultura em diferentes condições climáticas.

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo determinar a produtividade potencial e os riscos climáticos associados à produção da cana-de-açúcar, por meio de um modelo de simulação. Foram considerados os dados climatológicos de um período de 80 anos (de 1927 a 2006) para a região de Piracicaba, SP, e tal risco foi avaliado sob o enfoque das mudanças climáticas, com a finalidade de quantificar os possíveis impactos do aquecimento global sobre a cultura da cana-de-açúcar nessa região, a partir de cenários criados com combinações que levam em consideração as variações de temperatura, precipitação, insolação e concentração de CO₂, de acordo com os prognósticos do quarto relatório do IPCC, bem como os avanços tecnológicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A produção da cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), gramínea de porte alto originária do sudeste asiático e da Índia Ocidental (Aranha e Yahn, 1987), tem como produto o açúcar e o álcool (Szmrecsányi e Moreira, 1991). Constitui um dos principais produtos agrícolas do Brasil, com grande importância econômica e social (Alfonsi et al., 1987).

A agroindústria canavieira é a mais antiga atividade econômica do Brasil. No período colonial, foi a principal atividade da região nordeste, ocupando desde a Bahia até Pernambuco, passando por Alagoas, Rio Grande do Norte e Sergipe. No centro-sul brasileiro, a cana-de-açúcar também se difundiu, iniciando o processo de ocupação pelo Rio de Janeiro, seguido por São Paulo e Minas Gerais. Mais recentemente, assumiram importância as produções dos Estados do Paraná, do Mato Grosso do Sul e de Goiás. A construção dos primeiros engenhos em solo brasileiro, ocorreu em São Paulo, no atual município de São Vicente. Entretanto, durante muito tempo, tal produção não assumiu maior importância econômica, tendo ficado restrita à área litorânea. Somente na segunda metade do século XVIII, as atividades de produção de açúcar em São Paulo voltaram a ter destaque, principalmente na área que corresponde ao atual município de Piracicaba, região tradicionalmente produtora de cana-de-açúcar (Ramos, 1999).

O Proálcool – Programa Nacional do Álcool – foi criado pelo governo brasileiro em 1975, como uma tentativa de solucionar o problema energético causado pela crise do petróleo. A justificativa oficial para o aumento da produção de álcool era a necessidade de encontrar um combustível viável para substituir a gasolina automotiva, com o objetivo de aliviar as pressões sobre a balança comercial ocasionadas pela elevação dos preços internacionais do petróleo, então ainda preponderantemente importado (Szmrecsányi e Moreira, 1991). Embora o objetivo principal do programa fosse substituir as importações de gasolina, este foi muito além e, até o final dos anos 80, tornou-se o maior programa comercial de uso de biomassa para fins energéticos. Atualmente, com a preocupação ambiental do planeta, com o petróleo em alta e com sua boa aceitação no mercado, o álcool é o combustível do momento, ao lado do biodiesel, e o Brasil, o país com maior potencial para produzir e exportar etanol (Bragion, 2007).

2.2 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical do tipo C4 que se caracteriza por elevada taxa fotossintética e alta produtividade biológica, sendo uma das culturas mais eficientes e produtivas (Irvine, 1980).

O Brasil, por sua grande extensão territorial, apresenta condições climáticas variadas, sendo possivelmente o único país do mundo com dois períodos de safra distintos. A região norte-nordeste colhe sua safra no período de novembro a abril, enquanto a região centro-sul realiza essa atividade de abril a novembro. Assim, o país desfruta não apenas de interessante diversificação geográfica, mas também de maior equilíbrio na safra (Alfonsi et al., 1987).

Segundo Barbieri e Villa Nova (1977), as culturas destinadas à produção do açúcar são mais exigentes quanto às condições climáticas. Como há necessidade de alta produção de sacarose, a planta precisa encontrar condições de temperatura e umidade adequadas para seu pleno desenvolvimento na fase vegetativa, seguidas de certa restrição hídrica e/ou térmica para forçar o repouso e o enriquecimento em sacarose na época do corte. O ambiente ideal é aquele onde a precipitação é bem distribuída durante o período de crescimento da planta, seguido por um período relativamente seco antes da colheita, com bastante luminosidade durante toda a estação, pois, segundo os autores, há correlação entre a incidência luminosa e a produção de açúcar.

2.2.1 Fatores condicionantes da produção de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta que se adapta bem a uma ampla variação de condições climáticas. Seu potencial produtivo, porém, também é afetado por outros fatores além dos climáticos, como os fatores da planta, especialmente suas variedades, e os fatores do solo. A seguir, são listados os principais fatores condicionantes da produção da cultura.

2.2.1.1 Fatores climáticos

Segundo Doorenbos e Kassam (1994), a cana-de-açúcar é cultivada em várias regiões localizadas principalmente entre os paralelos de 35°N e 35°S, em altitudes que

variam do nível do mar a 1000 metros (Magalhães, 1987), o que engloba vários tipos de clima.

A radiação solar, a temperatura, a disponibilidade hídrica, o fotoperíodo e a concentração de CO₂ na atmosfera são fatores climáticos determinantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. O rendimento máximo de uma cultura depende da energia disponível no ambiente, associada a outras variáveis climáticas. A produção de biomassa começa com o processo fotossintético, no qual o CO₂ atmosférico é assimilado e reduzido a carboidrato, com a participação da água e da radiação solar (Pereira et al., 2002).

2.2.1.1.1 Radiação solar

A radiação solar intervém no crescimento e desenvolvimento da planta e no regime térmico, sendo fundamental à produção de biomassa. Tem grande importância no condicionamento da evaporação e da evapotranspiração e, em regiões úmidas, a radiação solar pode apresentar estreita relação com a evapotranspiração. Assim, a radiação líquida disponível ao meio, resultante do balanço energético, é a variável mais utilizada para a estimativa da demanda hídrica (Ortolani e Camargo, 1987; Marchiori, 2004).

Como a cana-de-açúcar é uma planta do tipo C₄, altas eficiências fotossintéticas devem-se a altas intensidades luminosas. Com elevadas taxas de radiação, os colmos são mais grossos e curtos, as folhas são mais longas e verdes e o perfilhamento é mais intenso. Em condições de baixa irradiância, os colmos são mais finos e longos e as folhas são mais estreitas e amarelas (Rodrigues, 1995). Quanto maior a quantidade luminosa, mais fotossíntese será realizada pela cultura e, logicamente, maior o seu desenvolvimento e acúmulo de açúcares (Barbieri, 1981).

2.2.1.1.2 Temperatura

A temperatura é, provavelmente, o fator ambiental que mais influencia o desempenho da cana-de-açúcar. De acordo com Fauconier e Bassereau (1975), temperaturas abaixo de 25°C ocasionam um crescimento lento da planta; entre 30 e 34°C, a planta alcança o crescimento máximo e, acima de 35°C, volta a ser lento, tornando-se praticamente nulo sob temperaturas superiores a 38°C. Segundo Barbieri et

al. (1979), a temperatura ideal para germinação das gemas da cana-de-açúcar situa-se entre 32 e 38°C. O crescimento ótimo é obtido com temperaturas médias diárias entre 22 a 30°C e, acima de 38°C, o crescimento é muito lento. A taxa de crescimento se reduz com temperaturas abaixo de 20°C, sendo essa a temperatura basal para a cultura. Para a maturação e colheita, são desejáveis temperaturas relativamente baixas, entre 10 e 20°C, pois o tempo frio retarda a taxa de crescimento vegetativo e o enriquecimento da sacarose na cana. A temperatura noturna influencia mais o crescimento do que a diurna, pois, quando as noites são frias, o desenvolvimento da cana-de-açúcar é lento e há maior concentração de sacarose (Humbert, 1968; Barbieri e Vila Nova, 1977; Magalhães, 1987; Doorenbos e Kassam, 1994).

2.2.1.1.3 Disponibilidade hídrica

A disponibilidade de água para a cana-de-açúcar é o principal fator climático causador de variabilidade da produtividade. Entretanto, devido às variações locais de clima e de variedades, é difícil estabelecer uma relação entre produção e consumo de água pela cana-de-açúcar. Segundo Scardua e Rosenfeld (1987), esse consumo também varia em função do estágio fenológico, do ciclo da cultura (cana planta ou cana soca), das variações climáticas e da água disponível no solo, entre outros fatores. Esses autores apresentam na Tabela 1 um resumo das determinações de consumo de água pela cana-de-açúcar, obtidas em condições de campo.

Tabela 1 - Consumo de água pela cana de açúcar, obtido em condições de campo

Autor	Ano	Local	Ciclo	Consumo de água (mm dia ⁻¹)		
				Máximo	Mínimo	Médio
Cox	1960	Havaí	-	8	3,8	-
Thompson	1963	África do Sul	-	6	2,2	-
Tosello	1966	Brasil	-	3,4	1,3	-
Cruciani	1972	Brasil	-	2,8	1,2	-
Souza	1974	Brasil	Planta	4,5	2,3	3,6
Souza	1975	Brasil	Soca	5	2,2	3,6
Leme	1978	Brasil	Planta	5,6	1,9	3,8
Leme	1978	Brasil	Planta	4,8	1,3	3,2
Scardua	1979	Brasil	Planta	4,5	2,3	3,3
Scardua	1979	Brasil	Soca	4,4	2,2	3,2
Média	-	-	-	4,9	2,1	3,6

Fonte: Scardua e Rosenfeld (1987).

Alfonsi et al. (1987) afirmam que o consumo de água pela cana-de-açúcar varia com o estágio de crescimento e depende da variedade da cultura. A perda de água pela cultura durante seu ciclo vegetativo é função da área foliar, estágio fenológico e densidade do sistema radicular.

2.2.1.1.4 Fotoperíodo

A cana-de-açúcar, por ser uma espécie de grande eficiência fotossintética, tem seu ponto de saturação luminosa elevado. Assim, quanto maior for a intensidade luminosa, mais fotossíntese será realizada pela cultura, o crescimento e o desenvolvimento da cultura serão mais eficientes e haverá mais acúmulo de açúcares. Segundo Barbieri (1981), o fotoperíodo é um importante fator para o desenvolvimento das culturas e afeta o comprimento dos colmos. Em fotoperíodos que variam entre 10 e 14 horas há um aumento no tamanho dos colmos. No entanto, em fotoperíodos longos, entre 16 a 18 horas, o colmo sofre redução em seu tamanho.

O fotoperíodo atua também como fator condicionador do florescimento da cana, juntamente com a temperatura. Para que haja florescimento, o fotoperíodo deve estar entre 12 e 12,5 horas (Pereira et al., 1983). No Estado de São Paulo, isso ocorre entre 25 de fevereiro e 20 de março. No entanto, a indução do florescimento só ocorre, nesse período, se a temperatura máxima estiver abaixo de 31°C e a mínima acima de 18°C durante um número mínimo de dias. Segundo Pereira et al. (2002), isso explica por que a cana floresce em alguns anos e não em outros.

2.2.1.1.5 Concentração de CO₂ na atmosfera

O aumento da concentração de CO₂ pode afetar os processos biológicos em diferentes níveis de organização (Mooney et al., 1999). Segundo Warrick (1988), os efeitos de maiores concentrações de CO₂ sobre o crescimento e produtividade das plantas são benéficos e se originam dos efeitos do CO₂ em processos que ocorrem no nível da folha. O acréscimo de CO₂, também chamado de efeito de fertilização por CO₂, aumenta a resposta fotossintética. Além disso, a elevação do CO₂ reduz a transpiração. Os estômatos das folhas se abrem para permitir a entrada do CO₂ para a fotossíntese, mas, ao fazê-lo, a planta inevitavelmente perde umidade por meio da transpiração. Concentrações maiores de CO₂ no ambiente fazem com que os estômatos se fechem

parcialmente, o que reduz a condutância estomatal e, portanto, a perda de água. Essa resposta ocorre tanto nas plantas C3 como C4 (Kimball e Idso, 1983; Cure, 1985; Morison, 1987). O aumento nas taxas fotossintéticas e a melhoria nas relações hídricas observados nas plantas cultivadas em elevadas concentrações de CO₂, normalmente geram incrementos de biomassa e altura nessas plantas (Poorter e Pérez-Soba, 2002; Souza, 2007).

Por ser uma planta C4, assim chamada porque os primeiros produtos da fotossíntese têm quatro átomos de carbono por molécula, a cana-de-açúcar experimenta um aumento na eficiência fotossintética em resposta a maiores níveis de dióxido de carbono.

Ainsworth e Long (2005) fizeram uma revisão compilando 124 trabalhos realizados em FACE (*Free Air Carbon Enrichment*) e verificaram que as taxas fotossintéticas de plantas cultivadas em condições elevadas de CO₂ aumentaram 28% e que há uma redução na taxa de condutância estomática de aproximadamente 20%, bem como um aumento de até 50% na eficiência do uso da água.

Já foram realizados diversos estudos sobre o efeito da alta concentração de CO₂ atmosférico no crescimento, desenvolvimento e rendimento de diversas espécies vegetais, mas poucos deles foram conduzidos com plantas do tipo C4 (Souza, 2007; Ghannoum et al., 2000).

Apesar de o ganho de biomassa e a assimilação fotossintética serem menores para plantas C4, eles não podem ser considerados insignificantes. Durante muito tempo, acreditou-se que as plantas C4 não responderiam ao aumento de CO₂, em razão do mecanismo de concentração de CO₂ presente nas células da bainha vascular dessas espécies que lhes confere alta eficiência fotossintética. Alguns experimentos, como o realizado por Bowes (1993), mostraram que não houve diferenças significativas quando plantas C4 foram submetidas ao tratamento com elevada concentração de CO₂. Por outro lado, outros estudos demonstraram que plantas C4 podem responder significativamente ao aumento de CO₂ e algumas delas podem até responder de uma forma semelhante à das espécies C3 (Ghannoum et al., 1997; Read et al. 1997; Ziska e Bunce, 1997; Morgan et al., 2001; Pooley et al., 2003; Sage e Kubien, 2003).

Estudos recentes mostram que o crescimento de diversas plantas do tipo C4 responde positivamente a elevadas concentrações de CO₂ (Ghannoum et al., 2000). O

efeito direto do aumento da concentração de CO_2 no crescimento da planta é particularmente interessante por causa da possibilidade de aumento da produtividade de culturas no futuro, já que o substrato para a fotossíntese e o gradiente de concentração de CO_2 entre a atmosfera e a folha aumentarão. Segundo o autor, as respostas das plantas C4 à elevação da concentração de CO_2 podem ser atribuídas a três fatores: (1) algumas espécies C4 podem estar saturadas às concentrações atuais de gás carbônico enquanto outras não; (2) o efeito pode ser devido à diminuição da condutância estomática decorrente do cultivo em alto CO_2 , o que pode reduzir a transpiração e melhorar o status da água; e (3) a diminuição da transpiração pode aumentar a temperatura foliar, proporcionando a temperatura ótima para o processo fotossintético.

Souza (2007), estudando o efeito do aumento do CO_2 atmosférico sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos da cana-de-açúcar, visando a avaliar o potencial do seqüestro de carbono e o impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade, obteve resultados que indicam incremento em altura, na taxa fotossintética, na biomassa de colmo e folha, no teor de sacarose, de fibras e no conteúdo de celulose das plantas cultivadas sob elevado CO_2 .

2.2.1.2 Fatores edáficos

O solo é um dos componentes do conjunto de fatores que influenciam na produção da cana-de-açúcar, destacando-se pelo seu importante papel para o suporte físico e o suprimento de água e nutrientes às plantas. Portanto, o conhecimento das características edáficas é importante para julgar o potencial dos ambientes de produção (Lepsch, 1987).

De um modo geral, a cana-de-açúcar é produzida sob diversas condições edáficas. Segundo Yates (1977), apud Koffler e Donzeli (1987), o ambiente edáfico para a cana-de-açúcar apresenta as seguintes características: em termos de relevo, os terrenos devem ser constituídos por interflúvios largos e regulares, com declividade suave (entre 2 a 5%, sendo o maior valor aplicável a solos argilosos); terrenos completamente planos podem apresentar dificuldade de drenagem; terrenos com declividade maior do que 18% podem ser aproveitados através do cultivo em contorno e instalação de sistemas de distribuição de água da chuva, mas poderão ocorrer dificuldades quanto a locação das glebas no campo e mecanização da lavoura; também

podem ser utilizados terrenos com declive mais acentuado e irregulares, mas podem ocorrer gastos maiores em decorrência da necessidade de preparo do solo e uso de máquinas agrícolas, além de sofrerem mais erosões.

A disponibilidade de água no solo é regida pela distribuição da chuva e pelo potencial de armazenamento de água no solo, o qual é condicionado por sua capacidade de retenção e drenagem, e governa a produção vegetal. Sua falta ou excesso afetam de maneira decisiva o desenvolvimento das plantas, pois alteram a absorção dos nutrientes e da própria água (Humbert, 1968; Reichardt, 1996).

O nível de compactação do solo cultivado também tem grande importância no desenvolvimento da cana-de-açúcar. No solo compactado, há uma redução significativa no volume dos poros, o que influencia a quantidade de ar e de água que permeia o solo, reduzindo a disponibilidade dos mesmos às plantas, além de dificultar ou até mesmo impedir a penetração e o crescimento radicular (Trowse, 1967). Isso também está relacionado com a menor difusão de oxigênio no solo, uma vez que o oxigênio é necessário para uma rápida divisão celular e conseqüente crescimento das raízes. Além disso, em solos compactados, a difusão de gás carbônico é mais lenta, o que faz com que o mesmo se concentre e atinja níveis tóxicos para a cana-de-açúcar (Humbert, 1968).

A fertilidade dos solos também é importante para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. A ausência de nutrientes tais como nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio, enxofre, entre outros, pode ocasionar a má formação dos perfilhos, diminuição da atividade fotossintética e diminuição da sacarose (Ortolani Filho, 1983).

A cana-de-açúcar não necessita de um tipo especial de solo para se desenvolver e é bastante adaptável, podendo ser cultivada em solos de textura muito variável, desde arenosos até muito argilosos, bem como em solos com altos teores de matéria orgânica. Os melhores solos são aqueles com mais de um metro de profundidade, para que haja um bom crescimento das raízes, e devem estar preferencialmente bem arejados (Alfonsi et al., 1987; Doorenbos e Kassam, 1994). Barbieri e Villa Nova (1977) citam que a cana requer uma maior quantidade de umidade no solo no período de rápido crescimento vegetativo, uma vez que a água tem papel fundamental na turgescência, translocação e na pressão de crescimento e turgor. Durante o período de maturação, porém, o ideal é que haja redução na quantidade de água disponível no solo, não drasticamente, mas o

suficiente para reduzir o crescimento e induzir uma maior concentração de açúcar nos colmos, favorecendo a maturação.

Assim, a cana-de-açúcar tem se mostrado uma cultura bastante adaptável, sendo cultivada em solos de textura muito variável, desde arenosos até muito argilosos e, também, em solos com elevados teores de matéria orgânica (Koffler e Donzeli, 1987).

2.2.1.3 Fatores da cultura

A cana-de-açúcar pertence à família *Graminae*, uma das maiores famílias vegetais entre as Angiospermas (plantas que apresentam sementes protegidas pelos frutos). Em sua maioria, as gramíneas são plantas herbáceas, anuais ou perenes, com exceção do bambu. O caule é do tipo colmo com nós e entrenós, e as folhas apresentam bainhas largas e abertas e nervuras paralelas (Aranha e Yahn, 1987).

Como sistema produtivo, a cana-de-açúcar é constituída basicamente por um sítio de produção, representado pelas folhas fotossinteticamente ativas, um sistema de escoamento e distribuição do produto fotossintetizado, vários sítios de consumo (raízes, colmos, folhas jovens, tecidos e órgãos reprodutores) e um sítio de acúmulo e armazenamento de sacarose. A eficiência da integração destes sistemas determina a produtividade da cultura. Entretanto, como sistema biológico, sua dinâmica é influenciada tanto por fatores da planta (genéticos e fisiológicos) quanto do ambiente (Machado, 1987).

Uma temporada longa de crescimento é fundamental para se obter rendimentos elevados. A duração do período de crescimento vegetativo é bastante variável, sendo de 9 a 10 meses em alguns locais nos Estados Unidos e de até 24 meses no Havaí, Peru e África do Sul. Nos demais países produtores, o ciclo de desenvolvimento dura de 14 a 18 meses para cana planta e 12 meses para cana soca (Humbert, 1968).

A área foliar está diretamente relacionada com a produtividade, pois as folhas interceptam a luz fotossinteticamente ativa para fazer fotossíntese, produzindo carboidratos que serão utilizados nos processos vitais da planta (Suguitani, 2006). Quanto mais rápido o crescimento das folhas e maior o período em que elas permanecerem ativas, maior deverá ser o desenvolvimento da cultura (Machado et al., 1985). No início do ciclo da cultura, o índice de área foliar é pequeno e apresenta um crescimento lento. Depois, esse índice aumenta rapidamente até um máximo,

permanecendo constante ou diminuindo em condições climáticas desfavoráveis (Irvine, 1983; Machado, et al.; 1983). O índice de área foliar máximo varia entre 2 e 8 dependendo da variedade, local de plantio, ambiente e, principalmente, da densidade do plantio (Irvine e Benda, 1980; Teruel, 1995).

A velocidade de crescimento e a forma de distribuição das raízes no perfil do solo são características importantes para um bom suprimento de água e nutrientes às plantas. O sistema radicular da cana-de-açúcar pode atingir grandes profundidades (Thompson, 1967), aumentando as possibilidades de sobrevivência mesmo em condições de estresse hídrico. O crescimento e distribuição das raízes da cana-de-açúcar variam com a idade da planta. De modo geral, até o sexto mês o crescimento das raízes é lento, aumentando rapidamente até o desenvolvimento máximo, por volta do décimo segundo mês, podendo então diminuir com a idade (Rostron, 1974 apud Machado, 1987).

As características varietais definem o número de colmos por planta, a altura e o diâmetro do colmo, o comprimento e a largura das folhas e a arquitetura da parte aérea, e essas características influenciam na eficiência fotossintética. Diferentes variedades de cana-de-açúcar possuem diferentes sistemas radiculares, o que também influencia na produtividade da cultura. Segundo Malgelsdorf (1966), apud Machado (1987), as variedades comerciais têm longevidade bem definida e, após esse período, as plantas começam a demonstrar sinais de degenerescência, a qual pode ser agravada pela baixa fertilidade do solo ou ocorrência de doenças e pragas. Esses sinais podem ser acompanhados de significativas perdas em produtividade agrícola e, por esse motivo, as plantas precisam ser gradativamente substituídas (renovação do canavial) por outras mais estáveis e geneticamente superiores.

2.3 Necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar

Podem ser identificadas quatro fases de crescimento da cana-de-açúcar em relação à necessidade de água para o seu crescimento e desenvolvimento (Doorenbos e Kassam, 1994), as quais são apresentadas na Figura 1.

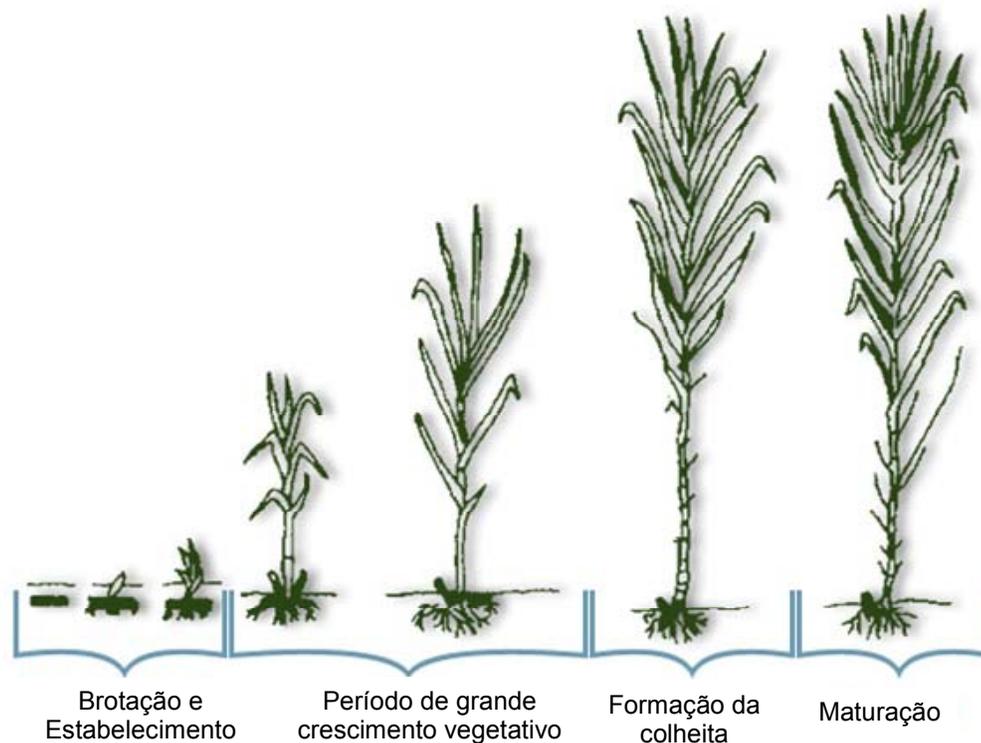


Figura 1 - Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

A água é fator fundamental na produção vegetal, pois sua falta ou excesso afeta de maneira decisiva o crescimento e desenvolvimento das plantas. Conseqüentemente, seu manejo racional é imperativo para a maximização da produção agrícola. Durante seu desenvolvimento, qualquer cultura consome um grande volume de água, sendo que cerca de 98% desse volume passa pela planta e se perde para a atmosfera pelo processo de transpiração (Reichardt, 1978).

As necessidades hídricas da cana-de-açúcar variam conforme os diferentes períodos de crescimento. Segundo Doorenbos e Kassam (1994) e Ometto (1980), dependendo do clima, a cana-de-açúcar necessita, em média, de 1500 a 2500 mm de chuva, uniformemente distribuídos, sendo ideal que durante a época de maturação a precipitação seja menor que no período de crescimento. Thompson (1967) verificou uma variação no consumo de água de 5,5 a 6,0 mm dia⁻¹ nos meses de janeiro e fevereiro e de 1,8 a 2,3 mm dia⁻¹ nos meses de junho e julho, na África do Sul. Para as condições climáticas de Tucumán na Argentina, Foligata (1974) verificou que a cultura necessita de

12,5 a 14,9 mm de água para produzir uma tonelada de cana e de 104,9 a 144,2 mm de água para produzir uma tonelada de açúcar.

O desenvolvimento da cana-de-açúcar inicia-se na fase de brotação e estabelecimento, quando ocorre o enraizamento e o crescimento inicial da planta. Nessa fase é importante que não haja déficit hídrico para que não ocorra falha na brotação ou até mesmo morte das soqueiras. Após isso, inicia-se o período de crescimento vegetativo, fase em que ocorre o desenvolvimento das folhas, surgimento de brotos e alongamento do colmo. Nessa fase, também é importante que a planta não sofra estresse por falta d'água para que haja um perfilhamento rigoroso.

Durante a formação da colheita, há a troca de folhas antigas pelas mais novas e ocorre a definição da arquitetura do dossel. Nessa fase, a área foliar começa a diminuir, a planta apresenta menor capacidade de resposta à radiação solar, já não é tão sensível ao déficit hídrico e, sob período de chuva ou irrigação freqüente, pode ocorrer a aceleração da floração, ocasionando redução na produção de açúcar.

Quando as plantas atingem a maturação, é interessante que elas sofram estresse hídrico, o que reduz a taxa de crescimento vegetativo, desidratando a cana e forçando a transformação de todos os açúcares em sacarose recuperável. Com a paralisação do crescimento vegetativo, aumenta também a relação entre a matéria seca armazenada como sacarose e a utilizada para novo crescimento.

2.4 Modelos agrometeorológicos de estimativa da produtividade de culturas

Segundo Pereira et al. (2002), a produtividade potencial (PP) ou rendimento máximo de uma cultura é determinado principalmente por suas características genéticas e seu grau de adaptação ao ambiente. As exigências ambientais quanto a temperatura, radiação solar, solo e água para crescimento e rendimento ótimos diferem de cultura para cultura, bem como entre as variedades.

A produtividade potencial de uma cultura é determinada por elementos climáticos, como temperatura do ar, fotoperíodo, radiação solar, e pela duração do ciclo de crescimento do vegetal. O rendimento máximo pode ser calculado com alta confiabilidade para diferentes condições climáticas, por meio de relações que expressem a habilidade da cultura de converter energia solar e CO₂ em produção de matéria seca e, finalmente, em produção comercializável (Pereira et al., 2002). Isso permite a

quantificação do potencial produtivo de diferentes áreas (Campelo Jr. et al., 1990), indicando aquelas mais apropriadas para a produção de determinada cultura, além de servir também para estimativa da produtividade real e da quebra de rendimento (Pedro Jr. et al., 1983; Marin et al., 2000).

Têm sido feitas várias tentativas de modelar o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar. Ometto (1974) aplicou o método de análise de regressão múltipla e encontrou uma equação para a previsão de rendimento agrícola e outra de rendimento industrial para a cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP, utilizando como variáveis a evapotranspiração, temperatura, insolação e umidade do ar.

Pereira e Machado (1986) desenvolveram um modelo matemático-fisiológico para simulação da dinâmica diária do crescimento da cana-de-açúcar que estima as taxas de fotossíntese, de respiração, de crescimento da cultura, de senescência das folhas e crescimento das raízes, a massa seca das folhas, dos colmos e das raízes, e o índice de área foliar por meio da radiação solar global, da temperatura máxima e mínima, bem como da umidade do ar.

Villa Nova e Barbieri (1991) modificaram o modelo matemático-fisiológico proposto por De Wit (1965) para a cultura da cana-de-açúcar. Por meio de uma equação, esse novo modelo relaciona a produtividade mensal de fitomassa e alguns elementos climáticos (temperaturas extremas do ar, fotoperíodo e insolação), aliados ao déficit hídrico ao longo do ciclo. Os autores aplicaram o modelo para a região de Araras, SP, com dados experimentais de onze anos referentes à produção de cana irrigada, e obtiveram uma produtividade estimada de 138 Mg ha^{-1} , corroborada pelos dados experimentais que mostraram que a produtividade oscilou entre 132 Mg ha^{-1} e 140 Mg ha^{-1} . Araujo (1993) aplicou a metodologia de De Wit (1965), modificada por Villa Nova e Barbieri (1991), para estimar a produtividade potencial da cana-de-açúcar, com a finalidade de elaborar um zoneamento da produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar no Estado do Rio de Janeiro, tendo verificado que os valores estimados pelo modelo foram bem próximos aos valores de produtividade de cana irrigada. Ao simular o aquecimento da região, a autora notou um aumento de produtividade, tanto para a cana planta como para a cana soca. No caso de um resfriamento regional, a autora notou um decréscimo na produtividade potencial, tanto para a cana planta como para a cana soca, concluindo que o fator mais limitante à produtividade de cana-de-açúcar na região do Rio

de Janeiro é a falta d'água, que o uso adequado de irrigação pode aumentar significativamente a produtividade da cultura no Estado e que a produtividade estimada é sensível às mudanças climáticas.

Barbieri (1993) desenvolveu um modelo matemático-fisiológico composto por uma série de equações que descrevem o comportamento fisiológico da planta em resposta às condições ambientais, no qual medidas regulares de elementos de clima podem fornecer informações sobre o desempenho da cultura, especialmente o acúmulo de matéria seca durante o ciclo para estimar o crescimento e o rendimento agrícola potencial da cultura da cana-de-açúcar em diferentes condições climáticas. O autor testou o modelo proposto, confrontando os valores obtidos pelo modelo e as produções obtidas em Araras, SP, em experimentos controlados, para diferentes variedades, encontrando significância aos níveis de 1 e 5% de probabilidade. Assim, o autor considerou que o modelo proposto é adequado para estimar a produtividade potencial, mas destacou que sua extrapolação deve ser feita com cautela.

Rojas (1998) empregou o modelo de Jensen (1968) para estimar os efeitos da deficiência hídrica na produtividade agro-industrial de cana-de-açúcar no município de Araras, SP, e obteve valores de índices estatísticos r^2 e d próximos de 1, o que significa um bom ajuste dos valores de produtividade estimados em relação aos medidos. O erro médio absoluto e os valores de erro máximo com relação às suas correspondentes produtividades observadas revelaram que os modelos tiveram erros relativamente baixos. Com o intuito de melhorar o grau de confiabilidade do modelo, o autor fez um teste considerando que o valor do coeficiente de sensibilidade à deficiência hídrica na última fase de desenvolvimento da cultura tem pouca influência no resultado final. Desse modo, o autor notou que a produtividade real da cana-de-açúcar (colmo e açúcar) pode ser estimada com 4 a 6 meses de antecedência.

Scarpari (2002) desenvolveu modelos capazes de obter previsões de açúcar teórico recuperável e toneladas de cana-de-açúcar por hectare ao longo da safra, utilizando dados de precipitação e temperatura, concluindo que se pode confirmar e quantificar a influência da precipitação, graus-dia e graus-dia negativos na maturação e produtividade da cana-de-açúcar. O modelo de simulação para a cana de ano mostrou-se mais confiável quando comparado com o modelo de maturação de cana de ano e meio após a realização da simulação para a safra 2001/2002. A introdução do fator

graus-dias negativos foi de suma importância, pois teve grande influência nos modelos de maturação. Os modelos de produtividade, entretanto, não se mostraram confiáveis após a realização da simulação para a safra 2001/2002.

Teramoto (2003) avaliou e aplicou modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar baseados em variáveis do solo e do clima. Para avaliar a aplicabilidade do modelo proposto, o autor realizou uma avaliação preliminar com resultados experimentais e uma análise de regressão que mostrou uma relação altamente significativa entre a produtividade estimada pelo modelo e a obtida nos experimentos considerados. Assim, o autor concluiu que o modelo de estimativa de produtividade relativa com base em variáveis do solo estima adequadamente a produtividade relativa da cana-de-açúcar. Esse modelo é mais preciso quando se trabalha com escalas maiores e é uma ferramenta de avaliação de terras que considera, de forma holística e integrada, os diversos fatores envolvidos, sendo mais apropriado que a análise estatística isolada. O modelo mostrou-se uma ferramenta útil para identificação do potencial produtivo de áreas para cultura da cana-de-açúcar.

2.5 Método da Zona Agroecológica

De acordo com o modelo apresentado por Doorenbos e Kassam (1994), é possível estimar a produtividade e o efeito da água no rendimento dos cultivos considerando variáveis direcionadas para as exigências climáticas e edáficas das culturas e dos sistemas de produção em que estão inseridas. Cada zona agroecológica tem uma combinação similar de potenciais e restrições para o uso da terra, servindo como referência para incrementar o seu uso presente, aumentando sua produção ou limitando sua degradação.

O método da Zona Agroecológica (MZA), outra denominação do modelo de Doorenbos e Kassam (1994), pressupõe que a produtividade de uma cultura bem adaptada ao respectivo ambiente de crescimento, sem limitações hídricas e nutricionais e sem a ocorrência de doenças e pragas, seja condicionada apenas pela interação entre as características genéticas da cultura e as variáveis climáticas (radiação solar, temperatura do ar e fotoperíodo).

O método que calcula o rendimento da cultura foi desenvolvido para servir como estimativa em base continental. Entretanto, o método também pode ser aplicado a um

nível de detalhe necessário para que se ajuste em localidades específicas. Para determinado clima, o rendimento potencial possível de uma cultura padrão é calculado aplicando-se o conceito de De Wit (1965), que estima a produtividade bruta de matéria seca por uma cultura padrão que hipoteticamente cobre todo o terreno, utilizando-se a radiação solar, a temperatura e o fotoperíodo do local como únicos fatores de restrição, e a corrige em função da área foliar, da respiração, do índice de colheita e da umidade da parte colhida.

Em condições reais de cultivo, ocorrerão perdas de rendimento devido a condições climáticas adversas durante períodos curtos, suprimento limitado de água e nutrientes, e operações problemáticas de cultivo, incluindo a preparação do solo, eliminação de ervas daninhas e colheita. Essas limitações são muito complexas e seus efeitos sobre o rendimento são difíceis de serem quantificados. Entretanto, quando comparados com os rendimentos reais dos agricultores, o rendimento potencial calculado dará indicação da eficiência na produção agrícola (Doorenbos e Kassam, 1994).

O modelo da Zona Agroecológica foi utilizado por Marin et al. (2000) para estimar o rendimento potencial da cultura do girassol, no Estado de São Paulo, e as melhores épocas de semeadura da cultura.

Rolim et al. (2001) analisaram o risco climático para a cultura de girassol em algumas localidades de São Paulo e do Paraná, comparando os dados de quebras relativas de produtividades obtidos pelos modelos DSSAT/OILCROP-SUN (Villalobos, et al., 1996) e FAO (Doorenbos e Kassam, 1994). As relações entre os modelos utilizados foram melhores para as localidades do Estado de São Paulo em comparação às do Estado do Paraná. Apesar disso, o teste F ao nível de 95% de confiança foi significativo para todas as localidades. Portanto, apesar das diferenças nos valores de quebra relativa de produtividade simulados, os modelos DSSAT/OILCROP-SUN e FAO não são diferentes para a avaliação do risco climático da cultura do girassol nessas localidades. Contudo, o modelo DSSAT/OILCROP-SUN necessita de dados difíceis de serem adquiridos para aplicação em larga escala, além de dados climáticos e dos parâmetros genéticos da cultura. Os dados necessários para a aplicação do método da FAO são disponibilizados por estações meteorológicas e, portanto, são fáceis de serem adquiridos.

Apesar de necessitar de informações do clima e da cultura, o método da Zona Agroecológica é de fácil aplicação em termos operacionais. Além disso, esse método é de fácil entendimento e os resultados se aproximam da realidade. Entretanto, o modelo apresenta algumas limitações, pois não são consideradas a ocorrência de pragas e doenças e a fertilidade do solo.

2.6 Efeito da deficiência hídrica sobre a produtividade das culturas

Segundo Doorenbos e Kassam (1994), sob estresse hídrico, o vegetal é induzido a adaptações fisiológicas e morfológicas que levam ao fechamento dos estômatos, fato que reduz a fotossíntese e afeta adversamente o crescimento da cultura e sua produtividade. Um modo prático de se quantificar a deficiência hídrica e sua época de ocorrência é pela estimativa do balanço hídrico, o qual nada mais é do que o cômputo da precipitação e da evapotranspiração.

2.6.1 Evapotranspiração

Segundo Pereira et al. (2002), a evapotranspiração é a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera no estado de vapor, por meio dos processos de evaporação e transpiração que ocorrem simultaneamente em uma superfície vegetada. A evaporação é um processo físico de mudança de fase, onde um líquido passa para o estado gasoso por transferência de energia térmica. Essa energia é chamada calor latente de vaporização (λE) que, em média, corresponde a $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ (a $20 \text{ }^\circ\text{C}$). A entrada de água em forma de vapor para a atmosfera ocorre por oceanos, lagos, rios, solo e da vegetação úmida (evaporação do orvalho ou da água interceptada das chuvas). O processo de transpiração é um processo biofísico, no qual a água que passou pelo metabolismo da planta é transferida para a atmosfera na forma de vapor, a partir das paredes celulares, em direção aos espaços intercelulares de ar, ocorrendo então difusão através dos estômatos que atuam como regulador fundamental da taxa de transpiração, juntamente com a camada de ar adjacente à folha. A evapotranspiração é o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera, decorrente da evaporação da água do solo e da vegetação úmida, bem como da transpiração dos vegetais.

Dependendo das condições da vegetação, do tamanho da área vegetada e do suprimento de água pelo solo, definem-se situações bem características de evapotranspiração.

A evapotranspiração potencial ou de referência (ETP ou ETo) é a evapotranspiração de uma extensa superfície vegetada com vegetação rasteira, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, com altura entre 8 e 15 cm ($IAF \approx 3$), sem restrição hídrica e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível de áreas adjacentes (Allen et al., 1998). A evapotranspiração potencial ou de referência depende apenas das variáveis meteorológicas, sendo, portanto, uma variável meteorológica que expressa o potencial de evapotranspiração para as condições meteorológicas vigentes.

A evapotranspiração real (ETR) é a evapotranspiração nas mesmas condições de contorno da evapotranspiração potencial, com ou sem restrição hídrica. Assim, a evapotranspiração real será sempre menor ou igual à evapotranspiração de referência. A evapotranspiração de oásis (ETO) é a evapotranspiração de uma área vegetada úmida (irrigada) circundada por uma extensa área seca, de onde provém energia por advecção, aumentando a quantidade de energia disponível para evapotranspiração.

Evapotranspiração de cultura (ETc) é a evapotranspiração de uma cultura em dada fase de seu desenvolvimento, sem restrição hídrica, em ótimas condições de crescimento e com ampla área de bordadura para evitar a advecção de calor sensível de áreas adjacentes. Assim, a evapotranspiração de cultura depende das condições meteorológicas, expressas por meio da evapotranspiração potencial (ou de referência), do tipo de cultura (maior ou menor resistência à seca) e da área foliar.

A razão entre a evapotranspiração de cultura (ETc) e a evapotranspiração de referência (ETo) é denominada coeficiente de cultivo (K_c), utilizado para o processamento do balanço hídrico da cultura e para as estimativas das produtividades potencial e real com o método da Zona Agroecológica. Como a área foliar da cultura padrão é constante e a da cultura real varia, o valor do coeficiente de cultivo (K_c) também irá variar. A evapotranspiração real da cultura (ETr) é a evapotranspiração nas mesmas condições de contorno da evapotranspiração de cultura (ETc), porém com ou sem restrição hídrica. Portanto, a evapotranspiração real da cultura será sempre menor ou igual à evapotranspiração de cultura.

Segundo Camargo e Sentelhas (1997) e Camargo e Camargo (2000), existem diversos métodos para estimar a evapotranspiração potencial. Muitos deles têm grande aceitação, enquanto outros são bastante criticados e até desprezados (Pereira et al., 1997). O método de Thornthwaite (1948) é bastante utilizado para determinar a evapotranspiração potencial, por apresentar grande praticidade e por utilizar apenas a temperatura média do ar. Esse método, porém, apresenta limitações e não estima satisfatoriamente a evapotranspiração potencial em locais com clima árido ou superúmidos (Camargo et al., 1999). Em condições de aridez, o método de Thornthwaite subestima a evapotranspiração potencial por não considerar o poder evaporante do ar nessa condição (Pruitt, 1964; Rosenberg et al., 1983; Malek, 1987; Pereira et al., 1997). Em condições de umidade do ar elevada, a equação de Thornthwaite superestima a evapotranspiração potencial. Nessa situação de superumidade, admite-se que a equação não considera o baixo déficit hídrico de saturação, o que reduz seu poder de evaporação. Segundo Camargo et al. (1999), é possível usar na equação de Thornthwaite uma temperatura capaz de expressar o efeito do alto e do baixo déficit de saturação do ar, baseando-se na amplitude térmica diária (temperatura efetiva), partindo-se do pressuposto de que, quanto mais seca a atmosfera, maior a amplitude térmica diária.

2.6.2 Balanço hídrico

Por meio do balanço hídrico, é possível quantificar as entradas de água em um sistema dadas pela precipitação, irrigação, orvalho, escoamento superficial, drenagem lateral e ascensão capilar; e as saídas, dadas pela evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda. Essa estimativa nos permite identificar períodos de deficiência hídrica e a época de sua ocorrência. O balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) é uma das formas de se contabilizar o balanço de água no solo. Por meio da contabilização do suprimento natural de água ao solo, pela chuva (P), e da demanda atmosférica, expressa pela evapotranspiração potencial (ETP) ou da cultura (ETc), e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) apropriada ao estudo em questão, o balanço hídrico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no

solo (ARM), podendo ser elaborado desde a escala diária até a mensal (Camargo, 1971; Pereira et al., 1997). Além disso, o método nos permite obter a evapotranspiração relativa de cultura (ET_r/ET_c). A deficiência hídrica fica caracterizada sempre que a evapotranspiração real for menor que a evapotranspiração de cultura, com a relação ET_r/ET_c sendo menor que 1.

O balanço hídrico climatológico elaborado com dados médios de precipitação e evapotranspiração potencial é denominado balanço hídrico normal e é um indicador climatológico do regime hídrico de uma região. É uma ferramenta importante para o planejamento agrícola, podendo ser aplicado na comparação do clima de diferentes localidades e caracterização dos períodos secos e úmidos. Quando elaborado com dados de precipitação e evapotranspiração potencial de um período ou de uma seqüência de períodos (dias, semanas, meses) de um ano específico para uma determinada região é denominado balanço hídrico seqüencial. Essas informações são de grande importância para as tomadas de decisão e nos permitem saber o que ocorreu em termos de disponibilidade hídrica no solo, deficiência e excedentes hídricos em períodos específicos e, com isso, identificar a variabilidade dessas variáveis. Para a elaboração do balanço hídrico de cultura, leva-se em consideração a evapotranspiração de cultura (ET_c) ao invés da ETP, de modo a se determinar a deficiência hídrica de cada tipo de cultura ($1-ET_r/ET_c$) e a quebra de rendimento ($1-PR/PP$) (Pereira et al., 2002).

Em geral, as culturas são mais sensíveis ao déficit hídrico durante a emergência, floração e fase inicial de formação da colheita (frutificação) do que durante o período de crescimento vegetativo e maturação. A diferença na resposta ao déficit hídrico levou à introdução do conceito de coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) que varia para cada cultura e para cada época de desenvolvimento, sendo expresso pela seguinte equação:

$$K_y = (1-PR/PP) / (1-ET_r/ET_c) \quad (1)$$

2.7 Aquecimento global e mudanças climáticas

A entrada de radiação solar na superfície terrestre acontece sob a forma de ondas curtas ($\lambda < 3000 \text{ nm}$). Após receber certa quantidade dessa radiação, as superfícies emitem uma parte da energia de volta para a atmosfera em comprimentos de onda

longa, na faixa espectral do infravermelho. Essa energia é “aprisionada” por alguns constituintes químicos da atmosfera e pelas nuvens, o que leva a um aquecimento da atmosfera acima da superfície da Terra. Esse efeito estufa natural tem mantido a atmosfera terrestre por volta de 30°C mais quente do que ela seria na ausência desse fenômeno, possibilitando assim a existência de vida no planeta (Simon e DeFries, 1992; Lima, 2002, Cerri et al., 2007).

Com o aumento das emissões dos gases de efeito estufa, observado principalmente nos últimos 150 anos, uma quantidade maior de energia passou a ficar retida na atmosfera terrestre (Marengo, 2006), gerando um acréscimo na temperatura global (Siqueira et al., 1994).

Reconhecendo a problemática das mudanças climáticas globais, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas foi criado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pela UNEP (United Nations Environment Programme) em 1988. O IPCC é uma entidade formada por cientista de todo o mundo, com o objetivo de estudar e divulgar as informações técnicas e sócio-econômicas e os impactos relevantes aos riscos à humanidade, com a finalidade de criar mecanismos para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais. Os aumentos globais das concentrações de dióxido de carbono são decorrentes principalmente do uso de combustível fóssil e da mudança no uso da terra, enquanto os aumentos dos gases metano e óxido nitroso são principalmente devidos à agricultura. Segundo o IPCC (2007), no século XX, houve um aumento de $0,6\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ na média da temperatura global, sendo este mais pronunciado na década de 90. Quanto à precipitação, esse incremento foi de 0,2 a 0,3% na região tropical, compreendida entre 10° de latitude norte e 10° de latitude sul.

A concentração atmosférica global de dióxido de carbono aumentou de valores pré-industriais de 280 ppm para 379 ppm em 2005. Entre os anos de 1996 e 2001, a média de aumento das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono foi de 1,74 ppm por ano e, entre os anos de 2002 e 2006, a média subiu para 2,09 ppm, atingindo a concentração de 384 ppm neste último ano (NOAA, 2006). Além disso, as previsões indicam concentrações próximas de 720 ppm para a metade do século XXI (Prentice, 2001). De acordo com os pesquisadores do IPCC, qualquer variação da temperatura, mesmo fracionária, pode desencadear eventos climáticos desastrosos e até tornar partes

do planeta inabitáveis. Há evidências de que eventos extremos, como ondas de calor e de frio, secas, chuvas intensas e enchentes, furacões, ciclones e tempestades, têm afetado diferentes partes do planeta e produzido enormes perdas econômicas e de vidas (IPCC, 2001a). Algumas consequências significativas do aquecimento global já foram observadas, como o aumento da temperatura global da superfície, a diminuição da cobertura de neve e gelo e o aumento do nível médio do mar (IPCC, 2001b).

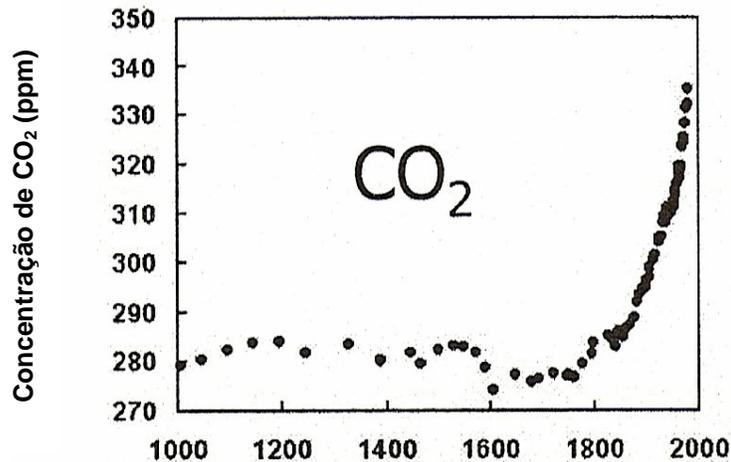


Figura 2 - Concentrações de dióxido de carbono atmosférico (CO₂) do ano 1000 a 2000. Adaptado de IPCC (2001a)

No Brasil, a proporção entre os gases de efeito estufa produzidos a partir da queima de combustíveis fósseis e aqueles produzidos pela agricultura e mudança no uso da terra é diferente dos padrões globais. A queima de combustíveis fósseis é menos importante, enquanto as mudanças no uso da terra e a agricultura respondem por mais de dois terços do total de emissões (Brasil, 2004). Se forem considerados os gases derivados de processos de desmatamento, o Brasil sobe da 17^a para a 4^a posição no ranking dos países que mais emitem gases de efeito estufa na atmosfera (Fearnside, 2006).

As mudanças climáticas podem ter um impacto significativo na economia mundial no século XXI (Houghton et al., 1996), afetando todos os setores econômicos em algum grau. A produção agrícola, entretanto, é o setor mais sensível e vulnerável, já que o clima é um fator determinante da produtividade das culturas (Watson et al., 1996).

2.7.1 Impactos das mudanças climáticas na agricultura

Siqueira et al. (1994) analisaram os possíveis impactos das mudanças climáticas globais sobre as culturas de trigo, milho e soja no Brasil, utilizando modelos de simulação de crescimento de culturas e cenários de mudanças climáticas criados a partir dos modelos de circulação geral (GMCs). O impacto na produção de grãos seria relativamente grande, de forma a serem previstas reduções na produção de trigo e de milho. A produção da cultura da soja, porém, apresentaria aumento. A região nordeste seria bastante vulnerável aos decréscimos nas produções de milho, enquanto que nas regiões central e centro-sul ocorreriam reduções na produção de trigo.

Siqueira et al. (2000) avaliaram os impactos de mudanças graduais do clima utilizando cenários climáticos projetados pelos modelos GISS (desenvolvidos pelo *Goddard Institute for Space Studies*, da NASA), buscando analisar os efeitos, estratégias mitigadoras e as tendências de resposta ao longo de um período de 50 anos. Os autores concluíram que os modelos GISS apresentaram desempenho satisfatório ao simular cenários atuais de temperatura e radiação solar diários, incorporando maiores incertezas na reprodução do volume mensal de chuvas. As projeções dos modelos GISS sinalizaram aumentos na temperatura do ar em curto prazo, em torno de 2°C para o ano 2010, com máximas projetadas para as regiões Centro-Sul, alcançando 6°C em torno de 2050 a 2060. Quanto à radiação solar global, ressaltaram a possibilidade de redução em curto prazo (2010-2030) no outono-inverno, representando menor disponibilidade de energia, com tendência à elevação em cenários futuros. As projeções relativas à precipitação pluviométrica incorporaram incertezas elevadas, tendo sido detectada uma tendência de elevação do volume de chuvas no período do outono, com declínios no inverno e início da primavera. Esses declínios podem representar um agravamento de conflitos quanto à disponibilidade de água nas regiões Centro-Sul, Central e Nordeste. Quanto à agricultura, houve uma redução na produção de grãos de trigo e milho de cerca de 31% e 16%, respectivamente, em relação direta com os cenários climáticos decorrentes dos aumentos nas concentrações de CO₂ na atmosfera, com efeitos mais pronunciados em torno do ano 2050. Para a cultura da soja, os cenários climáticos decorrentes dos aumentos da concentração de CO₂ na atmosfera não apresentam efeitos negativos, registrando-se um aumento na produção de grãos em torno de 27%. Os reflexos quanto à produção nacional de grãos decorrentes dos cenários climáticos

projetados através dos modelos GISS foram mais expressivos nas regiões Centro-Sul e Sul, tendendo a se intensificar a partir de 2050.

Alexandrov et al. (2002) investigaram a vulnerabilidade e adaptação de culturas em diferentes tipos de solos e às alterações climáticas utilizando modelos de estimativas de mudanças climáticas regionais validados para a região nordeste da Áustria. Foram feitas análises estratégicas para avaliar o impacto das mudanças climáticas na produção agrícola e adaptação agrotecnológica com a utilização de modelos de crescimento de culturas. Nesse estudo, foram criados cenários com combinações de alterações de temperatura, precipitação e concentração de gás carbônico na atmosfera. Os autores notaram que os resultados estimados pelos modelos DSSAT CERES e CROPGRO, do sistema DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), foram coerentes quando comparados com os dados medidos e que a maioria dos processos fisiológicos será afetada pela temperatura do ar. Segundo os autores, o aquecimento diminui a duração do período de crescimento, como resultado do acentuado desenvolvimento fenológico. No caso do trigo, um acréscimo de 0,5 a 2,0°C na temperatura do ar resulta em um decréscimo de 1 a 6% na produtividade de grãos. Os acréscimos na precipitação também reduzem a produtividade de grãos. Entretanto, foram encontrados resultados opostos para a produtividade da soja: o aquecimento, especialmente quando combinado com o aumento da precipitação, produz um incremento expressivo na produtividade.

Alexandrov e Eitzinger (2005) estudaram os efeitos potenciais das mudanças climáticas e o aumento na concentração de dióxido de carbono sobre a produção de culturas agrícolas no centro e sudeste da Europa, concluindo que o aquecimento diminuirá o período de crescimento das culturas estudadas, pois o desenvolvimento fenológico será acentuado. Para algumas culturas, o aumento da precipitação não teve um efeito positivo na produtividade. Entretanto, quando se considerou o aumento no nível de CO₂, a maioria das culturas obteve acréscimo na produtividade.

Assad et al. (2004) avaliaram o impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil e concluíram que, considerando os prognósticos de aumento de temperaturas, segundo relatório do IPCC de 2001, o cultivo do café arábica nos Estados de Goiás, Minas Gerais, São Paulo e Paraná será drasticamente reduzido nos próximos 100 anos, se mantidas as condições genéticas e fisiológicas das atuais

variedades. Nos Estados de Goiás, Minas Gerais e São Paulo, a cultura do café será praticamente inviabilizada. No Paraná, haverá um deslocamento da área produtiva para a região Sul, podendo haver problemas de qualidade dessa bebida. Nos cenários estudados, o deslocamento da produção será para áreas montanhosas, de difícil manejo.

Considerando que a cana-de-açúcar ocupa uma extensa área agrícola brasileira e constitui uma importante parcela da economia do país, é importante saber como essa cultura responderá às mudanças climáticas e ao aumento das concentrações de CO₂ previstos para este século, com o intuito de presumir qual o possível cenário para a cultura de cana-de-açúcar no Brasil.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e dados climatológicos

O presente estudo foi feito para a região de Piracicaba, SP, a qual se encontra nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 42' 30" S, longitude 47° 38' 00" W e altitude de 546 metros acima do nível do mar. Essa região foi escolhida por representar uma das principais regiões canavieiras do Estado, concentrando diversas usinas. A Figura 3 mostra a distribuição da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, com destaque para o município de Piracicaba, que está entre os três maiores produtores de cana-de-açúcar em termos de área plantada.

Os dados meteorológicos decendiais foram obtidos junto ao banco de dados da estação meteorológica convencional da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, em Piracicaba, SP, referente ao período de 1927 a 2006, totalizando 80 anos.

Os dados meteorológicos utilizados nesse estudo foram: temperatura do ar (máxima, mínima e média), insolação e chuva, os quais foram empregados na estimativa da evapotranspiração potencial, do balanço hídrico climatológico, do balanço hídrico de cultura e das produtividades potencial e real da cana-de-açúcar.

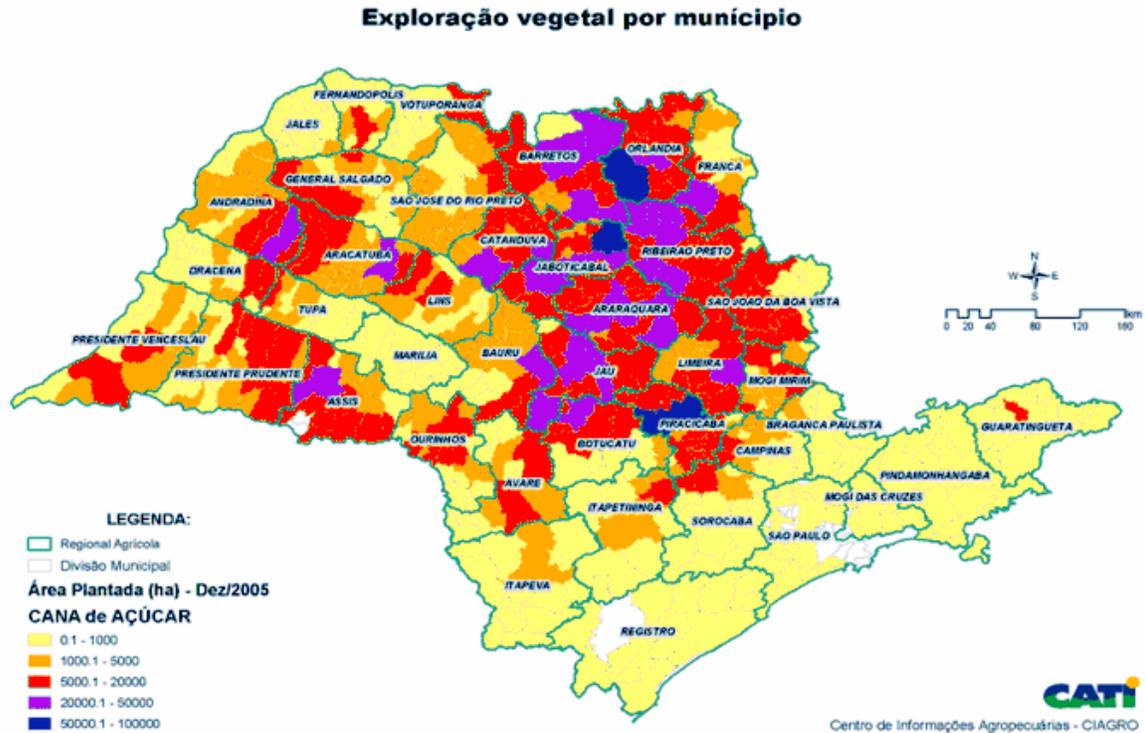


Figura 3 - Área plantada por município com a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Fonte: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo

3.2 Estimativa da produtividade potencial da cana-de-açúcar

A estimativa da produtividade potencial da cultura foi feita por meio do método da Zona Agroecológica (MZA), apresentado por Doorenbos e Kassam (1994). Esse método estima o rendimento máximo de uma cultura obtido por uma variedade altamente produtiva e bem adaptada ao respectivo ambiente de crescimento, com as exigências hídricas, nutricionais e fitossanitárias atendidas, sendo a produtividade condicionada apenas por características genéticas da cultura e das condições ambientais (radiação solar, fotoperíodo e temperatura do ar).

A produtividade potencial da cultura (PP_R) é dada em kg de massa seca por ha e pode ser expressa da seguinte forma:

$$PP_R = PP_{BP} * C_{IAF} * C_R * C_{COL} * C_{UM} * ND \quad [\text{kg MS ha}^{-1}] \quad (2)$$

em que: PPB_P é a produtividade bruta de matéria seca de uma cultura padrão, expressa em $\text{kg MS ha}^{-1} \text{d}^{-1}$; C_{IAF} é o coeficiente de correção para o índice de área foliar, C_{RES} é o coeficiente de correção para respiração, C_{COL} é o coeficiente de correção para a parte colhida (índice de colheita), C_{UM} é o coeficiente de correção para a umidade da parte colhida e ND é o número de dias do ciclo da cultura.

3.2.1 Determinação da produtividade potencial bruta padrão (PPB_P)

A produtividade potencial bruta padrão (PPB_P) se refere à produtividade bruta de matéria seca, levando-se em consideração a presença ou ausência de nuvens, pois elas alteram a quantidade de radiação solar incidente e fazem com que a eficiência de aproveitamento da energia radiante pelas folhas seja diferente nessas duas situações. Como durante um dia quase sempre ocorrem períodos de nebulosidade, a PPB_P é composta por um componente relativo ao período nublado (PPB_n) e outro relativo ao período de céu claro (PPB_c). Sendo assim, é fundamental conhecer o número efetivo de horas de brilho solar (n) durante o período de estimativa. Desse modo, a PPB_P foi estimada por:

$$PPB_P = PPB_n + PPB_c \quad [\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}] \quad (3)$$

O método estima PPB_n e PPB_c por meio das seguintes relações (Barbieri e Tuon, 1992):

$$PPB_n = (31,7 + 0,219 Q_0) cTn (1 - n/N) \quad [\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}] \quad (4)$$

$$PPB_c = (107,2 + 0,36 Q_0) cTc n/N \quad [\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}] \quad (5)$$

em que: Q_0 é a irradiância solar global extraterrestre expressa em $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$; cTn é a correção devido à temperatura relativa ao período nublado; cTc é a correção devido à temperatura relativa ao período sem nuvens e N é o fotoperíodo. Os coeficientes de correção cTc e cTn variam para cada grupo de cultura. O fotoperíodo (N) e a irradiância solar global extraterrestre (Q_0) foram determinados de acordo com a latitude e a época do ano, por meio de equações astronômicas apresentadas por Pereira et al. (2002).

3.2.1.1 Determinação dos coeficientes cTc e cTn

A produção de matéria seca varia de acordo com a espécie, o tipo de mecanismo de fixação de carbono e a temperatura ambiente, em função de sua adaptação climática. Os coeficientes cTc e cTn foram convertidos em polinômios e ajustados para facilitar as estimativas em planilhas de cálculo por Barbieri e Tuon (1992), sendo esses polinômios os seguintes para a cultura da cana-de-açúcar:

- Para $T \geq 16,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$cTn = - 1,064 + 0,173 T - 0,0029 T^2 \quad (6a)$$

$$cTc = - 4,16 + 0,4325 T - 0,00725 T^2 \quad (6b)$$

- Para $T < 16,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$cTn = - 4,16 + 0,4325 T - 0,00725 T^2 \quad (6c)$$

$$cTc = - 9,32 + 0,865 T - 0,0145 T^2 \quad (6d)$$

3.2.1.2 Determinação do coeficiente de índice de área foliar (C_{IAF})

Deve-se levar em conta que, em uma cultura, o índice de área foliar (IAF) varia continuamente desde a semeadura até a maturação (cultura real). Atribui-se uma correção em função do índice de área foliar máximo ($IAF_{m\acute{a}x}$) atingido durante o cultivo, já que para a cultura padrão é admitido um $IAF = 5$ constante durante todo o ciclo. Assim, tal coeficiente de correção visa a ajustar o IAF da cultura da cana-de-açúcar a uma condição mais próxima da realidade. De acordo com Barbieri e Tuon (1992), o valor de C_{IAF} é dado pela relação:

$$C_{IAF} = 0,0093 + 0,185 IAF_{m\acute{a}x} - 0,0175 IAF_{m\acute{a}x}^2 \quad (IAF_{m\acute{a}x} \geq 5, C_{IAF} = 0,5) \quad (7)$$

3.2.1.3 Correção para a respiração (C_{RES})

Durante a fotossíntese e o crescimento, uma parte dos carboidratos é utilizada no processo de fotorrespiração e outra parte na manutenção dos tecidos (respiração de manutenção). Esse consumo depende da temperatura ambiente, havendo relação direta entre a temperatura e a respiração. Portanto, é necessário considerar um coeficiente de correção para a respiração na estimativa do rendimento máximo, o qual é dado por:

$$C_{RES} = 0,6 \text{ para } T < 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

$$C_{RES} = 0,5 \text{ para } T \geq 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

em que: T é a temperatura média durante o período considerado.

3.2.1.4 Determinação do coeficiente de colheita (C_{COL})

Normalmente, apenas parte da matéria seca total produzida pela cultura é colhida, seja na forma de grão, fibra, fruto ou açúcar. O índice de colheita é a relação entre a matéria seca economicamente rentável e a massa seca total produzida. De acordo com Doorenbos e Kassam (1994), para a cultura da cana-de-açúcar $C_{COL} = 0,8$ pode ser adotado.

3.2.1.5 Determinação do coeficiente de umidade (C_{UM})

Ao se obter a matéria seca da parte colhida, deve-se acrescentar a ela a umidade residual (U%) que normalmente fica retida no produto, chegando-se assim ao valor da produtividade potencial final (PP_F). Para essa correção, aplica-se a seguinte relação (Pereira et al., 2002):

$$C_{UM} = (1 - 0,01 * U\%)^{-1} \quad (10)$$

sendo $U\% = 80$ para a cultura da cana-de-açúcar.

3.3 Estimativa da produtividade real em função da deficiência hídrica

A deficiência hídrica induz as plantas a adaptações morfológicas e fisiológicas, como o fechamento dos estômatos, reduzindo a fotossíntese, afetando adversamente o crescimento e o rendimento das culturas (Pereira et al., 2002). Para estimar a disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura, pode-se utilizar o método do balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Mather (1955), considerando-se a capacidade de água disponível do solo (CAD), a chuva e a evapotranspiração da cultura, calculada de acordo com os valores de K_c para cada uma das fases fenológicas da cultura (Barbieri et al., 1997). Portanto, para a determinação da deficiência hídrica da cultura, é necessário determinar o balanço hídrico da mesma, o qual parte do cômputo entre a precipitação (P) e a evapotranspiração da cultura (ET_c).

3.3.1 Estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc)

A evapotranspiração de cultura foi obtida pela seguinte relação:

$$ET_c = K_c * ETP \quad (11)$$

A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite com temperatura efetiva. Esse método é o de Thornthwaite (1948), que parte de uma evapotranspiração padrão (ETp), a qual é a evapotranspiração para um mês de trinta dias e com fotoperíodo (N) de doze horas, modificado por Camargo et al. (1999), para ser empregado em qualquer condição climática. Para isso, utiliza-se uma temperatura corrigida, denominada efetiva (Tef), que considera a amplitude térmica local, além da temperatura média do ar. Desse modo, a evapotranspiração potencial não é mais subestimada em condições de clima seco e superestimada em ambientes úmidos. A temperatura efetiva é dada por:

$$T_{ef} = 0,36 (3T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \quad (12)$$

A evapotranspiração potencial é estimada pelas seguintes equações:

$$ET_p = 16 (10 * T_{ef}/I)^a \quad (0 \leq T_{ef} < 26,5^\circ\text{C}) \quad (13)$$

$$ET_p = -415,85 + 32,24 * T_{ef} - 0,43 * T_{ef}^2 \quad (T_{ef} \geq 26,5^\circ\text{C}) \quad (14)$$

sendo:

$$I = 12 (0,2 T_a)^{1,514} \quad (15)$$

sendo T_a a temperatura média anual normal; e

$$a = 0,49239 + 1,7916 * 10^{-2} I - 7,71 * 10^{-5} I^2 + 6,75 * 10^{-7} I^3 \quad (16)$$

Finalmente, corrige-se a ETp em função do fotoperíodo (N) e do número de dias do período (NDP), como segue:

$$ETP = ET_p * COR \quad (\text{mm/mês}) \quad (17)$$

$$COR = N/12 * NDP/30 \quad (18)$$

Os valores de Kc adotados para a estimativa da ETc da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 2, considerando-se as diferenças de ciclo entre a cana planta e a cana soca.

Tabela 2 - Coeficientes de cultura (Kc) para cana planta e cana soca em diferentes períodos de desenvolvimento

Cana planta		Cana soca	
Dias	Kc	Dias	Kc
1-61	0,40	1-61	0,40
62-153	0,75	62-153	0,75
154-244	1,10	154-244	1,10
245-334	1,25	245-334	1,25
335-485	0,70	335-365	0,70

Adaptado de Doorenbos e Kassam (1994)

3.3.2 Determinação do balanço hídrico da cultura (BH)

Para o processamento do balanço hídrico seqüencial da cultura na escala decendial foi empregado o método de Thornthwaite e Mather (1955), utilizando-se o programa “BHcult” elaborado em planilha eletrônica por Rolim et al. (1998). Esse método considera que a variação do armazenamento (ARM) de água do solo é uma função exponencial que envolve a capacidade de água disponível (CAD) em função da profundidade de exploração efetiva das raízes e características físicas do solo e a perda de água acumulada (negativo acumulado), função do balanço entre a chuva (P) e a evapotranspiração da cultura (ETc). Como resultado, o balanço hídrico fornece as estimativas da evapotranspiração real da cultura (ETr), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM) para cada período (Pereira et al., 2002).

3.3.3 Estimativa da produtividade real

Para a estimativa da produtividade potencial não se considerou qualquer efeito de deficiência hídrica. No entanto, sabe-se que a deficiência hídrica pode causar redução do desenvolvimento e produtividade das culturas, devido a adaptações fisiológicas e morfológicas, fechamento dos estômatos e redução da fotossíntese.

A produtividade real (PR) foi estimada pelo modelo que estima o rendimento em função da produtividade potencial (PP) e do déficit hídrico relativo ($1 - ETr/ETc$), que ocorre em cada fase do desenvolvimento, de acordo com a sensibilidade ao estresse hídrico (K_y). Além disso, o modelo fornece a quebra relativa de rendimento ($1 - PR/PP_F$).

Assim, conhecendo-se a relação ET_r/ET_c , PP_F e K_y , é possível determinar a produtividade real (PR) de uma cultura, a partir da seguinte relação:

$$PR = \prod_{i=1}^n \{PP_R [1 - Ky_i (1 - ET_{r_i}/ET_{c_i})]\} \quad (19)$$

em que i corresponde às diferentes fases fenológicas da cultura da cana-de-açúcar.

A quebra de produtividade (Q, em %) foi estimada pela relação:

$$Q (\%) = (1 - PR / PP) * 100 \quad (20)$$

3.3.4 Calibração do modelo de estimativa das produtividades potencial e real

Os modelos de estimativa das produtividades potencial e real, utilizados neste estudo, foram previamente calibrados para a cultura da cana-de-açúcar por diferentes autores. Para este estudo, os valores calibrados de K_y foram obtidos por Santos et al. (2006), os quais empregaram dados de produtividade da cana-de-açúcar das variedades RB72454, SP801842 e SP801816, cultivadas em Jaú e Jaboticabal, SP, fornecidos pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC). Foram utilizados dados relativos à cana planta e canas socas de primeiro e segundo cortes, durante um período de quatro anos. Os valores de K_y resultantes do processo de calibração são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) calibrados para a cultura da cana-de-açúcar em diferentes períodos de desenvolvimento

Fase Fenológica	Ky		
	Cana planta e Cana soca precoce	Cana soca Média	Cana soca tardia
Brotação e estabelecimento	0,75	0,80	0,70
Período de grande cresc. Vegetativo	0,75	0,80	0,70
Formação da Colheita	0,50	0,70	0,50
Maturação	0,10	0,30	0,10

Fonte: Santos et al. (2006)

A Figura 4 apresenta o resultado do processo de calibração obtido por Santos et al. (2006), a qual mostra a boa correlação obtida entre os dados estimados e observados, com um erro médio da ordem de 5%.

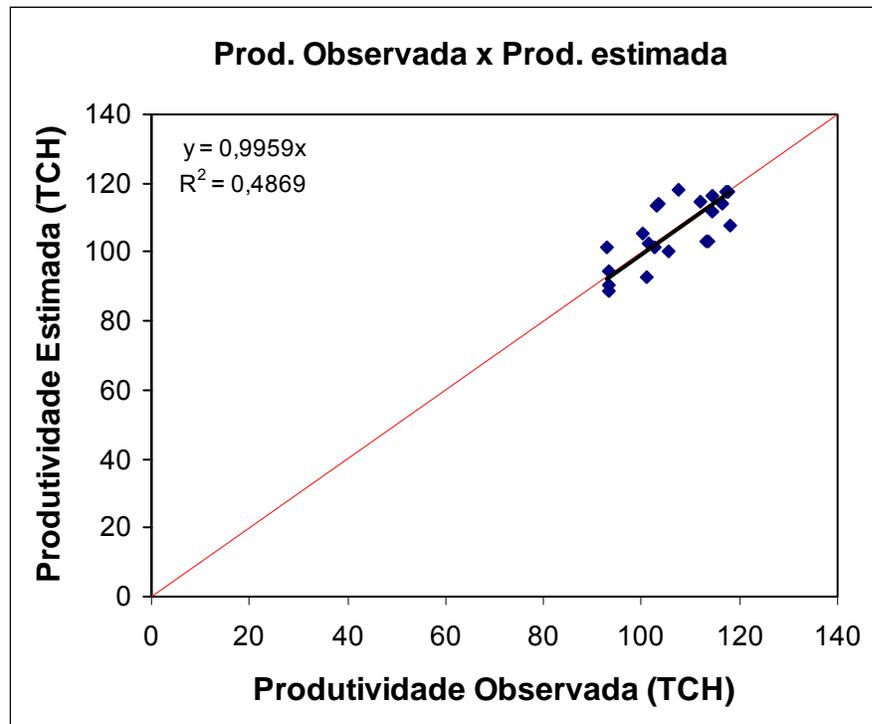


Figura 4 - Relação entre a produtividade real estimada pelo modelo da FAO e observada em condições de campo, nos municípios de Jaú e Jaboticabal, SP, para as variedades. RB72454, SP801842 e SP801816, do primeiro ao terceiro corte. Fonte: Santos et al. (2006)

3.4 Análise da produtividade da cana-de-açúcar para as condições climáticas atuais

Os dados de produtividade potencial e real da cana-de-açúcar obtidos por meio dos métodos da Zona Agroecológica e da penalização da PP pelo déficit hídrico, foram determinados para uma série histórica de 80 anos, considerando as condições atuais de temperatura, precipitação, insolação e concentração de CO₂ na atmosfera. Essa análise foi considerada como sendo o cenário atual.

3.5 Projeções futuras do clima para o município de Piracicaba, SP

3.5.1 Efeitos das mudanças climáticas

Nas simulações foram usadas condições climáticas do cenário A1B, que faz parte da família de cenários de emissões do Relatório Especial de Cenários de Emissões (RECE) A1, criado pelo IPCC (2007). O contexto da família de cenários A1 descreve um

mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século e declinando em seguida e a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. As principais questões subjacentes são: a convergência entre as regiões, a capacitação e o aumento das interações culturais e sociais, com uma redução substancial das diferenças regionais na renda per capita. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica: intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1F1), fontes energéticas não-fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B), em que o equilíbrio é definido por não se depender muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final.

Segundo previsões feitas pelo cenário A1B, a temperatura poderá variar entre 1,7 a 4,4 °C (Tabela 4 e Figura 5).

Tabela 4 - Projeção do aquecimento médio global da superfície no final do século XXI

Caso	Mudança de temperatura (°C em 2090-2099 relativa a 1980-1999)	
	Melhor estimativa	Faixa provável
Concentrações constantes do ano 2000	0,6	0,3 – 0,9
Cenário B1	1,8	1,1 – 2,9
Cenário A1T	2,4	1,4 – 3,8
Cenário B2	2,4	1,4 – 3,8
Cenário A1B	2,8	1,7 – 4,4
Cenário A2	3,4	2,0 – 5,4
Cenário A1F1	4,0	2,4 – 6,4

Fonte: IPCC (2007).

Poderá haver uma variação na precipitação de -5 a 5% no período do verão e de -5 a -10% no período do inverno, para a região de Piracicaba, como mostra a Figura 6.

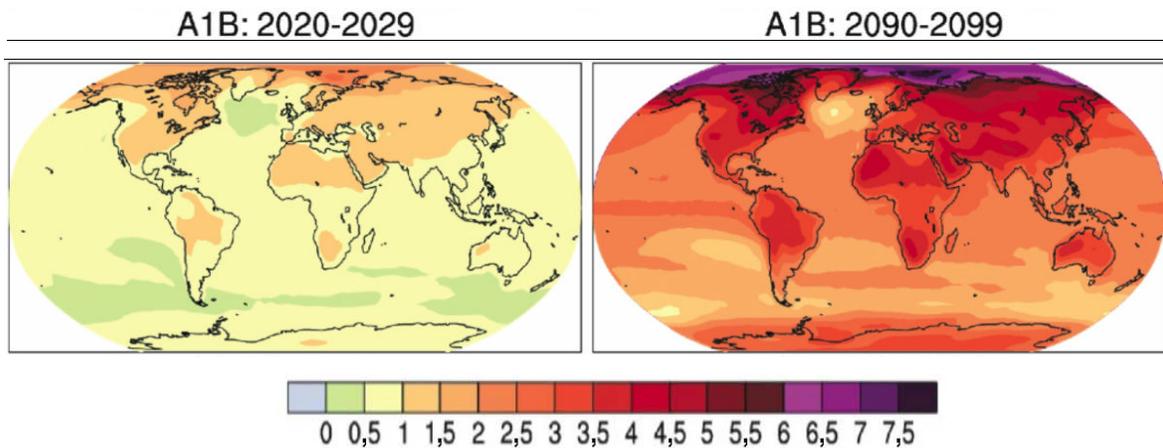


Figura 5 - Projeções das mudanças na temperatura em relação ao período de 1980 a 1999, baseadas nas projeções médias do Multi-modelo de Circulação Geral da Atmosfera-Oceano para a média do cenário A1B do RECE ao longo das décadas de 2020 a 2029 (à esquerda) e 2090 a 2099 (à direita). Fonte: IPCC (2007)

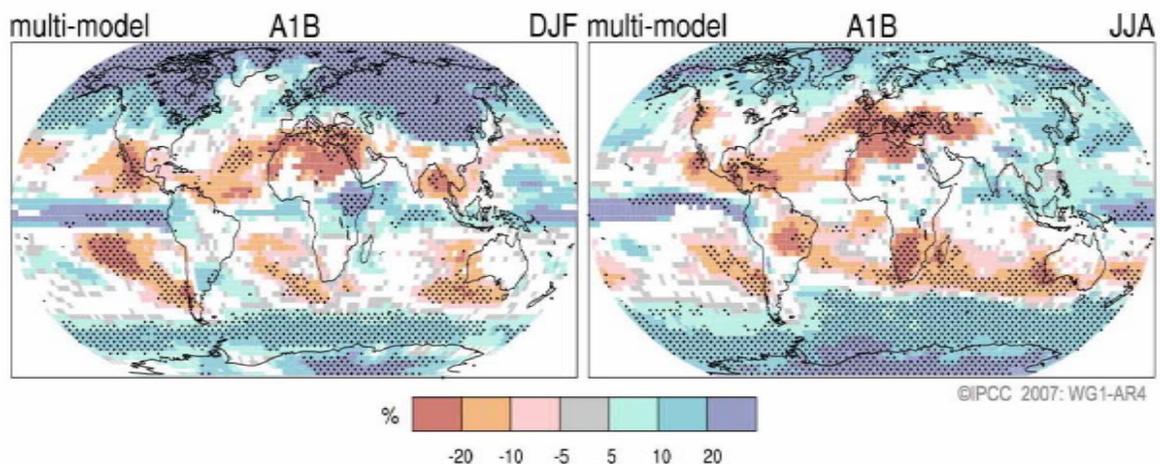


Figura 6 - Mudanças relativas na precipitação (em porcentagem) para o período de 2090 a 2099, em relação ao período de 1980 a 1999, com base no cenário A1B do RECE, para os meses de dezembro a fevereiro (à esquerda) e de junho a agosto (à direita). As áreas brancas são onde menos de 66% dos modelos concordam com o sinal da mudança e as áreas pontilhadas são onde mais de 90% dos modelos concordam com o sinal da mudança. Fonte: IPCC (2007)

Foi estabelecida a relação entre os dados de precipitação e de insolação de Piracicaba, para a determinação da variação na insolação decorrente da variação na precipitação (Figura 7).

Para se avaliar o efeito da elevação da concentração de CO₂ na atmosfera considerou-se um aumento de 370 ppm (concentração atual) para 721 ppm até o ano de 2080. O incremento na produtividade da cana-de-açúcar decorrente desse aumento foi admitido como sendo da ordem de 2,9% ppm⁻¹, segundo Tubiello et al. (2000).

Para analisar a variabilidade na produtividade da cana-de-açúcar na região de Piracicaba em decorrência das mudanças climáticas foram criados cenários com combinações de aumento de temperatura, variação na precipitação e na insolação, incremento na produtividade decorrente do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (440, 559 e 721 ppm) (Tabelas 5, 6 e 7). Destaca-se também a importância de se considerar o efeito do avanço tecnológico neste estudo, já que o melhoramento genético das culturas associado às práticas adequadas de manejo é responsável pelo aumento da produtividade da cana-de-açúcar observada nas últimas décadas.

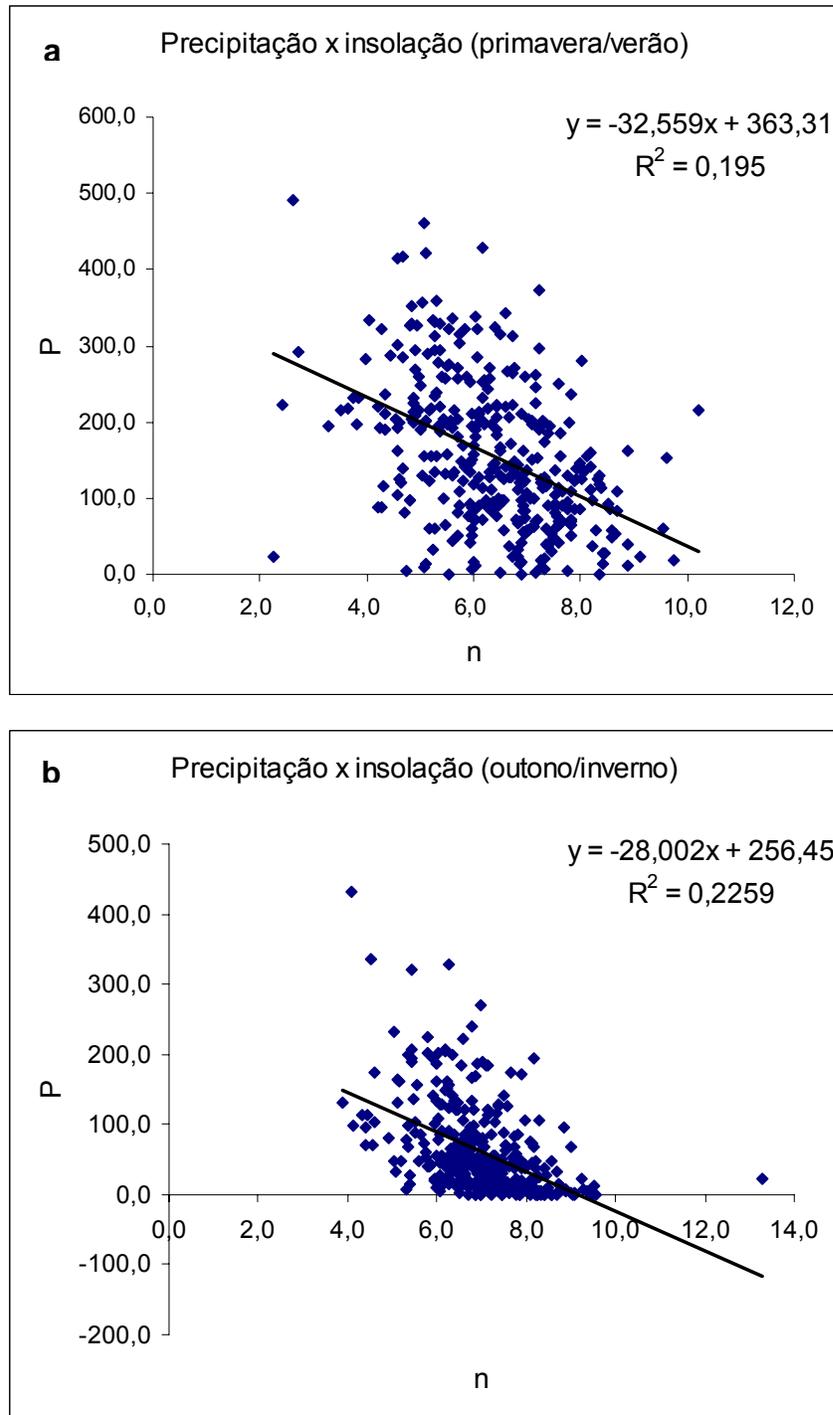


Figura 7 - Relação entre a chuva e a insolação, na escala decenal, nos períodos de (a) primavera/verão e (b) outono/inverno, em Piracicaba, SP

A tendência tecnológica da cultura da cana-de-açúcar considerada foi estabelecida com base nos dados do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA – (IBGE, 2007), considerando-se o censo para os anos de 1980 e 1985 e do PAM – Produção Agrícola Municipal – para os anos de 1990 a 2006, para o Estado de

São Paulo (Tabela 7 e 8 e Figura 8). A partir da equação de regressão linear obtida pela relação entre a produtividade e os anos analisados, foi calculado o acréscimo de produtividade decorrente dos avanços tecnológicos, tendo-se como resultado de 0,43 TCH/ano, valor que foi considerado na determinação dos incrementos que constam na Tabela 7.

Tabela 5 - Cenários futuros do clima com combinações de alteração de temperatura e precipitação, de acordo com os prognósticos do modelo A1B do IPCC (2007)

Cenário	Ano	ΔT (°C)	ΔP (%)			
			Primavera	Verão	Outono	Inverno
C0	2006	0	0	0	0	0
C1	2020	1	0	-5	0	-5
C2	2020	1	0	0	0	-5
C3	2020	1	0	+5	0	-5
C4	2020	1	0	-5	0	-10
C5	2020	1	0	0	0	-10
C6	2020	1	0	+5	0	-10
C7	2020	1	0	0	0	0
C8	2050	2	0	-5	0	-5
C9	2050	2	0	0	0	-5
C10	2050	2	0	+5	0	-5
C11	2050	2	0	-5	0	-10
C12	2050	2	0	0	0	-10
C13	2050	2	0	+5	0	-10
C14	2050	2	0	0	0	0
C15	2080	3	0	-5	0	-5
C16	2080	3	0	0	0	-5
C17	2080	3	0	+5	0	-5
C18	2080	3	0	-5	0	-10
C19	2080	3	0	0	0	-10
C20	2080	3	0	+5	0	-10
C21	2080	3	0	0	0	0

3.6 Análises dos dados

Simulações da produtividade potencial e real da cana-de-açúcar para Piracicaba, SP, para um período de 80 anos, foram feitas para cada um dos cenários estabelecidos, de modo a se determinar a variabilidade temporal do rendimento da cana sob tais condições. Foram determinados os valores médios de produtividade da série histórica para fins de comparação entre os diferentes cenários, assim como o desvio padrão de tais estimativas. As produtividades foram analisadas individualmente, para cada tipo de

cana, e também de forma ponderada pela área que cada tipo ocupa no canavial. Foram determinadas as deficiências hídricas ocorridas em cada um dos ciclos, de modo a apresentar a variabilidade dessa variável ao longo da série histórica de 80 anos.

Para cada um dos cenários de mudanças climáticas, estabeleceu-se também o balanço hídrico climatológico normal, a fim de se determinar o impacto das alterações do clima na disponibilidade hídrica regional.

Tabela 6 - Cenários futuros do clima com as alterações de insolação, de acordo com os prognósticos do modelo A1B do IPCC (2007)

Cenário	Ano	Δn (%)			
		Primavera	Verão	Outono	Inverno
C0	2006	0	0	0	0
C1	2020	0	+1	0	+4,3
C2	2020	0	0	0	+4,3
C3	2020	0	-6,5	0	+4,3
C4	2020	0	+1	0	+5,9
C5	2020	0	0	0	+5,9
C6	2020	0	-6,5	0	+5,9
C7	2020	0	0	0	0
C8	2050	0	+1	0	+4,3
C9	2050	0	0	0	+4,3
C10	2050	0	-6,5	0	+4,3
C11	2050	0	+1	0	+5,9
C12	2050	0	0	0	+5,9
C13	2050	0	-6,5	0	+5,9
C14	2050	0	0	0	0
C15	2080	0	+1	0	+4,3
C16	2080	0	0	0	+4,3
C17	2080	0	-6,5	0	+4,3
C18	2080	0	+1	0	+5,9
C19	2080	0	0	0	+5,9
C20	2080	0	-6,5	0	+5,9
C21	2080	0	0	0	0

Tabela 7 - Cenários futuros do clima, baseados nas combinações de alteração de produtividade decorrente do aumento de CO₂, de acordo com os prognósticos do modelo A1B do IPCC (2007) e pelo avanço tecnológico, segundo os dados do CENSO e do PAM (produção agrícola municipal) do IBGE (2007)

Cenários	Ano	ΔProd CO ₂ (%)	ΔProd Avanço Tecnológico (TCH)
C0	2006	0	0
C1	2020	+2	+6,02
C2	2020	+2	+6,02
C3	2020	+2	+6,02
C4	2020	+2	+6,02
C5	2020	+2	+6,02
C6	2020	+2	+6,02
C7	2020	+2	+6,02
C8	2050	+5,4	+18,92
C9	2050	+5,4	+18,92
C10	2050	+5,4	+18,92
C11	2050	+5,4	+18,92
C12	2050	+5,4	+18,92
C13	2050	+5,4	+18,92
C14	2050	+5,4	+18,92
C15	2080	+10	+31,82
C16	2080	+10	+31,82
C17	2080	+10	+31,82
C18	2080	+10	+31,82
C19	2080	+10	+31,82
C20	2080	+10	+31,82
C21	2080	+10	+31,82

Tabela 8 - Produtividade média da cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, baseada nas informações do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA – (IBGE, 2007), considerando-se os dados do CENSO para os anos de 1980 e 1985 e do PAM – Produção Agrícola Municipal – para os anos de 1990 a 2006

Ano	Produtividade (TCH)	Ano	Produtividade (TCH)
1980	67,33	1998	77,89
1985	73,75	1999	77,16
1990	76,07	2000	76,08
1991	73,53	2001	77,49
1992	77,00	2002	79,94
1993	78,41	2003	80,91
1994	80,11	2004	81,15
1995	77,45	2005	82,60
1996	77,14	2006	81,94
1997	79,31		

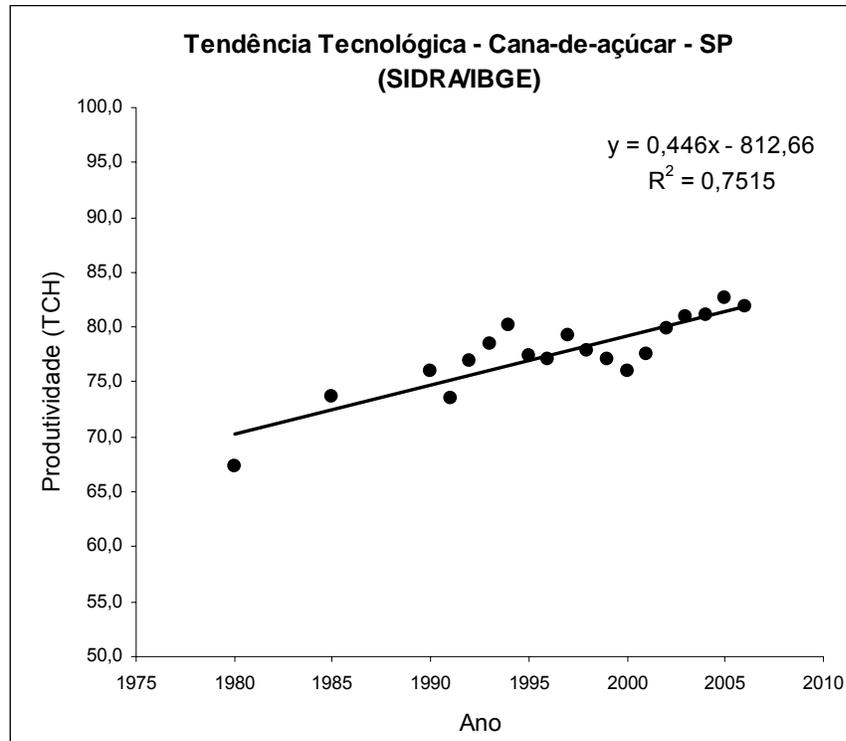


Figura 8 - Tendência tecnológica da produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, baseada em informações do Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA – (IBGE, 2007), considerando-se os dados do CENSO para os anos de 1980 e 1985 e do PAM – Produção Agrícola Municipal – para os anos de 1990 a 2006

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica regional em Piracicaba, SP

4.1.1 Balanço hídrico climatológico normal

A partir do balanço hídrico normal para as condições atuais, calculado com os dados médios decendiais de 30 anos, de 1977 a 2006, observa-se que há um total anual de precipitação de 1348 mm e uma evapotranspiração potencial total anual de 1486 mm para a região de Piracicaba. Nesse caso, o balanço hídrico resultou em uma deficiência hídrica anual de 260 mm e um excedente hídrico de 116 mm (Tabela 9 e Figura 9).

Utilizando-se os cenários de mudanças climáticas adotados para a execução desse estudo, que consideram variação no volume de chuva e aumento da temperatura média, observa-se um aumento na evapotranspiração potencial (ETP), uma vez que essa é estimada apenas em função da temperatura do ar. Isso vem sendo evidenciado por vários autores, entre eles Challinor e Wheeler (2007). A evapotranspiração real (ETR) também tende a aumentar, porém o aumento não é tão acentuado quanto o da ETP, pois a influência do aumento da temperatura é minimizada pela variação no regime hídrico (Figura 10).

Os resultados evidenciam uma redução na disponibilidade de recursos hídricos, com aumento significativo das deficiências hídricas e redução acentuada dos excedentes (Tabela 9). Para o C21, a deficiência hídrica aumentaria 167 mm e o excedente hídrico diminuiria cerca de 84 mm, em relação ao C0. Isso poderá ter conseqüências negativas para a produção agrícola, dependendo do tipo de cultura. Um aumento na temperatura poderia reduzir bastante o excedente dos recursos hídricos, ou seja, a água que irá abastecer os mananciais e reservatórios. A diferença entre a água que entra no sistema (chuva - P) e a evapotranspiração potencial (ETP), denominada de (P-ETP) será cada vez mais negativa, sendo igual a -451,9 mm para o C15, ao passo que para o C0 é de -138 mm.

Esses resultados são similares aos resultados encontrados por Salati et al. (2006), que estudaram os principais temas ambientais para o Brasil, para o ano de 2022 e concluíram que deverá haver uma redução na disponibilidade de água nos

ecossistemas. Após analisarem diversos municípios, os autores acreditam que a região de Piracicaba sofrerá impactos severos e que um aumento de 2°C sobre a temperatura média de 1961 a 1990 poderia reduzir em aproximadamente 50% o excedente hídrico, o que corrobora os resultados apresentados na Tabela 9 e Figura 9.

Horikoshi e Fisch (2007), estudando o balanço hídrico atual para o município de Taubaté, SP, e a questão da disponibilidade hídrica futura considerando dois cenários de mudanças climáticas (A2 e B2) propostos pelo IPCC (2007), concluíram que, para o cenário A2, poderá ocorrer um aumento no déficit hídrico associado a uma diminuição no excedente, que a demanda de água aumentará e a evapotranspiração poderá ultrapassar os valores de precipitação. O cenário B2 apresentou valores bem próximos, porém inferiores aos obtidos para o cenário A2.

Tabela 9 - Chuva, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real, deficiência hídrica e excedente hídrico anuais, obtidos por meio do balanço hídrico normal, para o cenário atual e para os cenários de mudanças climáticas

	P	ETP	ETR	DEF	EXC
C0	1348,3	1486,3	1226,6	259,6	116,2
C1	1307,1	1586,9	1264,6	322,3	59,5
C2	1336,9	1586,9	1264,6	322,3	79,6
C3	1366,7	1586,9	1264,6	322,3	99,8
C4	1314,2	1586,9	1259,4	327,5	59,5
C5	1331,6	1586,9	1259,4	327,5	79,6
C6	1361,4	1586,9	1259,4	327,5	99,8
C7	1342,1	1586,9	1269,7	317,2	79,6
C8	1307,1	1677,6	1298,7	378,9	34,1
C9	1336,9	1677,6	1298,7	378,9	54,2
C10	1366,7	1677,6	1298,7	378,9	74,4
C11	1314,2	1677,6	1293,5	384,1	34,1
C12	1331,6	1677,6	1293,5	384,1	54,2
C13	1361,4	1677,6	1293,5	384,1	74,4
C14	1342,1	1677,6	1303,9	373,7	54,2
C15	1307,1	1759,0	1324,7	434,3	12,6
C16	1336,9	1759,0	1327,2	431,8	32,4
C17	1366,7	1759,0	1327,2	431,8	52,6
C18	1314,2	1759,0	1321,6	437,4	12,6
C19	1331,6	1759,0	1321,9	437,1	32,4
C20	1361,4	1759,0	1321,9	437,1	52,6
C21	1342,1	1759,0	1332,4	426,6	32,4

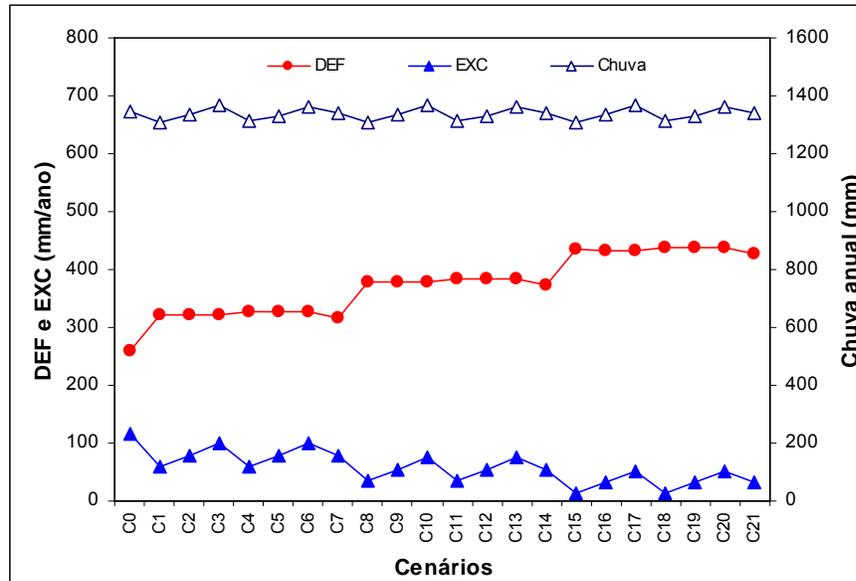


Figura 9 - Deficiência hídrica, excedente hídrico e chuva anuais para a condição atual (C0) e para os diferentes cenários de mudanças climáticas (C1 a C21), para o município de Piracicaba, SP

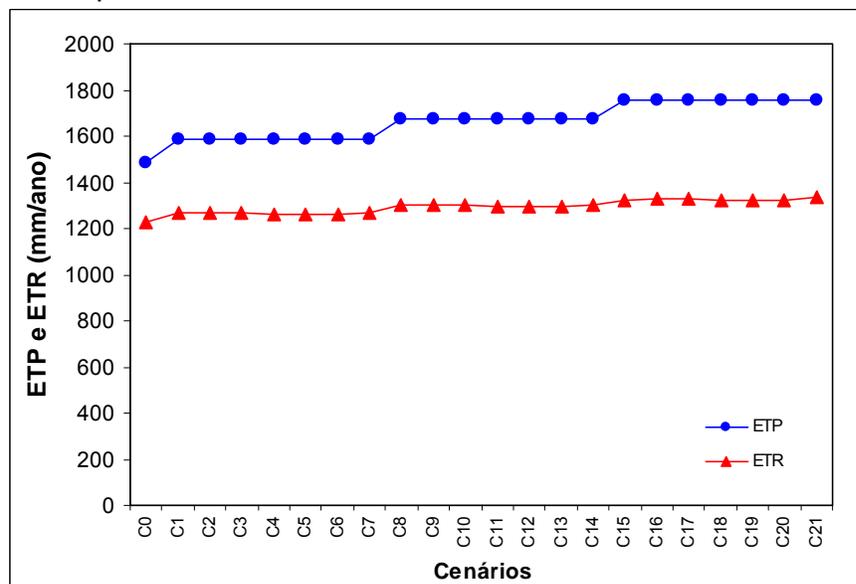


Figura 10 - Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) anuais para a condição atual (C0) e para os diferentes cenários de mudanças climáticas (C1 a C21), para o município de Piracicaba, SP

O extrato do balanço hídrico normal para a condição climática atual (C0) (Figura 11) mostra que há excedente hídrico nos três primeiros meses do ano, podendo chegar a 32 mm no primeiro decêndio de fevereiro e acumulando 116,2 mm no ano. Do primeiro decêndio de abril ao primeiro decêndio de novembro há deficiência hídrica, e esta é mais

acentuada nos meses de julho e agosto, acumulando 259,6 mm no ano. No final de novembro e no mês de dezembro não há déficit e nem excedente hídrico.

Ao analisar os extratos dos balanços hídricos normais para os cenários de mudanças climáticas adotados (Figuras 11 a 14), pode-se notar que, se comparados ao cenário atual (C0), há, em todos os casos, diminuição do excedente hídrico. Os casos mais críticos são para o C15 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, -5% de chuva no verão e no inverno, +1% de insolação no verão e +4,3% no inverno) e para o C18 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, -5% de chuva no verão e -10% no inverno, +1% de insolação no verão e +5,9% no inverno), que passariam a ter excedentes hídricos de apenas 12,5 mm no primeiro decêndio de fevereiro para as duas condições, acumulando somente 12,6 mm no ano. Os déficits hídricos tendem a aumentar quando comparados com o cenário atual (C0). Para o C15 e para o C17 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, +5% de chuva no verão e -5% no inverno, -6,5% de insolação no verão e +4,3% no inverno), o déficit hídrico pode chegar a 36,7 mm no primeiro decêndio de agosto, enquanto que para o C18, C19 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, -10% de chuva no inverno, +5,9% de insolação no inverno) e C20 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, +5% de chuva no verão e -10% no inverno, -6,5% de insolação no verão e +5,9% no inverno), o déficit hídrico pode chegar a 37 mm no primeiro decêndio de agosto. No C21 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, sem alteração na chuva e na insolação), o déficit hídrico pode chegar a 36,4 mm no primeiro decêndio do mês de agosto, sendo esses os cenários mais críticos (Figuras 11 a 14). Em termos de totais anuais (Tabela 9), esses cenários terão deficiências hídricas variando de 426 a 438 mm.

4.2 Impacto das mudanças climáticas na produtividade da cana-de-açúcar em Piracicaba, SP

A produtividade potencial é determinada pela radiação solar, temperatura, fotoperíodo e pelas características da cultura. Assim, o aumento da temperatura acarretará um aumento da produtividade potencial, já que essa variável afeta a eficiência do processo fotossintético, representada, no modelo empregado neste estudo, pelos coeficientes cTc e cTn . Isso é confirmado pela análise feita por Melo et al. (2007) para a

estimativa da produtividade potencial da cana-de-açúcar, utilizando um cenário de mudanças climáticas proposto pelo IPCC (2007) para o município de Barretos, SP. Segundo os autores, a produção de matéria seca aumentaria com o passar dos anos e haveria uma maior fixação de carbono pela planta, refletida pelo aumento da produção de biomassa total (raízes, colmo e folhas). Essas mudanças climáticas proporcionariam alteração no balanço de carbono da cultura da cana-de-açúcar, pois esta retira mais CO₂ da atmosfera, fixando-o em maior proporção.

Resultados similares foram obtidos por Souza (2007) que estudou o efeito do aumento de CO₂ atmosférico sobre o crescimento, desenvolvimento e metabolismo de carboidratos da cana-de-açúcar, visando a avaliar o potencial de seqüestro de carbono e o impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade da cultura. A autora observou que, após 50 semanas de cultivo em CO₂ elevado, houve um maior acúmulo de sacarose no colmo que, juntamente com o incremento de biomassa observado no órgão, configurou uma maior produtividade das plantas.

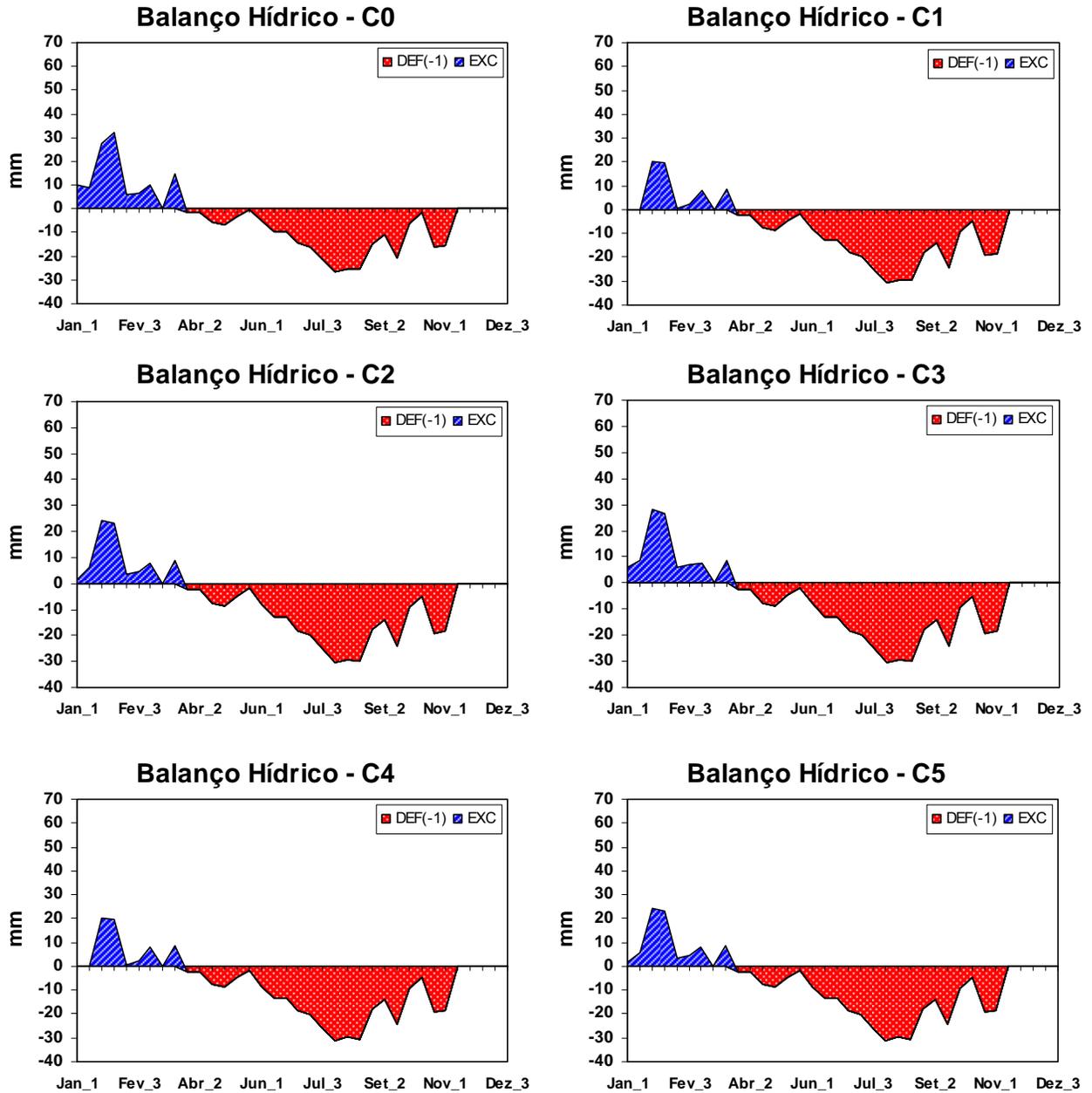


Figura 11 - Extrato do balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, dos cenários C0, C1, C2, C3, C4 e C5

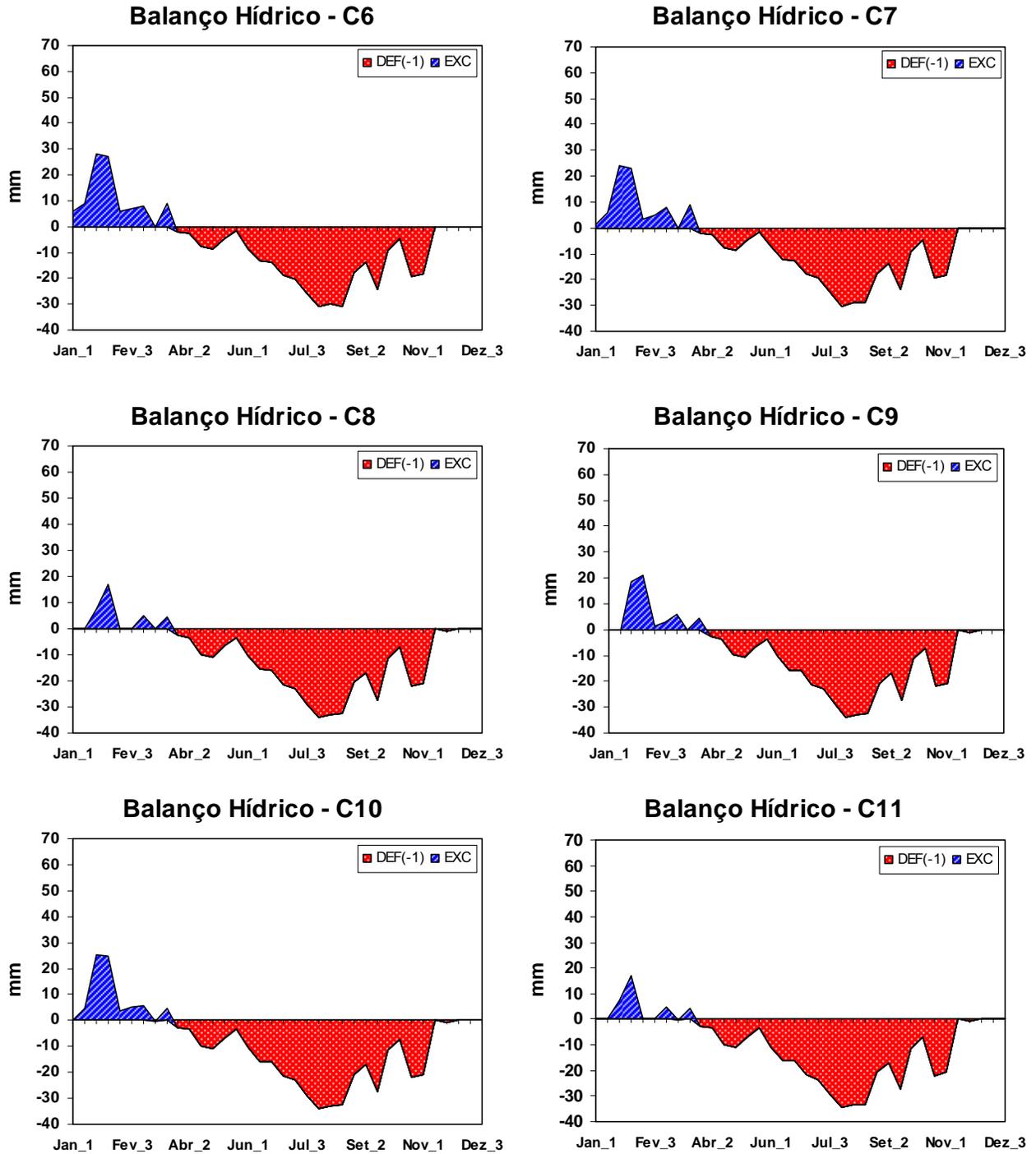


Figura 12 - Extrato do balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, dos cenários C6, C7, C8, C9, C10 e C11

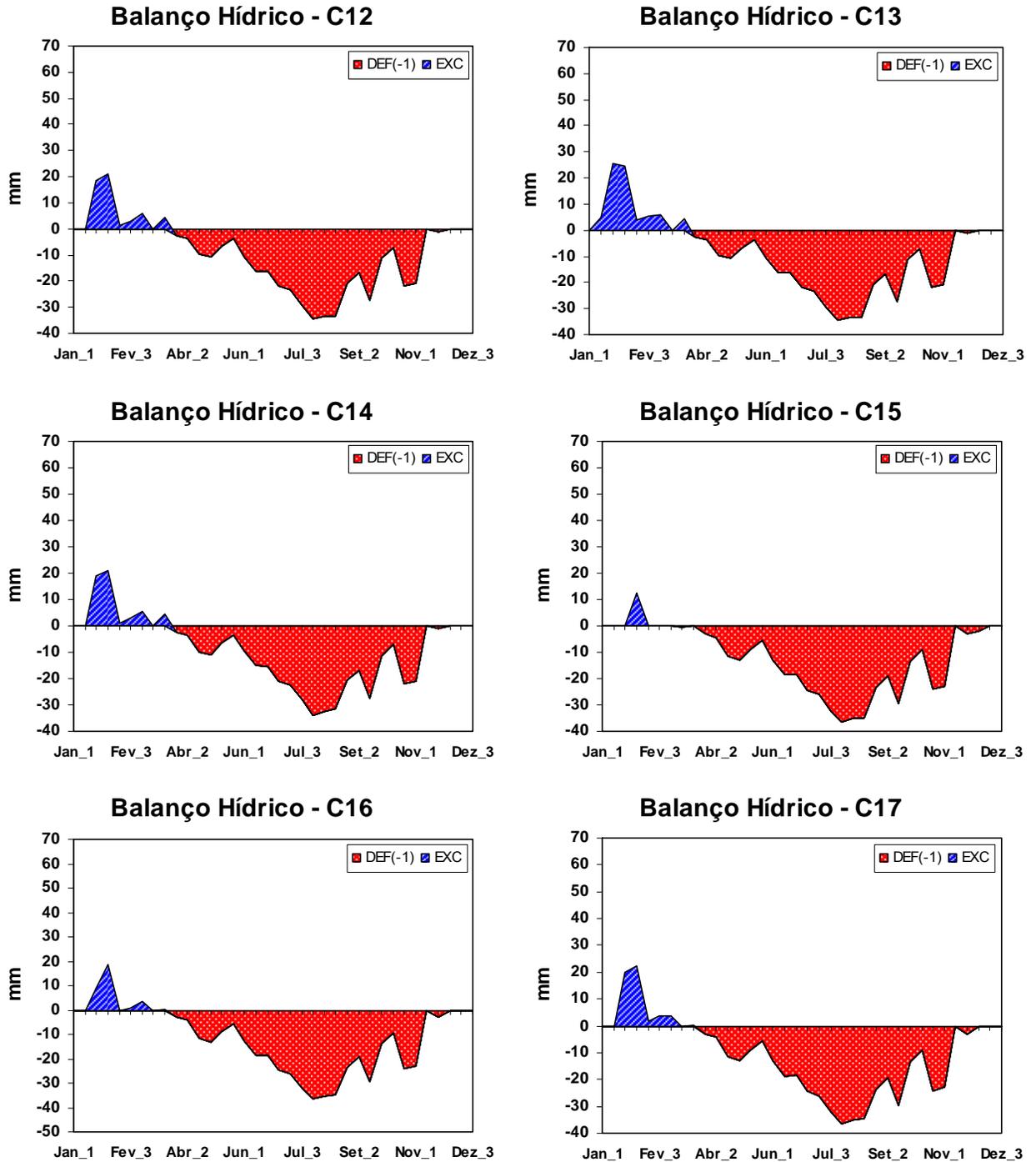


Figura 13 - Extrato do balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, dos cenários C12, C13, C14, C15, C16 e C17

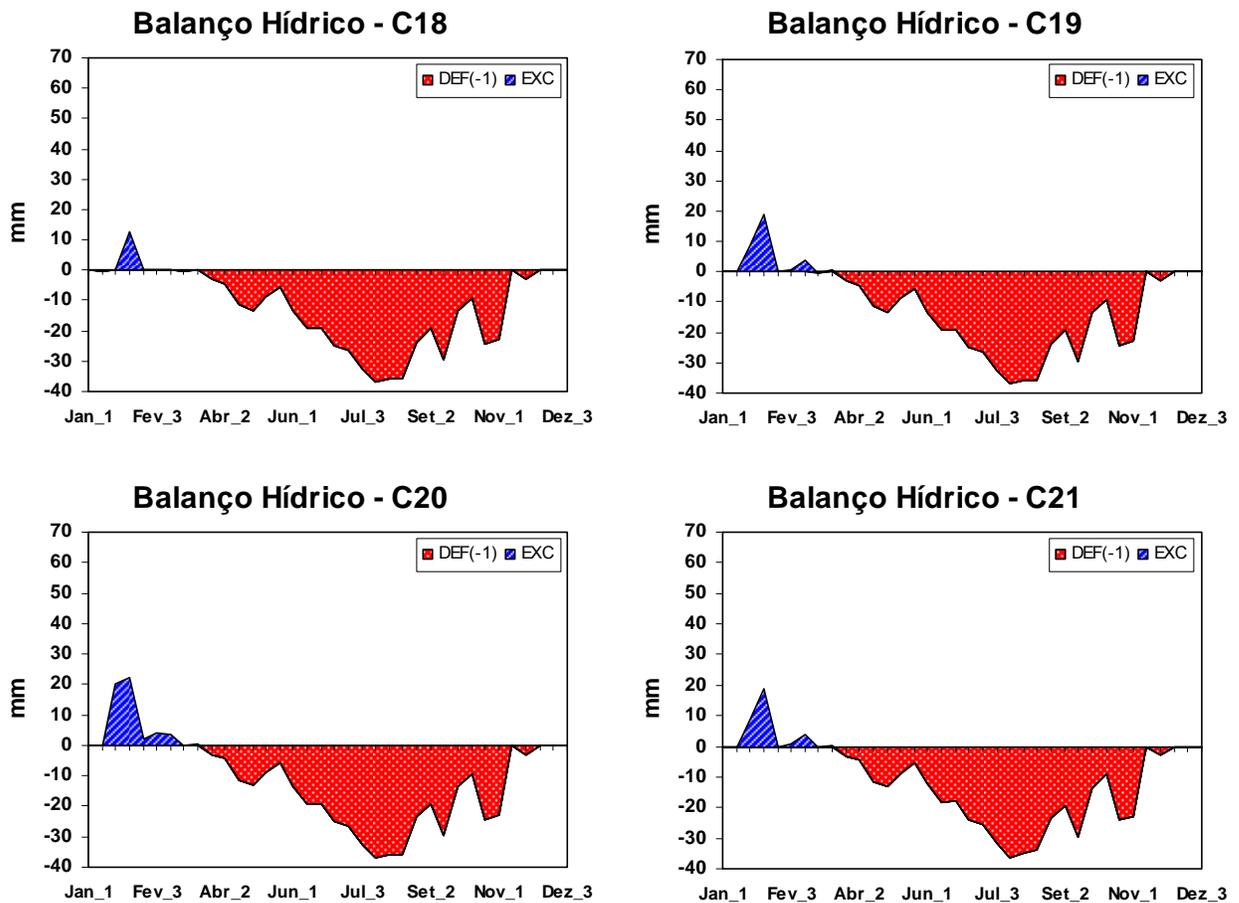


Figura 14 - Extrato do balanço hídrico climatológico normal de Piracicaba, SP, dos cenários C18, C19, C20 e C21

Wand et al. (1999) observaram que o aumento de até 60% na taxa fotossintética da cana-de-açúcar cultivada em elevada concentração de CO_2 é maior do que a média geralmente encontrada para as plantas C_4 , que é de aproximadamente 25%. Esse fato demonstra que a cultura da cana-de-açúcar tem um alto potencial de produção em ambientes enriquecidos com CO_2 .

Ao analisar os resultados das produtividades potenciais para cada corte da cana-de-açúcar (Figura 15), nota-se que a produtividade potencial aumenta quando comparada ao cenário atual (C_0). Para esse cenário (C_0), a produtividade potencial da cana planta chega a 148 TCH, enquanto que para a cana soca esse potencial é de 112 TCH para a de ciclo precoce, de 97 TCH para a de ciclo médio e de 116 TCH para a de ciclo tardio. Considerando-se os cenários de mudanças climáticas, a produtividade

potencial da cana planta pode chegar próximo de 212 TCH para o C19 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, -10% de chuva no inverno, +5,9% de insolação no inverno, acréscimo 10% na produtividade pelo aumento na concentração de CO₂ e +31,82 TCH decorrente dos avanços tecnológicos). Para a cana soca precoce, a produtividade potencial pode chegar a 164 TCH nas condições do C18 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, -5% de chuva no verão e -10% no inverno, +1% de insolação no verão e +5,9% no inverno, acréscimo 10% na produtividade pelo aumento na concentração de CO₂ e +31,82 TCH decorrente dos avanços tecnológicos). A produtividade potencial da cana soca média pode chegar próximo de 147 TCH para o C19. Finalmente, a produtividade potencial da cana soca tardia pode chegar a 169 TCH no C18 e no C19, como mostra a Figura 15.

Streck (2005) considera que o acréscimo de temperatura causado pelo aumento de CO₂ tende a encurtar o ciclo de crescimento e desenvolvimento de algumas espécies C4, o que pode anular as vantagens da fertilização pelo aumento da concentração de CO₂. Isso provavelmente irá ocorrer com as culturas anuais, que tem seu ciclo de desenvolvimento controlado pela temperatura do ambiente (conceito dos graus-dia). No caso da cultura da cana-de-açúcar, isso pode ser administrado pelo próprio produtor deixando a cana-de-açúcar por mais tempo no campo, sem ocasionar perdas significativas de produtividade, já que a cana-de-açúcar tem a duração do período de crescimento vegetativo bastante variável.

De um modo geral, os benefícios causados pelos cenários de mudanças climáticas e pelo avanço tecnológico na produtividade potencial são mais pronunciados na cana planta, com um incremento de produtividade da ordem de 64 TCH. Os incrementos de produtividade potencial nas canas socas são da ordem de 50 TCH.

Com relação às produtividades reais, nas quais o efeito do déficit hídrico sobre a produtividade potencial é considerado, observa-se padrão semelhante de variação dos valores obtidos em relação à produtividade potencial (Figura 16).

Considerando as condições climáticas atuais (C0), a produtividade real é da ordem de 110 TCH para a cana planta, de 83 TCH para a cana soca precoce, de 74 TCH para a cana soca média e 73 TCH para a cana soca tardia.

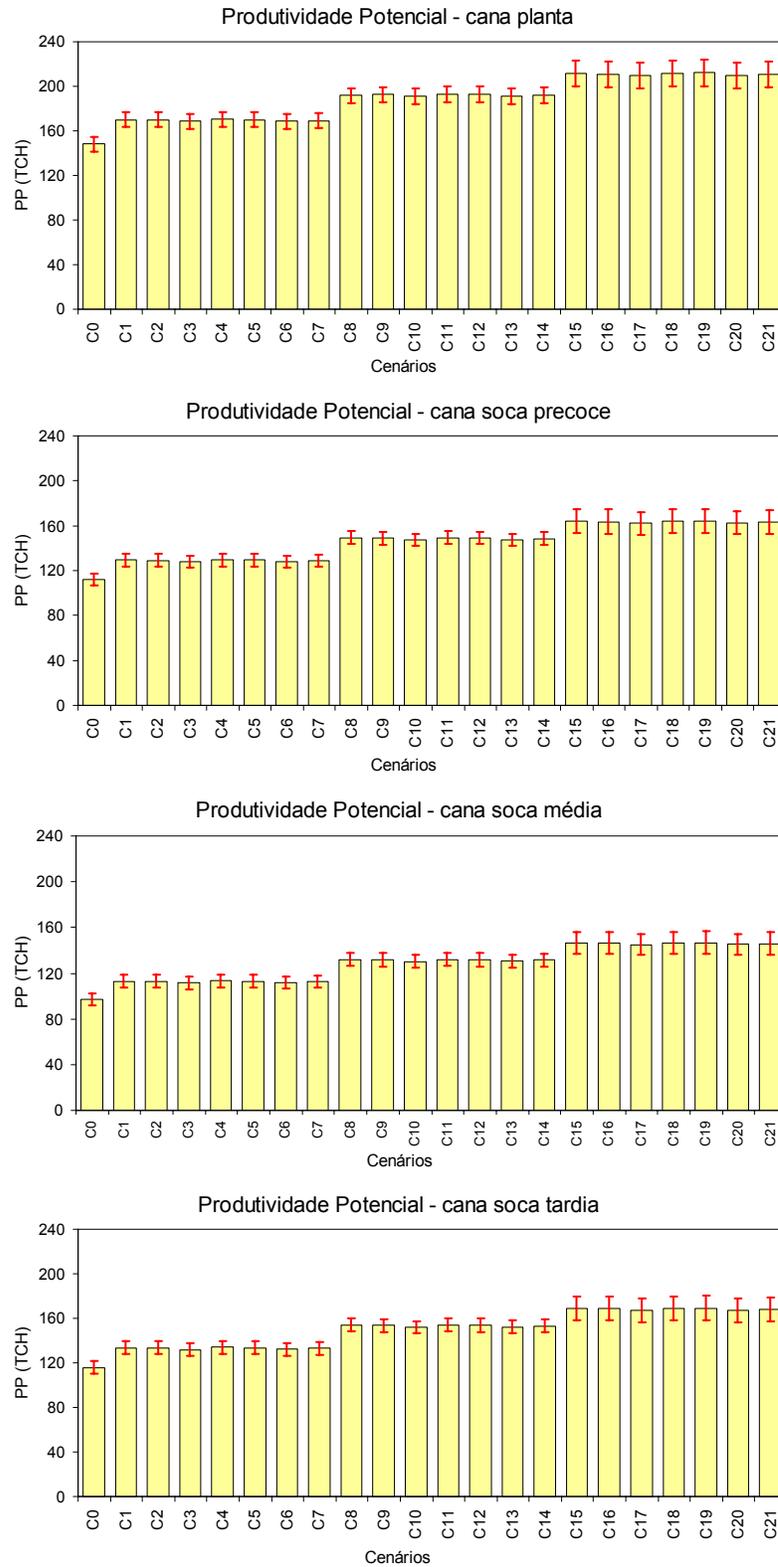


Figura 15 - Produtividade potencial para a cana planta e para as canas socas (precoce, média e tardia) nas condições atuais e nos diferentes cenários de mudanças climáticas, em Piracicaba, SP. A barra vermelha representa o desvio padrão

Ao analisar os cenários de mudanças climáticas, nota-se que a produtividade real tende a aumentar, basicamente, devido ao acréscimo de temperatura, de CO₂ e ao avanço tecnológico, apesar do aumento dos déficits hídricos, mesmo nos cenários onde as chuvas aumentaram. Além disso, observa-se que o aumento das chuvas resulta em redução na insolação, ou seja, na disponibilidade de energia radiante e, assim, há diminuição na produtividade potencial e, conseqüentemente, na produtividade real (Figuras 15 e 16), conforme mencionado por Landel (2007).

A variação da resposta entre os diferentes tipos de cana (cana planta, cana soca precoce, cana soca média e cana soca tardia) deve-se ao fato de que essas permanecem no campo em diferentes períodos do ano. A cana planta tem um ciclo médio de 15 meses, sendo plantada entre fevereiro e março do ano 1 e colhida por volta de maio do ano 2. A cana soca precoce tem ciclo médio de 12 meses, compreendido entre abril/maio do ano 1 e abril/maio do ano 2. Já a cana soca média, que também tem ciclo de 12 meses, permanece no campo entre junho/julho/agosto do ano 1 e o mesmo período do ano 2. Finalmente, a cana soca tardia tem seu ciclo iniciado entre setembro e outubro do ano 1, sendo a colheita realizada nesses mesmos meses do ano 2. Essa distribuição garante a continuidade da colheita durante toda a safra, que vai, em média, de abril a outubro. Essas diferenças no ciclo levam a cultura a experimentar diversas condições de clima, ou seja, temperatura, radiação solar, fotoperíodo e deficiência hídrica, o que resulta em diferentes níveis de produtividade potencial e real.

O impacto das mudanças climáticas na produtividade real é apresentado na Figura 16. Observa-se, de um modo geral, que a variação das produtividades reais nos diferentes cenários obedece ao mesmo padrão das produtividades potenciais de cada tipo de cana. Para a cana planta, o incremento máximo de produtividade real ocorre para o C19, com um 155,9 TCH, representando um aumento de mais de 45 TCH. Para as canas socas, os cenários de maiores produtividades são variáveis. Para a cana soca precoce, a produtividade real no C21 é de 122 TCH (incremento de 39,4 TCH). Para a cana soca média, o cenário de maior produtividade real é o C16, com 112,6 TCH (incremento de 38,4 TCH), ao passo que para a cana soca tardia a maior produtividade (109,3 TCH) é obtida também para o C21, com um incremento de 36,3 TCH.

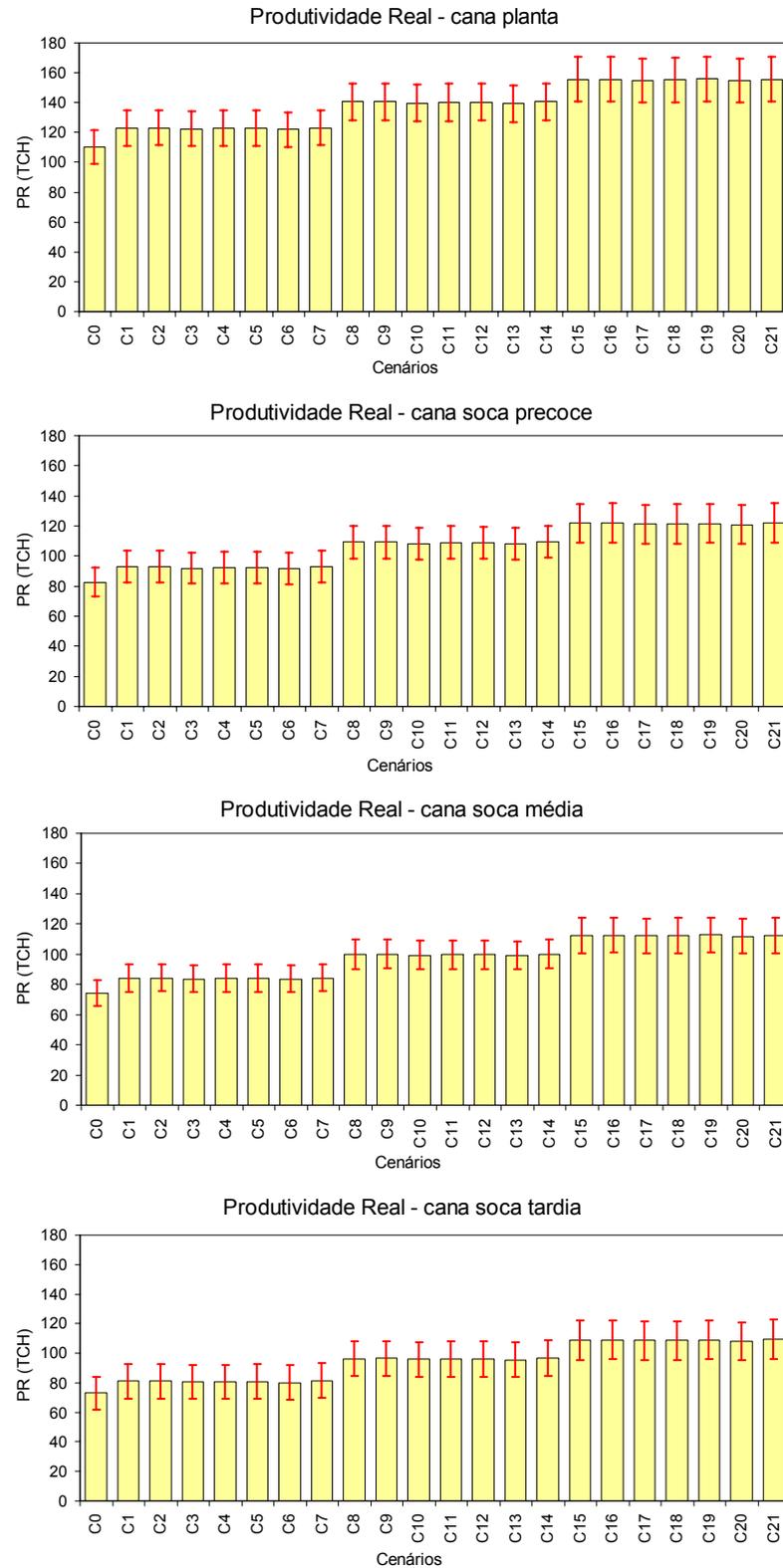


Figura 16 - Produtividade real para a cana planta e para as canas socas (precoce, média e tardia) nas condições atuais e nos diferentes cenários de mudanças climáticas, em Piracicaba, SP. A barra vermelha representa o desvio padrão

Ao analisar a variabilidade interanual da deficiência hídrica e das produtividades potencial e real ponderadas, ao longo de uma série histórica de 80 anos (Figuras 17 a 27), observa-se que, no cenário atual – C0 (Figura 17), a produtividade potencial da cana-de-açúcar oscilou entre 100 e 136 TCH, considerando o período de 1927 a 2006. A deficiência hídrica foi bastante variável, com valores próximos de 180 mm em 1983 e 731 mm em 1964 e a produtividade real foi entre 62 e 91 TCH. Observa-se que a produtividade real acompanha a tendência da produtividade potencial. Se a produtividade potencial aumentar ou diminuir, a produtividade real acompanhará essa tendência, desde que o déficit hídrico seja o mesmo. Se o déficit hídrico aumentar ou diminuir, o resultado da produtividade real integrará os efeitos das variáveis que condicionam a produtividade potencial, bem como o déficit hídrico.

No C1 (ano de 2020, acréscimo de 1°C na temperatura, -5% de chuva no verão e -5% no inverno, +1% de insolação no verão e +5,9% no inverno, acréscimo 10% na produtividade pelo aumento na concentração de CO₂ e +31,82 TCH decorrente dos avanços tecnológicos), apresentado na Figura 17, houve aumento na produtividade potencial decorrente do aumento de temperatura, atingindo valores entre 113 e 149 TCH. A deficiência hídrica variou de 228 mm em 1983 e 854 mm em 1964. Por causa desse aumento do déficit hídrico, a produtividade real não aumentou tanto quanto a produtividade potencial e ficou entre 63 e 100 TCH. Para os demais cenários, houve incrementos constantes nas produtividades potencial e real, em decorrência do aumento da temperatura e do avanço tecnológico. No caso da produtividade real, mesmo com o aumento das deficiências hídricas, houve incremento dos rendimentos. O cenário que expressa a condição de maior deficiência hídrica é o C18 (ano de 2080, acréscimo de 4°C na temperatura, -5% de chuva no verão e -10% no inverno, +1% de insolação no verão e +5,9% no inverno, acréscimo 10% na produtividade pelo aumento na concentração de CO₂ e +31,82 TCH decorrente dos avanços tecnológicos), apresentado na Figura 26, a produtividade potencial variou entre 147 TCH em 1984 e 204 TCH em 1988 e a produtividade real ficou entre 89 TCH e 150 TCH nesses mesmos anos.

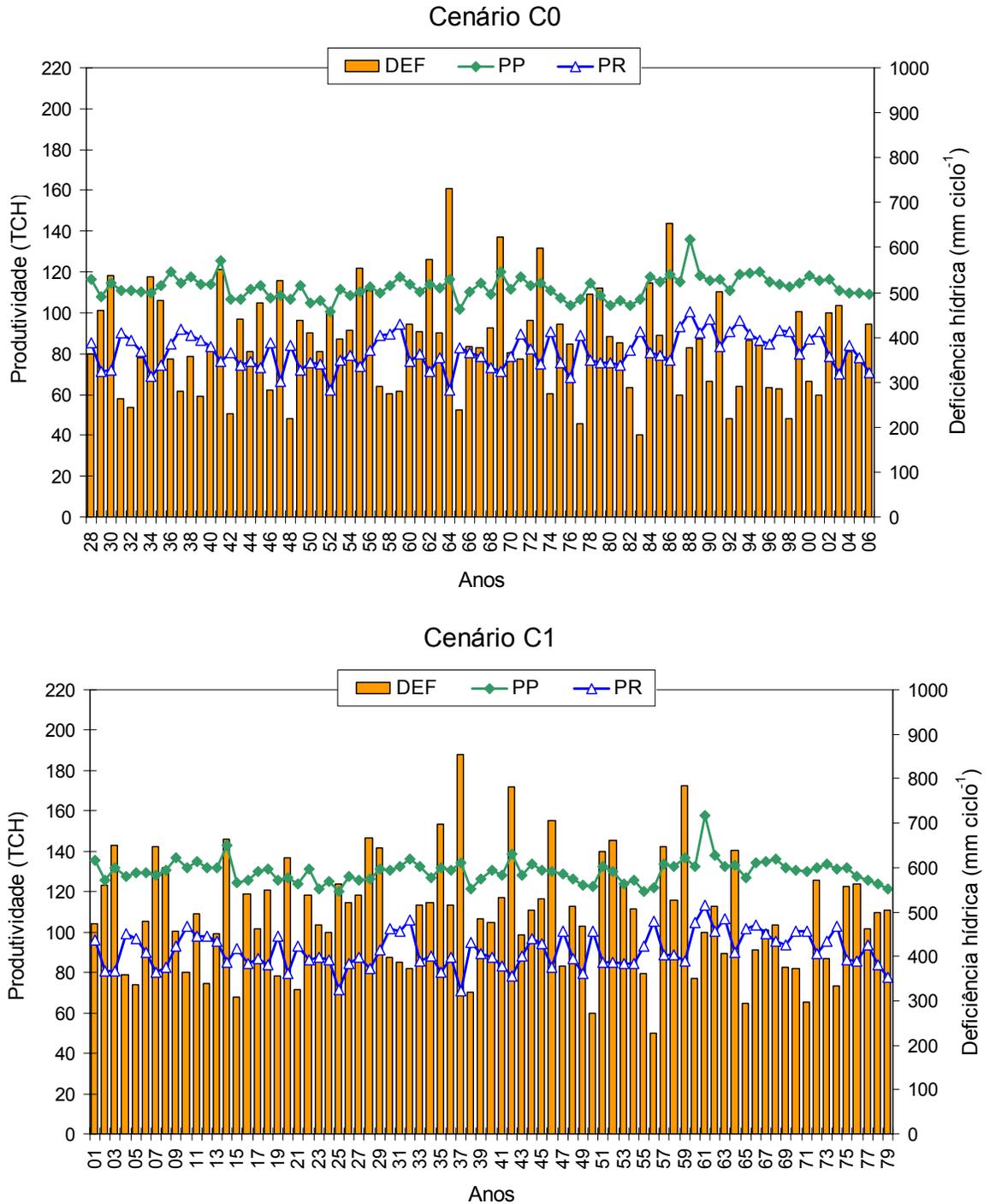


Figura 17 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C0 e C1. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

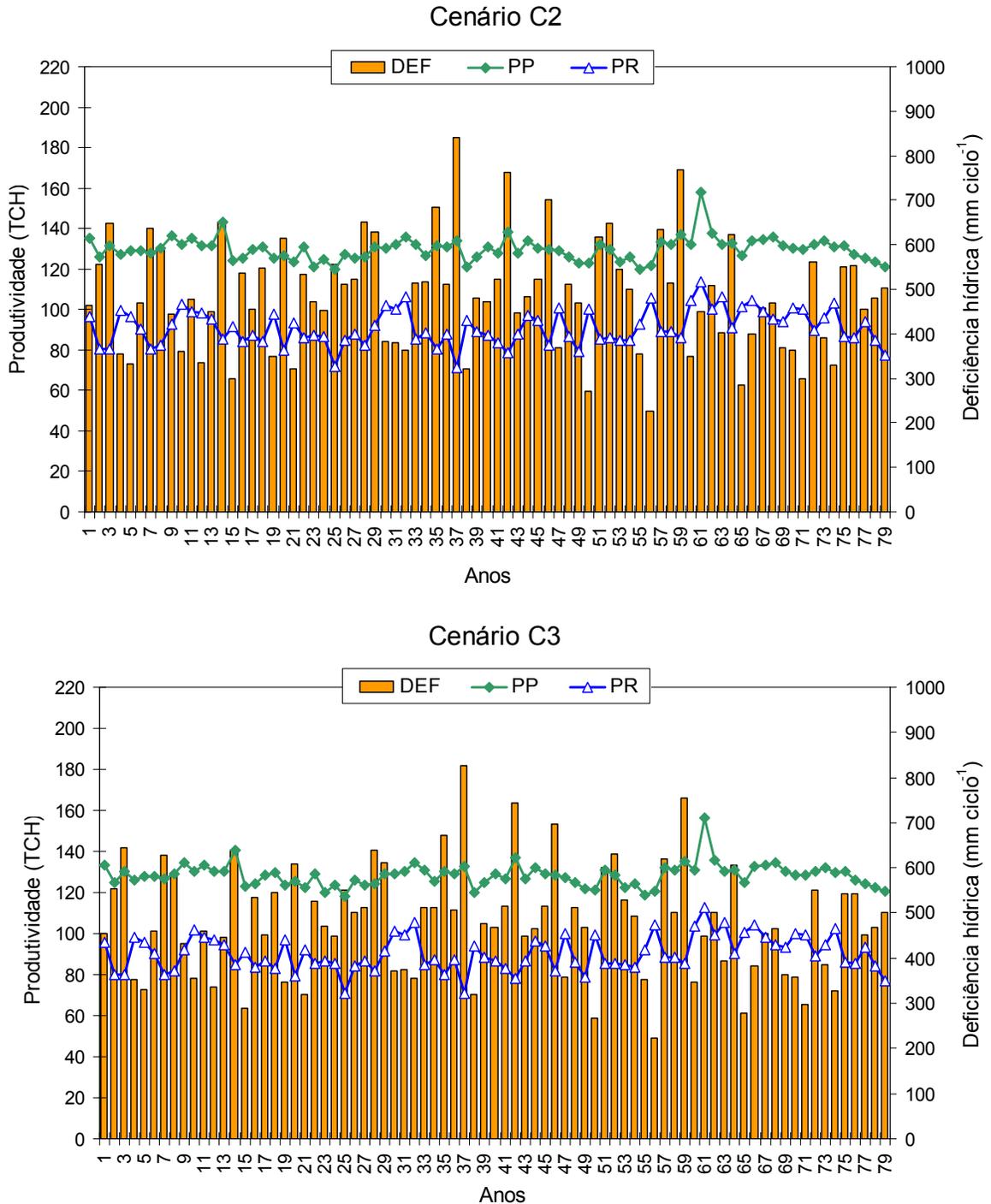


Figura 18 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C2 e C3. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

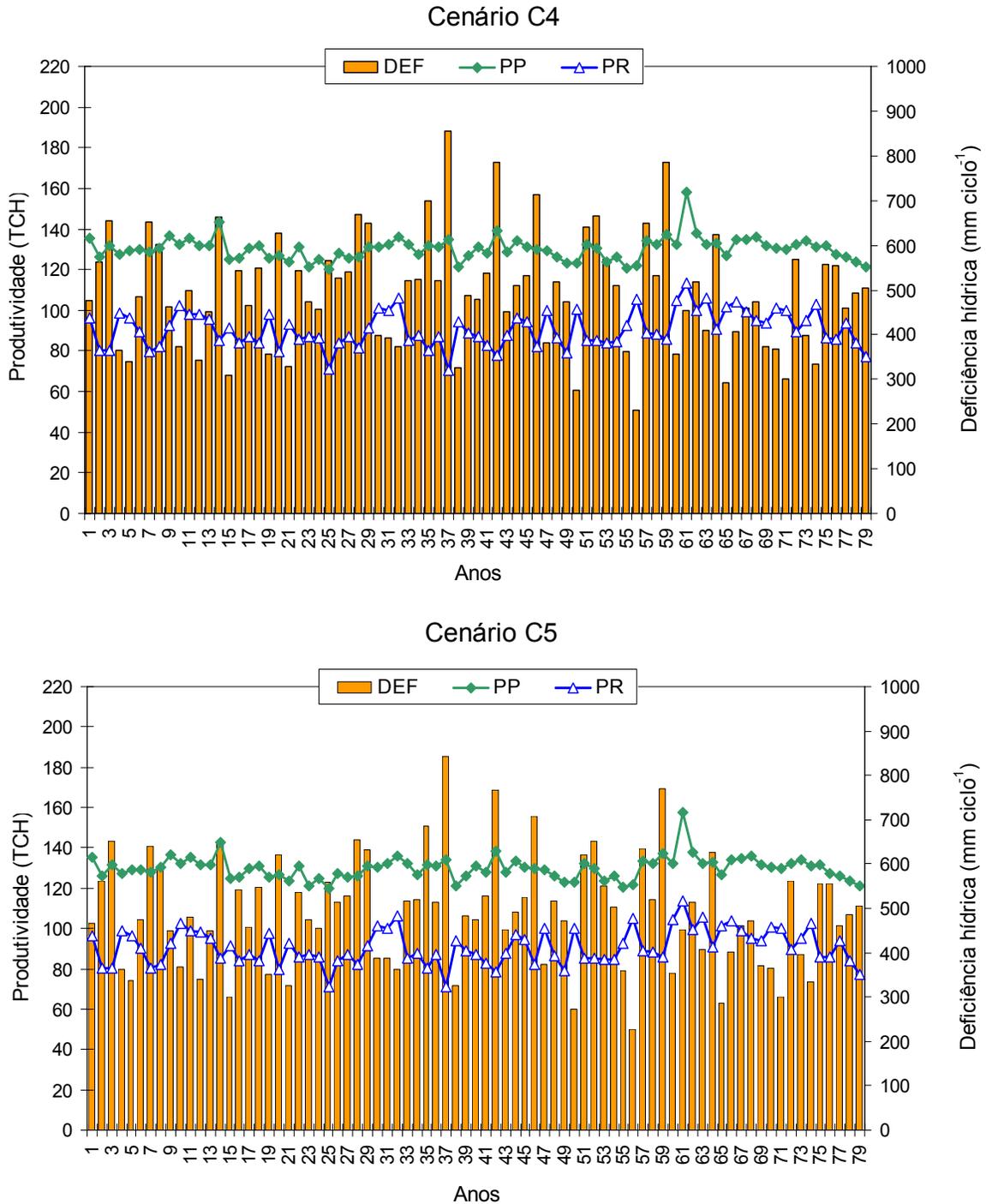


Figura 19 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C4 e C5. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

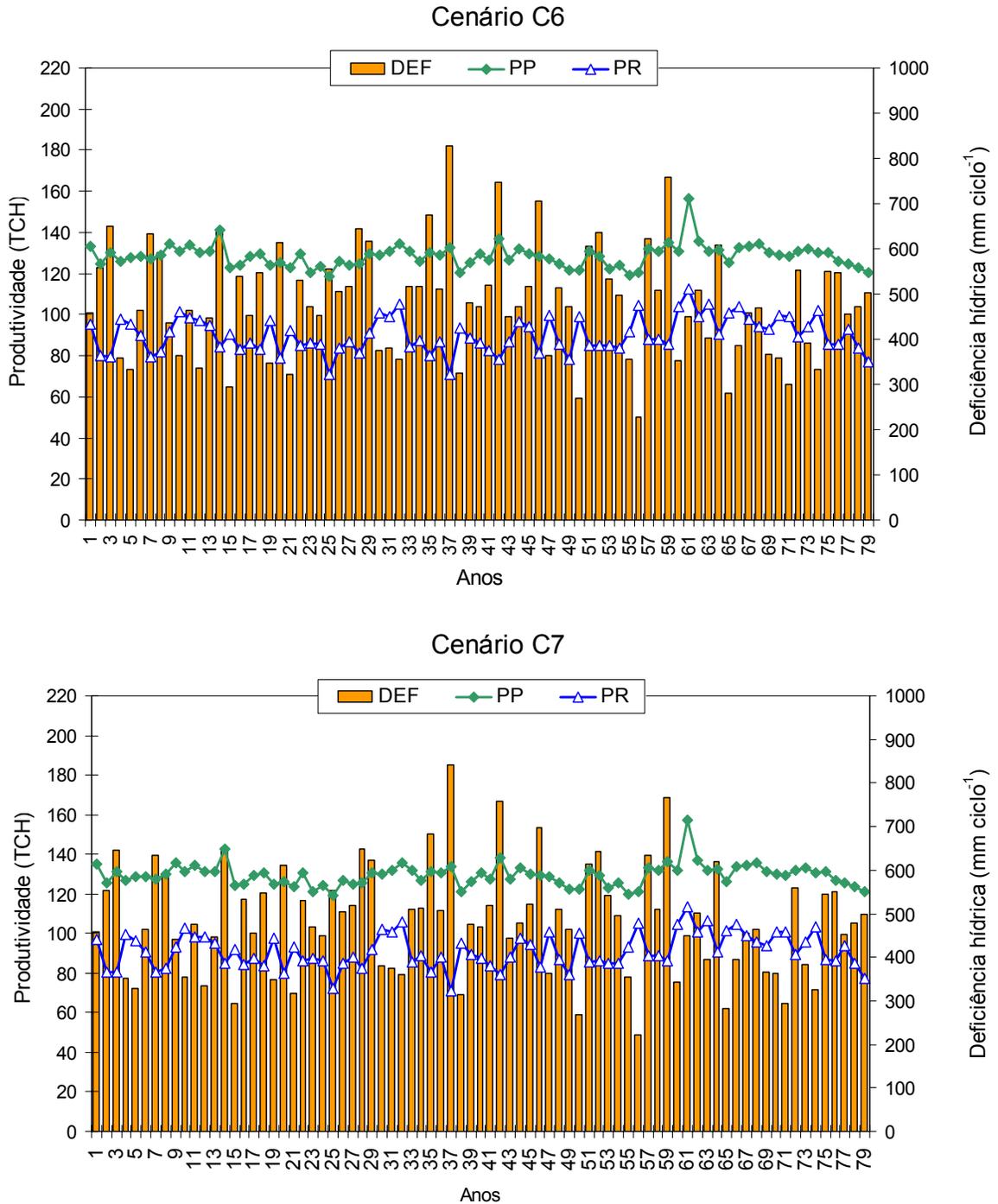


Figura 20 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C6 e C7. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

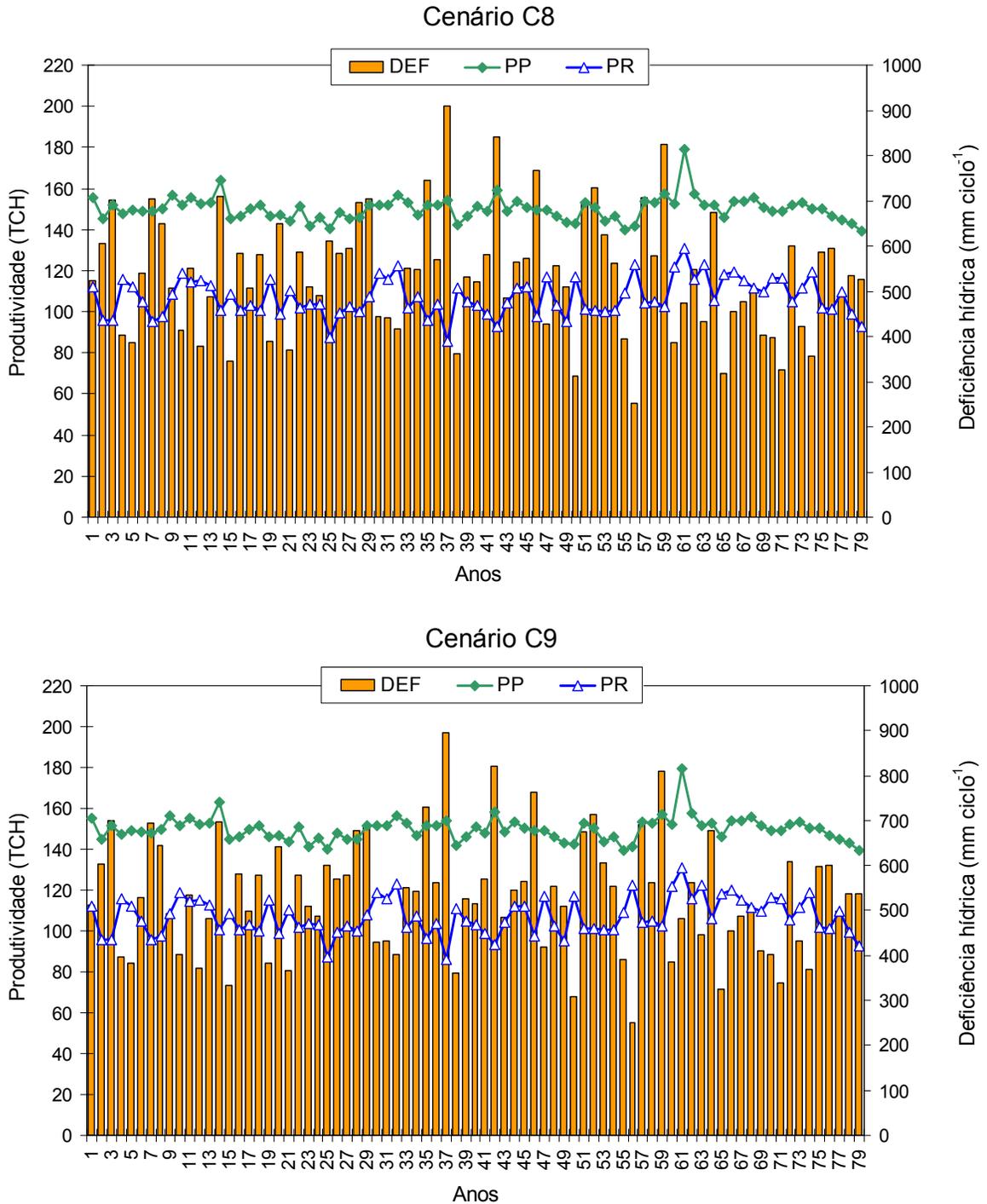


Figura 21 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C8 e C9. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

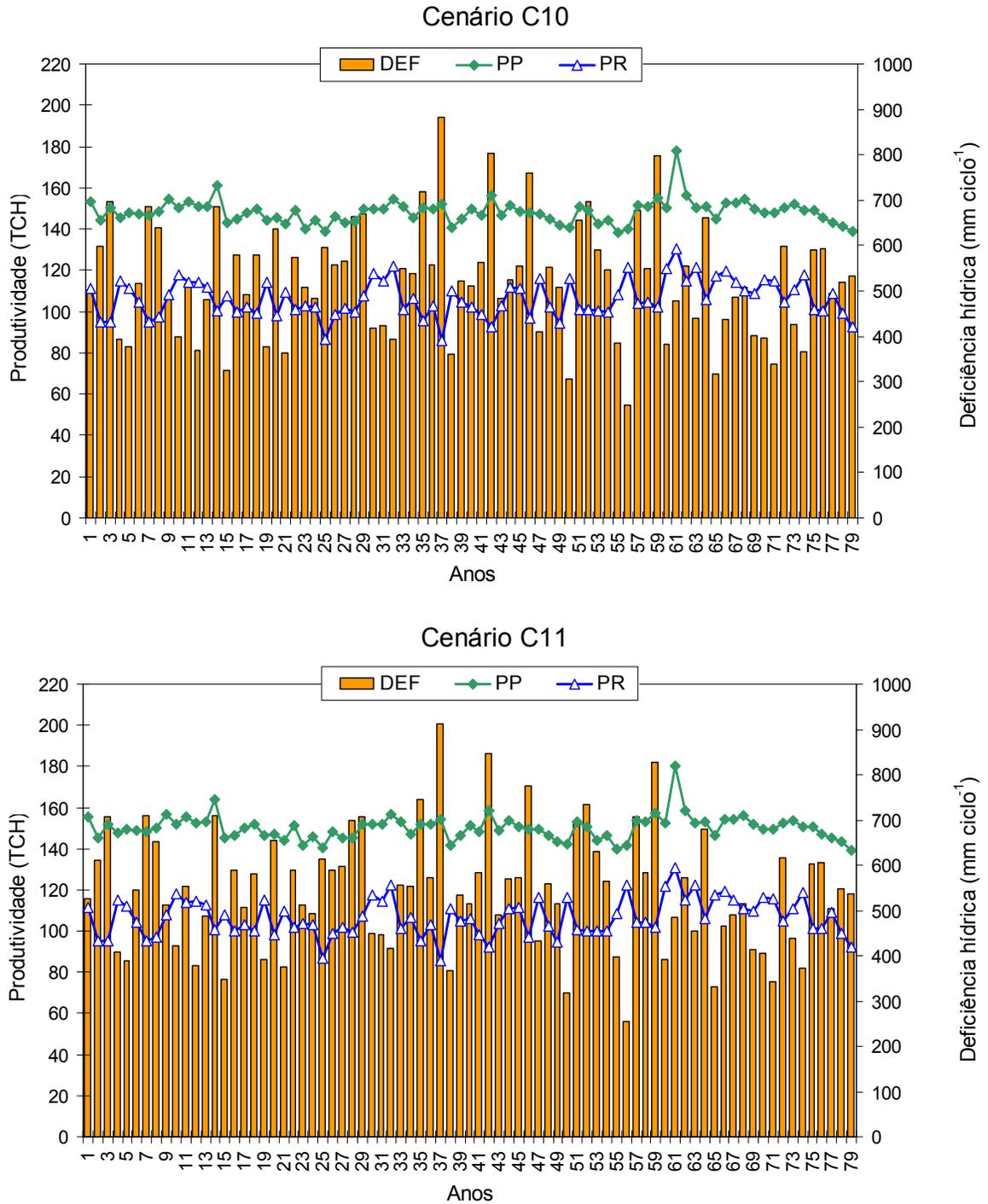


Figura 22 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C10 e C11. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

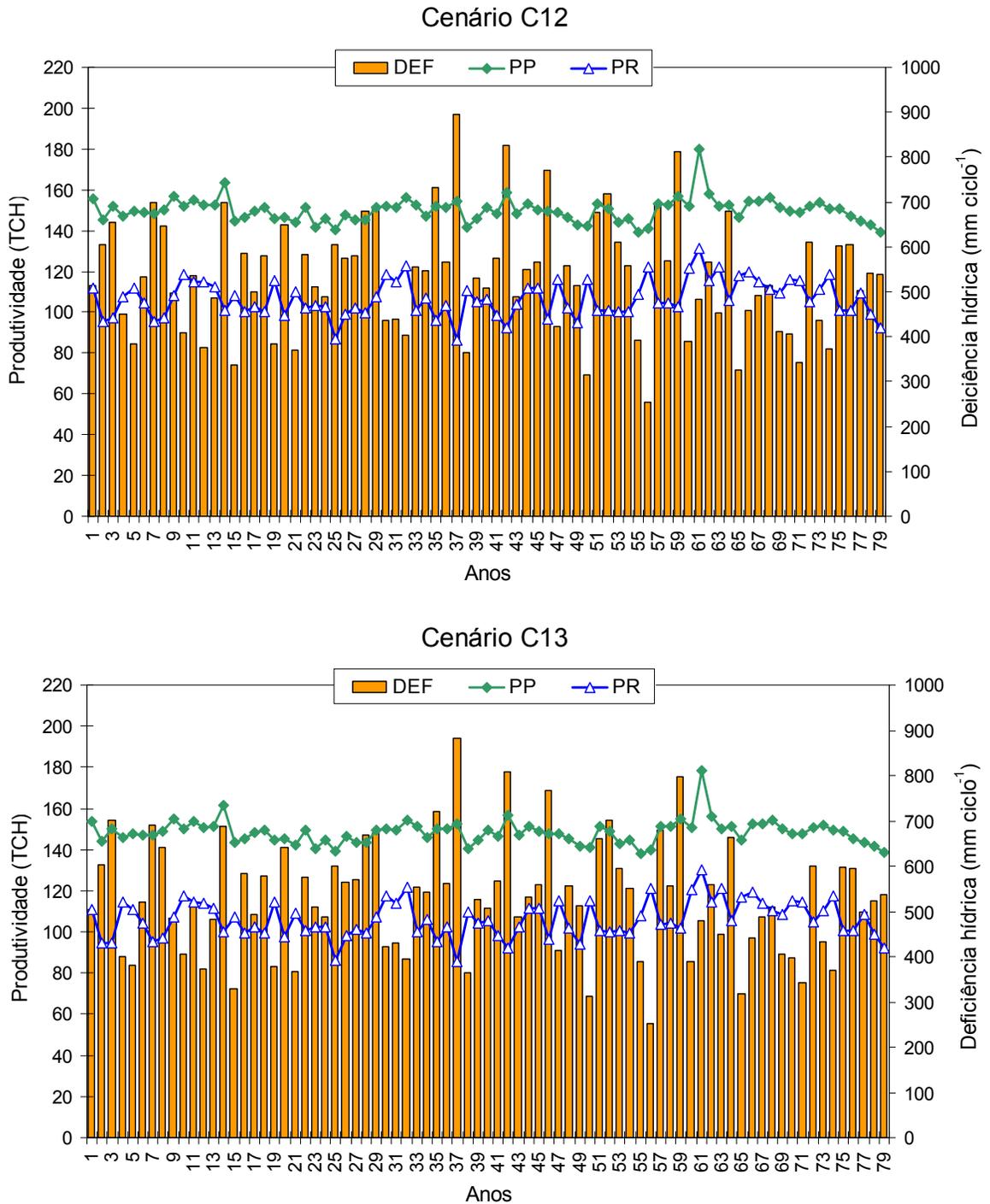


Figura 23 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C12 e C13. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

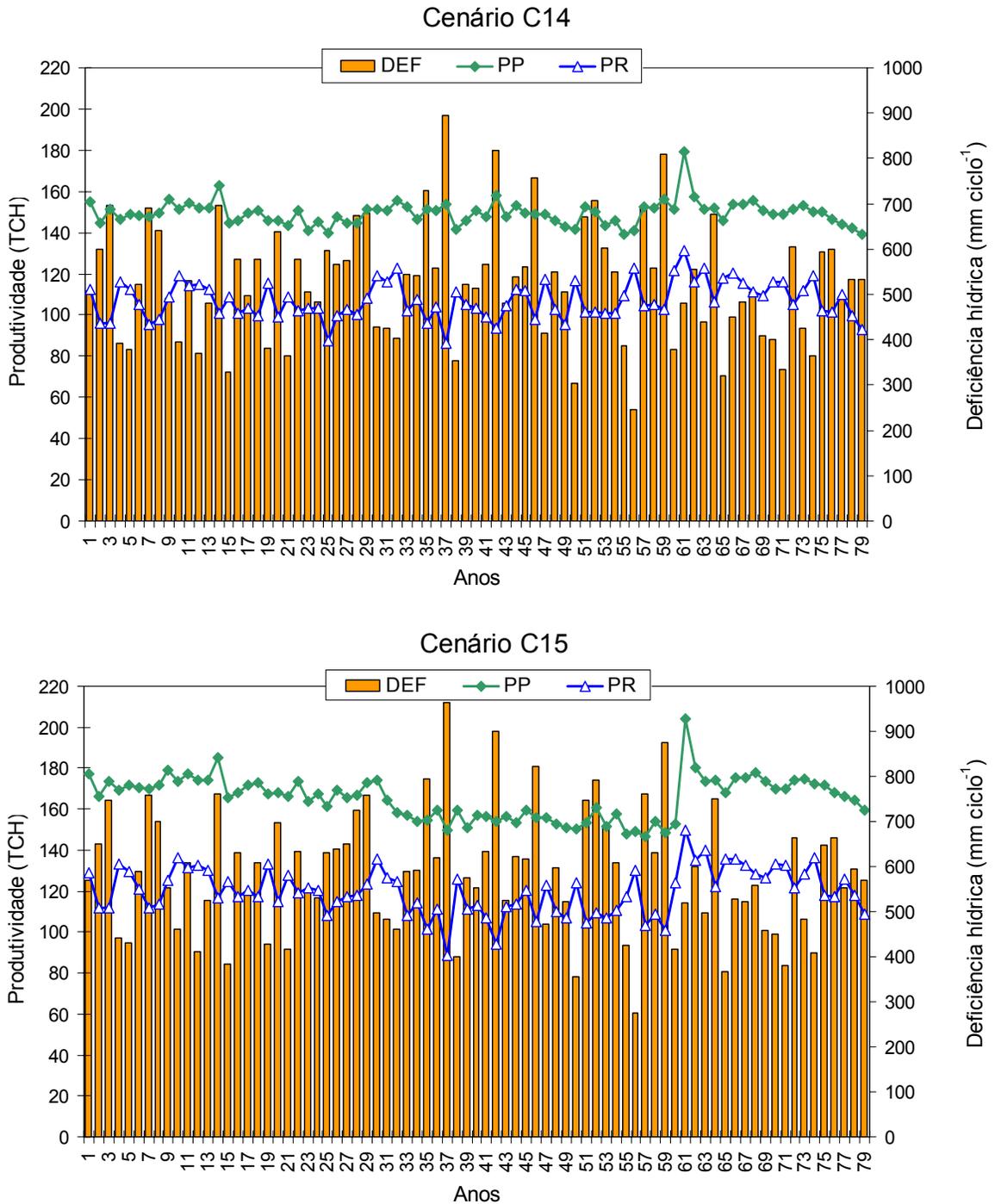


Figura 24 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C14 e C15. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

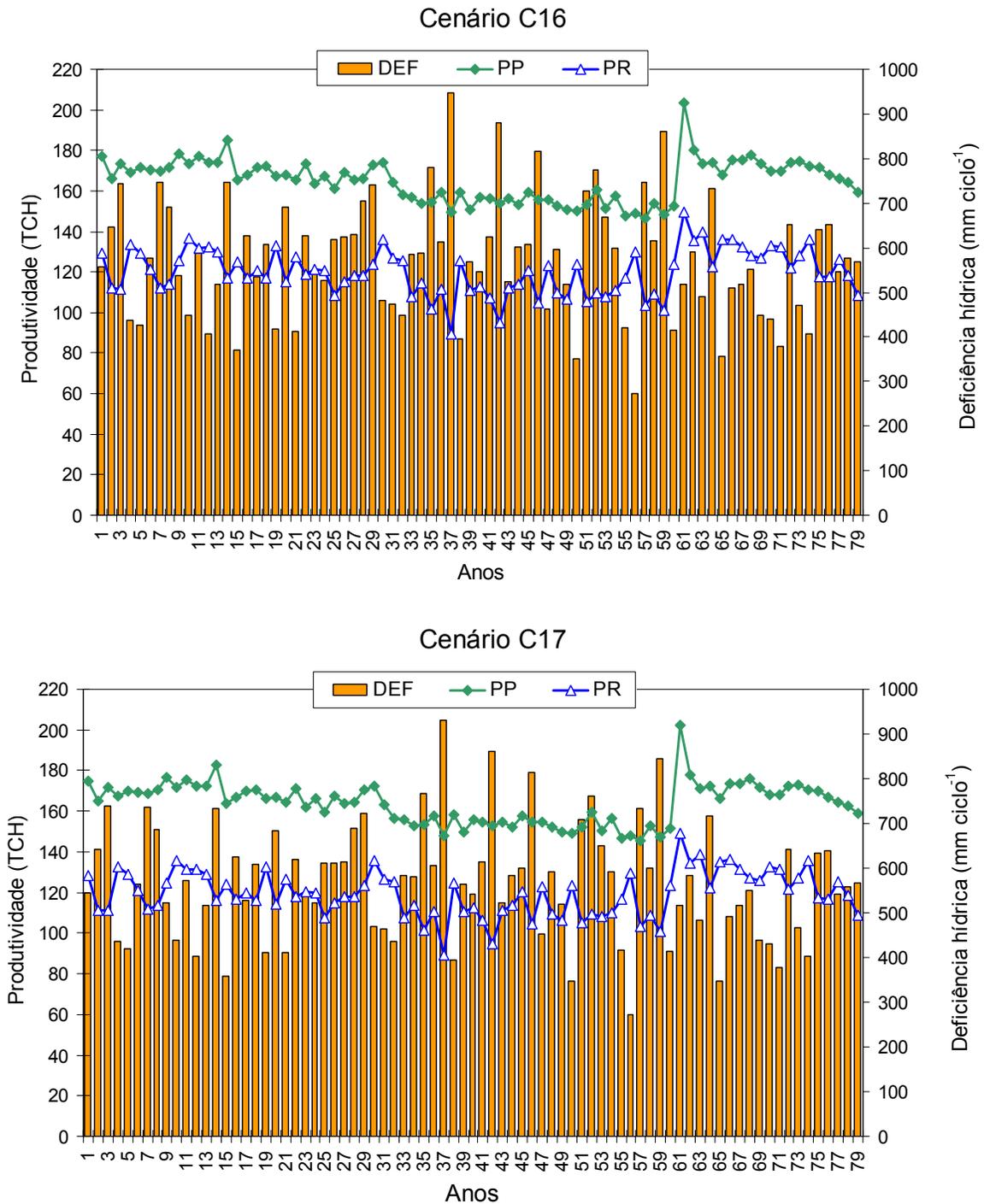


Figura 25 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C16 e C17. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

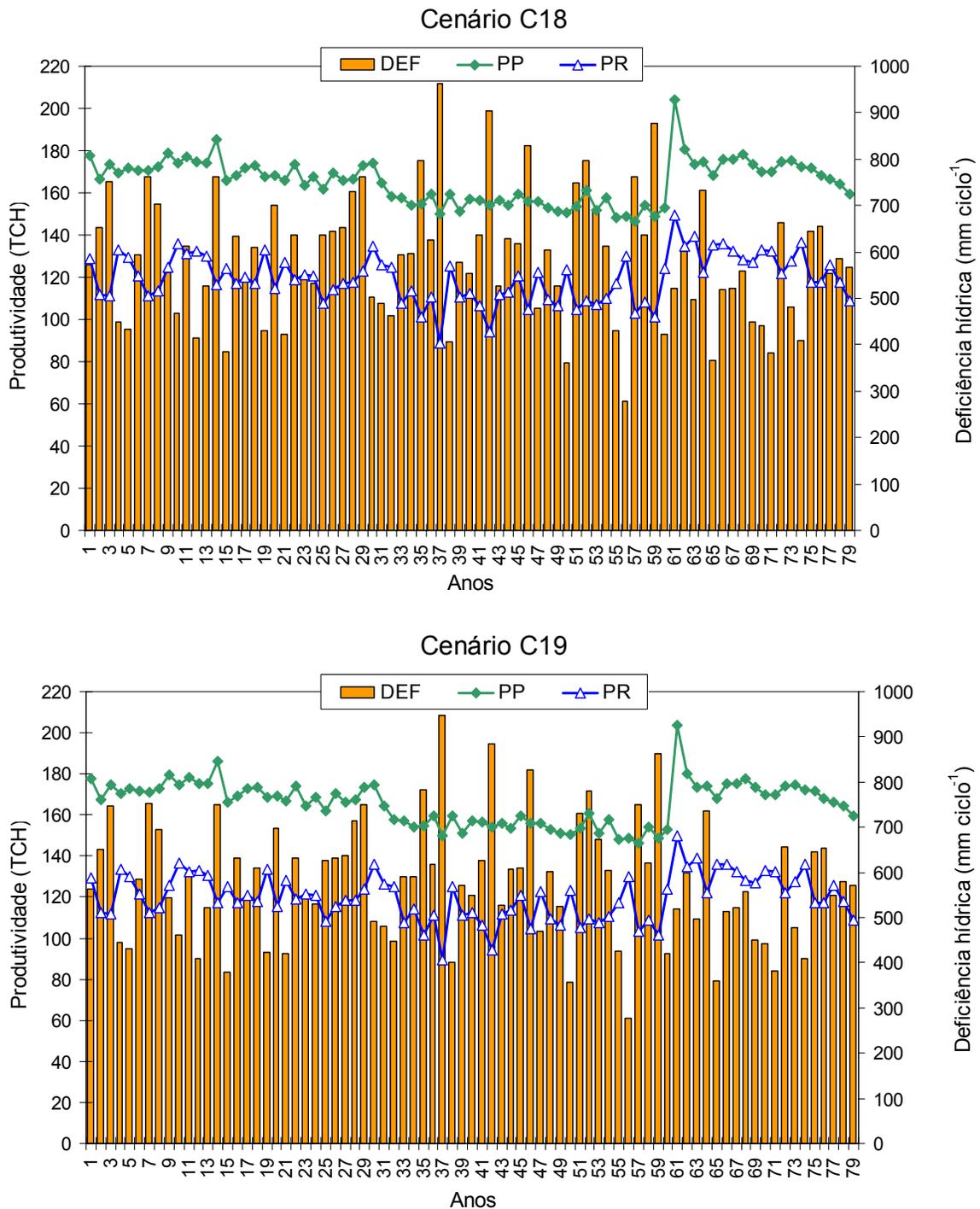


Figura 26 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C18 e C19. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

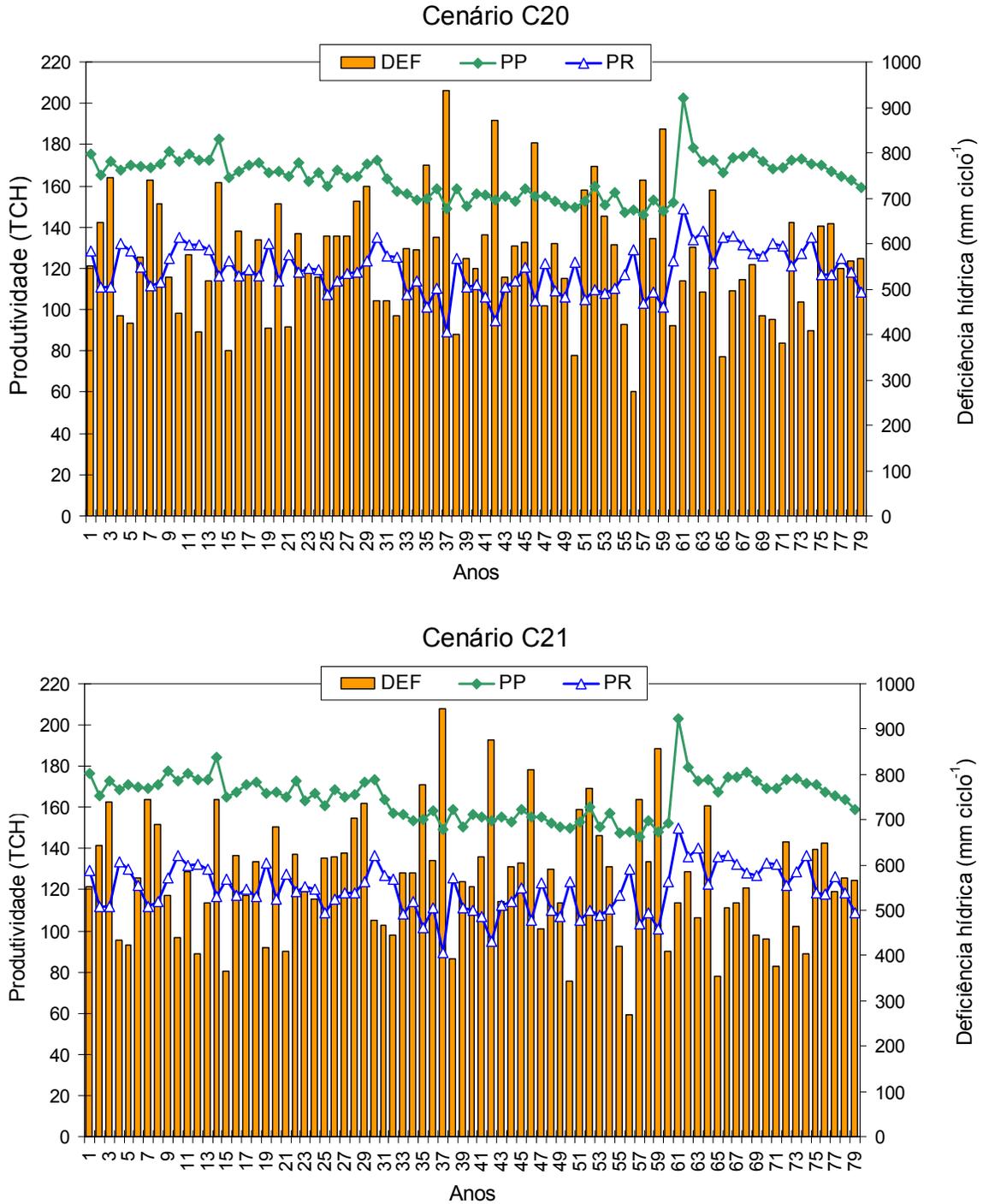


Figura 27 - Dados de produtividade potencial, real e deficiência hídrica para os cenários C20 e C21. As produtividades potencial e real foram ponderadas, levando em consideração que a cana planta é plantada em 15% da área total, a cana soca precoce é plantada em 20% da área total, a cana soca média é plantada em 40% da área total e a cana soca tardia é plantada em 25% da área total

Apesar dos resultados obtidos neste estudo indicarem aumentos nas produtividades potencial e real da cana-de-açúcar em todos os cenários de mudanças climáticas, em relação à condição atual, é conveniente salientar que esses dados devem ser considerados como um indicativo do que pode ocorrer em situações futuras, já que a avaliação dos impactos das mudanças climáticas na produtividade das culturas, segundo Challinor e Wheeler (2007), ainda é muito incerta, tanto em termos dos efeitos diretos (aumento da concentração de CO₂) como indiretos (alteração das temperaturas e do regime de chuvas).

4.3 Panorama do setor canavieiro diante das mudanças climáticas na região de Piracicaba, SP

O suprimento mundial de energia é baseado em combustíveis fósseis. A grande escala de uso tende a levar rapidamente ao esgotamento das fontes, deixando uma condição crítica para as gerações futuras. Além disso, o uso de combustíveis fósseis é responsável por grande carga de poluição local e pela maior parte da emissão de gases de efeito estufa.

Com o avanço de muitas regiões em desenvolvimento no mundo, o uso da energia deve crescer. O desafio atual é a busca por fontes renováveis de energia e de aumento nas eficiências de geração e uso. No Brasil, o setor canavieiro apresenta uma expressiva contribuição para a substituição de combustíveis fósseis. A produção de etanol da cana-de-açúcar garante uma relação sem par entre a energia renovável disponível para consumo e os insumos fósseis gastos para obtê-la, com resultados pelo menos quatro vezes superiores aos registrados com a produção do etanol de amido de milho nos Estados Unidos. Esta relação pode ser ainda maior se houver melhor aproveitamento dos resíduos para geração de eletricidade e outros energéticos (Macedo, 2005).

O aumento da produtividade da cana-de-açúcar observado na ocorrência de mudanças climáticas globais poderá ter impactos importantes no setor canavieiro. Haverá a possibilidade de a cultura ser expandida para regiões que, na atualidade, estão inviabilizadas de produzir, em função de temperaturas baixas que inibem um bom crescimento da cultura (Zullo Júnior et al., 2006; Melo et al., 2007). O aumento de

temperatura também proporcionará alguns efeitos benéficos, como um aumento na produtividade, visto que a temperatura do ar estará mais próxima de valores ideais para a cultura, afetando positivamente a eficiência fotossintética. O aumento da concentração de CO₂ será outro fator de estímulo para as plantas de cana-de-açúcar, já que esta responde a esse efeito de fertilização com um acréscimo de produção de biomassa. Além dos fatores ambientais, o avanço tecnológico tem grande importância no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, já que o melhoramento genético das culturas associado às práticas adequadas de manejo é responsável pelo aumento da produtividade. Tudo isso poderá levar à otimização da área plantada, ou seja, produzir mais em áreas menores.

Com o aumento da temperatura e a conseqüente elevação das taxas de evapotranspiração da cultura, haverá maiores deficiências hídricas, o que exigirá o uso da irrigação. Nesse contexto, a irrigação deverá ser empregada de modo racional visando a minimizar as perdas por morte das soqueiras colhidas no início e meio da safra, já que, com as mudanças climáticas, deverá haver uma maior pressão sobre os recursos hídricos, dado ao aumento de consumo pela população, pela indústria e, principalmente, pela agricultura. Para tanto, serão necessárias pesquisas voltadas para a obtenção de variedades mais resistentes ao déficit hídrico, ou seja, com maior eficiência do uso da água.

5 CONCLUSÕES

O modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade foi uma ferramenta muito útil para o desenvolvimento e obtenção dos resultados apresentados. Por meio dele, foi possível estimar as produtividades potencial e real da cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP, relativas a uma série histórica de 80 anos, tanto para as condições atuais como para os cenários de mudanças climáticas futuras.

Os dados de produtividades potencial e real atuais foram comparados com os cenários de mudanças climáticas criados a partir das informações contidas no quarto relatório do IPCC. Baseando-se nos resultados obtidos, concluiu-se que haverá um efeito benéfico das mudanças climáticas sobre a produtividade da cana-de-açúcar, desde que também sejam considerados nas análises o aumento de concentração de CO₂ e o avanço tecnológico, decorrente do desenvolvimento de novas variedades. O aumento da temperatura acarretará um aumento na produtividade potencial e, conseqüentemente, na produtividade real, já que esta acompanha a tendência da anterior. O aumento da concentração de CO₂ proporcionará um incremento de produtividade da cultura que responde positivamente a esse aumento, com maior produção de biomassa. O avanço tecnológico terá grande importância no desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar nos cenários futuros, já que este torna possível obter variedades geneticamente modificadas, mais resistentes ao déficit hídrico, proporcionando aumento de produtividade. O uso da irrigação será necessário, especialmente nas canas socas de ciclo precoce e médio, pois com o aumento da temperatura e a conseqüente elevação das taxas de evapotranspiração da cultura, haverá maiores deficiências hídricas.

Apesar dos resultados obtidos neste estudo indicarem aumentos nas produtividades potencial e real da cana-de-açúcar em todos os cenários de mudanças climáticas, é conveniente salientar que esses dados devem ser considerados apenas como um indicativo do que poderá ocorrer, caso os prognósticos estabelecidos pelo IPCC se confirmem. Além disso, deve-se levar em conta que os modelos agrometeorológicos de simulação do crescimento de culturas são ferramentas que ainda apresentam limitações, fazendo com que os resultados obtidos relativos aos impactos das mudanças climáticas na produtividade tenham ainda um elevado grau de incerteza.

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**, Oxford, n.165, p. 351-372, 2005.
- ALEXANDROV, V.; EITZINGER, J.; CAJIC, V.; OBERFORSTER, M. Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, p. 372-389, 2002.
- ALEXANDROV, V.; EITZINGER, J. The potential effect of climate change and elevated air carbon dioxide on agricultural crop production in Central and Southeastern Europe. **Journal of Crop Improvement**, New York, v. 13, n. 1/2, p. 291-331, 2005.
- ALFONSI, R. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). Condições climáticas para cana-de-açúcar. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 42-55.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. SMITH, M. **Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 331 p. (Paper 56).
- ARANHA, C.; YAHN, C. A. Botânica da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 3-18.
- ARAUJO, M. I. M. **Zoneamento da produtividade potencial climática da cana-de-açúcar no Estado do Rio de Janeiro**. 1993. 84 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.
- ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, nov. 2004.

BARBIERI, V. **Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. 1981. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1981.

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**: um modelo matemático-fisiológico de estimativa. 1993. 142 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. Araras: PLANALSUCAR – Coordenadoria Regional Sul – COSUL. Climatologia, 1977. 22 p.

BARBIERI, V.; TUON, R. L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1992. 17 p.

BARBIERI, V.; BACCHI, O. O. S.; VILLA NOVA, N. A. **Análise do fator temperatura do ar no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. 1979. Mossoró. **Anais...** Mossoró: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1979. p. 6-8.

BARBIERI, V.; TERUEL, D. A.; SILVA, J. G.; SANTOS, R. M. N. Balanço hídrico de Thornthwaite e Mather modificado para estimativa de deficiência nas culturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10. Piracicaba, 1997. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia; ESALQ, 1997. p. 587-589

BOWES, G. Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric CO₂. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, California, n. 44, p. 309-332, 1993.

BRAGION, L. **O próalcool renasce**. <Disponível em: <http://comciencia.br/comciencia/?section=8&edicao=23&id=254&tipo=0>>. Acesso em: 25 fev 2007.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comunicação nacional inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. **Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima**, 2004. 74 p. (Comunicação Nacional).

CAMARGO, A.P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1971. 28 p. (Boletim Técnico, 116).

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia** Campinas, v. 59, n.2, p. 125-137, 2000.

CAMARGO, A. P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.

CAMPELO JÚNIOR, J. H.; CASEIRO, F. T.; HERBSTER, O. F. **Zoneamento do potencial de produção de grãos em Mato Grosso**. Cuiabá: UFMT, 1990. 30 p.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigations options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, jan./fev., 2007.

CHALLINOR, A.J.; WHEELER, T.R. Crop yield reduction in the tropics under climate change: processes and uncertainties. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, 2007. No prelo.

Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI) – Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. **Exploração vegetal por município**.

<Disponível em:

http://www.cati.sp.gov.br/Cati/_servicos/PrincipaisAtividadesAgric/Cana_Acucar.php

Acesso em: 01 fev 2008.

CURE, J. D. Carbon dioxide doubling response: a crop survey. In: STRAIN, B. R.; CURE, J. D. (Ed.). **Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation**. Washington, D. C.: Carbon Dioxide Research Division, U. S. Department of Energy 1985. p. 99-116.

DARLING, P. J.; CARRUNTERS, I. Thirty years of agriculture: a review of Sub-Saharan África. Wye College, University of London. **Span**, Colorado, v.30, n.3, p.129-132, 1988.

DE WIT, C. T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen Pudoc, 1965. 57 p. (Agricultural Research Report 663).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. (Traduzido por GHEYI, H. R.; SOUZA, A.A.; DAMASCENO, F.A.V.; MEDEIROS, J.F. Campina Grande: FAO, 1994. 306 p..(Irrigação e Drenagem 33).

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, A.H. **La canã de azucar**. Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

FEARNSIDE, P.M. **Environmental services as a basis for the sustainable use of tropical forests in Brazilian Amazonia**. I ORTEGA, E.; ULGIATI, S. (Ed.) In: INTERNATIONAL BIENNIAL WORKSHOP ADVANCES IN ENERGY STUDIES: ENERGY-ECOLOGY IN LATIN AMERICA, 4., 2004.Campinas, **Anais...** Campinas, SP: Gráfica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), p. 31-36.

FOLIGATA, F. A. **Sugarcane irrigation in Tucumán**. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 15., 1974. Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: Heyne & Gibson, 1974. p. 665-667.

GHANNOUM, O.; VON CAEMMERER, S.; BARLOW, E. W. R. The effect of CO₂ enrichment and irradiance on the growth, morphology and gas exchange of a C3 (*Panicum laxum*) and a C4 (*Panicum antidotale*) grass. **Australian Journal of Plant Physiology**, Oxford, n.24, p. 227-237, 1997.

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

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

HORIKOSHI, A. S.; FISCH, G. Balanço Hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no município de Taubaté, SP, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 2, n. 2, 2007.

HOUGHTON, J.; MEIRA FILHO, L.; CALLANDER, B.; HARRIS, N. KATTENBERG, A.; MASKELL, K. (Ed). **Climate change 1995: The science of climate change**. Contribution of the Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC, 1996. 570 p.

HUMBERT, R. P. **The growing of sugar cane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. 779 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 1980 e 1985. <Disponível em: www.sidraibge.gov.br >. Acesso em 23 jun 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal 1990 a 2006. <Disponível em: www.sidraibge.gov.br >. Acesso em 23 jun 2007.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge University Press. 2001a.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001: Impacts, Adaptations and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge University Press. 2001b.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: The Physical Science Basis**. Summary for Policymakers. Working Group I. <Disponível em http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Pub_SPM-v2.pdf>. Acesso em: 01 jun 2007.

IRVINE, J. E. Relations of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugar cane yield. **Crop Science**, California, v.15, p. 671-676, 1980.

IRVINE, J. E.; BENDA, G. T. A. Sugar cane spacing II. Effects of spacing on the plant. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., 1980. Manila. **Proceedings**...Manila: ISSCT, 1980. p. 357-367.

JENSEN, M. E. **Water consumptions by agricultural plant growth**. New York: Academic, 1968. v. 2, p. 1-22.

KIMBALL, B. A; IDSO, S. B. Increasing atmospheric CO₂: effects on crop yield, water use and climate. **Agriculture and Water Management**, Connecticut, v. 7, p. 55-72, 1983.

KOFFLER, N. F.; DONZELI, P. L. Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 19-41.

LANDEL, M. Muita água, pouca luz. Produção, dados & notícias. **Jornal Cana**, janeiro, 2007. < Disponível em: <http://www.jornalcana.com.br/pdf/157/%5Cproddadnot.pdf>>. Acesso em 13 jan 2008.

LEPSCH, I. F. **Influência dos fatores edáficos na produção**. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T.; (Coord.). **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFOS), 1987. p. 83-98.

LIMA, M. A. Agropecuária brasileira e as mudanças climáticas globais: caracterização do problema, oportunidades e desafios. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.19, n. 3, p. 451-472, set./dez., 2002.

MACEDO, I. C. (Org.). **A energia da cana-de-açúcar – doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e sua sustentabilidade**. São Paulo: Berlendis & Vertecchia: ÚNICA – União da agroindústria canavieira do Estado de São Paulo, 2005. 237 p.

MACHADO, E. C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 56-87.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; CAMARGO, M. B. P.; FAHL, J. I. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, n. 44, p. 229-238, 1985.

MACHADO, E. C.; SANTOS, B. G.; CAMARGO, M. B. P.; BARBIERI, V. MAGALHÃES, A. C. M. Análise de crescimento de duas variedades de cana-de-açúcar com e sem irrigação. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE LATINO-AMERICANA DE FISILOGIA VEGETAL, 9., 1983. Viçosa. 1983. **Resumos...**, Viçosa. 1983, p. 42.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo de carbono na planta. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T.; (Coord.). **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato (POTAFOS), 1987. p. 113-118.

MALEK, E. Comparison of alternative methods for estimating ETP and evaluation of advection in the Bajah area, Iran. **Agricultural Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 39. p. 185-192, 1987.

MARCHIORI, L. F. S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. 2004. 273 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 212 p. (Série biodiversidade 26).

MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, n.1, p. 1-6, 2000.

MELO, S. B.; GALON, L.; SOUZA, E. F. M.; REZENDE, M. L.; RENATO, N. S. Aquecimento global e um estudo da produtividade potencial da cana-de-açúcar para a região de São Paulo. **Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 10-17, out./dez., 2007.

MOONEY, H. A.; CANADELL, J.; CHAPIN, F. S.; EHLERINGER, J. R.; KÖRNER, C.; McMURTIE, R. E.; ARTON, W. J.; PITELKA, L. F.; SCHULZE, E. D. **Ecosystem physiology responses to global change**. In: THE TERRESTRIAL BIOSPHERE GLOBAL CHANGE. Cambridge University Press, London. 1999. p. 141-189.

MORGAN, J. A.; LeCAIN, D. R.; MOSIER, A. R.; MILCHUNAS, D. G. Elevated CO₂ enhances water relations and productivity and affects gas exchanges in C₃ and C₄ grasses of the Colorado shortgrass steppe. **Global Change Biology**, Oxford, n.7, p. 451-466, 2001.

MORISON, J. I. L. Intercellular CO₂ concentration and stomata response to CO₂. In: ZEIGER, E.; FARQUHAR, G.D.; COWAN, I.R. (Ed.). **Stomata function**. Stanford: Stanford University, 1987. p. 229-251.

NOAA. **National Oceanic and Atmospheric Administration**. <Disponível em: www.cmde.noaa.gov/projects/src/web/trends/co2_mm_meo.dat>. Acesso em 12 fev 2006.

OMETTO, J. C. **Uma equação para a estimativa de evapotranspiração potencial: sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agro-industrial da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP.** 1974. 129 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1974.

OMETTO, J. C. **Parâmetros meteorológicos e a cultura da cana-de-açúcar.** Piracicaba: ESALQ, 1980. 17 p.

ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Ed.) **Ecofisiologia da produção agrícola.** Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 71-79.

ORTOLANI FILHO, J. **Nutrição e adubação de cana-de-açúcar no Brasil.** Piracicaba: Instituto do Açúcar e Alcool/PLANALSUCAR, 1983. 389 p.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R. R.; ORTOLANI, A. A.; MIRANDA, M. A. C. Teste de modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade potencial da cultura da soja de ciclo precoce. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 1983, Campinas. **Anais...** Campinas, 1983, p. 11-17.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. Um simulador dinâmico do crescimento de uma cultura de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 1, p. 107-122, 1986.

PEREIRA, A. R.; BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. Condicionamento climático da indução ao florescimento em cana-de-açúcar. **Boletim Técnico PLANALSUCAR**, Piracicaba, v. 5, n.3, p. 5-14, 1983.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002. 478 p.

POOLEY, H. W.; JOHNSON, H. B.; DERNER, J. D. Increasing CO₂ from subambient to superambient concentrations alters species composition and increases above-ground biomass in a C3/C4 grassland. **New Phytologist**, Oxford, n.160, p. 319-327, 2003.

- POORTER, H.; PÉREZ-SOBA, M. **Plant growth at elevated CO₂**. In: ENCYCLOPEDIA OF GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE. Chichester: John Wiley 2002. p. 489-496.
- PRENTICE, I. C. **The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide**. In: CLIMATE CHANGE 2001: THE SCIENTIFIC BASIS (ED. IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p. 489-496.
- PRUITT, W. O. Cycling relations between evapotranspiration and radiation. **Transactions of the ASAE**, Washington, v. 7, n. 3, p. 271-275, 1964.
- RAMOS, P. A agroindústria canavieira do Brasil: referencial historiográfico, temas e fontes. **América Latina em la história econômica**. n.11. jan./jun., 1999.
- READ, J. J.; MORGAN, J. A.; CHATTERTONS, N. J.; HARRISON, P. A. Gas exchange and carbohydrate and nitrogen concentrations in leaves of *Paspopyrum smithii* (C3) and *Bouteloua gracilis* (C4) at different carbon dioxide concentrations and temperatures. **Annals of Botany**, Oxford, n. 79, p. 197-206, 1997.
- REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. McGraw-Hill do Brasil, 1978. 119 p.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: USP/ESALQ. Departamento de Física e Meteorologia, 1996. 513 p.
- RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Biociências. 1995. 99 p. <Disponível em: <http://www.residenciaagronomica.ufpr.br/bibliografia/MATURAD.pdf>>. Acesso em: 14 jan 2008.
- ROJAS, J. S. D. **Modelo agrometeorológico para estimativa dos efeitos de deficiência hídrica na produtividade agro-industrial da cana-de-açúcar**. 1998. 74 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilha no ambiente Excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; UNGARO, M. R. G. Análise de risco climático para a cultura de girassol, em algumas localidades de São Paulo e do Paraná, usando os modelos DSSAT/OILCROP-SUN e FAO. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 9, n. 1, p. 91-102, 2001.

ROSENBERG, N. J.; Blad, D. L.; Verma, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2nd ed. New York: John Willey, 1983. 495 p.

SAGE, R. F.; KUBIEN, D. S. Quo vadis C4? An ecophysiological perspective on global change and the future of C4 plants. **Photosynthesis Research**, New York, n.77, p. 209-225, 2003.

SALATI, E.; SANTOS, A. A.; KLABIN, I. Temas ambientais relevantes. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 20, n. 56, p. 107-127, 2006.

SANTOS, M. C.; SENTELHAS, P. C.; MARIN, F. R. Calibração do modelo agrometeorológico da FAO para a estimativa da produtividade potencial e real da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 14., 2006, Piracicaba. SIICUSP. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006. v. 1.

SCARDUA, R.; ROSENFELD, U. Irrigação da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1 p. 313-431.

SCARPARI, M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SIMON, C.; DeFRIES, R. S. **Uma Terra, um futuro**. Makron Books, São Paulo, 1992.

SIQUEIRA, O. J. F. de; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate change for brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 115-129, 1994.

SIQUEIRA, O. J. W. de; STEINMETZ, S.; FERREIRA, M. F.; COSTA, A. C.; WOZNIAK, M. A. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

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 spp.*** 2007. 85 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular e Estrutural) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 730-740, mai./jun., 2005.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar: avaliação do modelo Mosaic.** 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SZMRECSÁNYI, T. MOREIRA, E. P. O desenvolvimento da agroindústria canavieira no Brasil desde a Segunda Guerra Mundial. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 5, n. 11, p. 57-79, 1991.

TERAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseados em parâmetros do solo e do clima.** 2003. 86 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TERUEL, D. A. **Modelagem do índice de área foliar da cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos.** 1995. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo Piracicaba, 1995.

THOMPSON, G. D. The relationship of potencial evapotranspiration of sugarcane environmental factors. In: INTERNATIONAL SOCIETY SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 12., 1967. Puerto Rico. **Proceedings...**, Amsterdam: Elsevier, p. 3-9. 1967.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.104 p.

TROUSE, A. C. Effects of soil compression on the development of sugar cane roots. IN: INTERNATIONAL SOCIETY SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 12., 1967, Amsterdam. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier, 1967. p. 137-152.

TUBIELLO, F. N.; DONATELLI, M.; ROSENZWEIG, C.; STOCKLE, C. O. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.13, p. 179-189, 2000.

VILLA NOVA, N. A.; BARBIERI, V. **Consideração sobre a viabilidade da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. In: Curso de Agricultura Irrigada. Piracicaba, 1991. p. 76-82.

VILLALOBOS, F. J.; HALL, A. J.; RITCHIE, J. T.; Orgaz, F. A development, growth and yield model of the sunflower crop. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 403-415, 1996.

WAND, S. J. E.; MIDGLEY, G. F.; JONES, M. H.; CURTIS, P. S. Responses of wild C4 and C3 grass (*Poaceae*) species to elevated atmospheric CO₂ concentration: a meta-analytic test of current theories and perceptions. **Global Change Biology**, Oxford, n.5, p. 723-741, 1999.

WARRICK, R. A. Carbon dioxide, climatic change and agriculture. **The Geographical Journal**, Oxford, v. 154, n. 2, p. 221-233, 1988.

WATSON, R. T.; ZINYOWERA, M. C.; MOSS, R. H. **Climate change 1995: impacts, adaptation and mitigation of climate change**. Cambridge University Press, Cambridge, 1996. 878 p.

ZISKA, L. H.; BUNCE, J. A. **Influence of increasing carbon dioxide concentration on the photosynthetic and growth stimulation of selected C4 crops and weeds**. 1997. p. 199-208, (Photosynthesis Research 54).

ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. Impact assessment study of climate change on agricultural zoning. **Meteorological Applications**, New York, v.1, p. 69-80, 2006.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)