Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil e da Austrália

Dayana Lardo dos Santos

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2013

Dayana Lardo dos Santos
Engenheira Agrônoma

Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil e da Austrália

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Santos, Dayana Lardo dos
Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil e da Austrália / Dayana Lardo dos Santos.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
100 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Agroclimatologia 2. Cana-de- açúcar 3. Ferrugem alaranjada - Doença de planta 4. Modelos matemáticos I. Título

CDD 633.61
A719a

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

À Deus, Jesus e Espírito Santo por sempre me guiarem com excelso amor
AGRADEÇO

Aos meus pais, esposo e irmãos, pelas orações e apoio incondicionais, sem os quais não alcançaria esta vitória
DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Paulo Cesar Sentelhas a minha eterna gratidão pela confiança, amizade e total dedicação prestada desde minha graduação. Seu apoio foi fundamental para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pelas oportunidades oferecidas.

Aos professores Luiz Roberto Angelocci, Quirijn de Jong van Lier, Sérgio Oliveira Moraes, Fábio Ricardo Marin e Edgar Gomes Ferreira de Beauclair, pelos ensinamentos repassados, e aos funcionários Luiz Fernando Novelo, Ângela Márcia Derigi Silva e Davilmar Aparecida Domingues Collevatti pelo apoio administrativo.

Aos colegas da pós-graduação, principalmente aos integrantes da Cúpula, pelos momentos compartilhados.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), pela bolsa de mestrado.

Ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), em especial aos pesquisadores Wander José Pallone Filho, Enrico Arrigoni, Jorge Luis Donzelli e Adhair Ricci Junior por todo apoio e supervisão dados a esse projeto.

SUMÁRIO

RESUMO..... 9
ABSTRACT..... 11
LISTA DE FIGURAS..... 13
LISTA DE TABELAS..... 17
LISTA DE SÍMBOLOS..... 21
1 INTRODUÇÃO..... 23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 27
2.1 A cultura da cana-de-açúcar..... 27
2.2 Ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar..... 28
2.2.1 Ocorrência e danos..... 28
2.2.2 Influência do clima na ocorrência da ferrugem alaranjada..... 30
2.3 Interação entre doença e clima 32
2.4 Modelagem epidemiológica..... 34
3 MATERIAL E MÉTODOS..... 39
3.1 Levantamento da ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar.... 39
3.2 Dados meteorológicos, análises climáticas e estabelecimento dos fatores climáticos favoráveis à ferrugem alaranjada..... 41
3.3 Severidade da ferrugem alaranjada e condições meteorológicas..... 42
3.4 Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da Ferrugem da Cana-de-açúcar (IFAC)..... 43
3.5 Confecção dos mapas das zonas de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada..... 46
3.6 Avaliação da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada..... 47
3.7 Validação dos resultados..... 47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 49
4.1 Análise das variáveis meteorológicas..... 49
4.2 Análise climática e definição dos fatores condicionantes da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar..... 60
4.3 Estimativa da severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar..... 77
4.4 Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar..... 83

4.5 Mapas de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar..... 88
5 CONCLUSÕES..... 93
REFERÊNCIAS..... 95

RESUMO

Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil e da Austrália

O Brasil, maior expoente do setor sucroalcooleiro mundial, apresenta como um dos entraves para obter elevadas produtividades a ocorrência de doenças fúngicas, as quais limitam o potencial produtivo do canavial. Atualmente, um dos grandes desafios para a comunidade canavieira é a recém-introduzida ferrugem alaranjada, doença causada pelo fungo *Puccinia kuehnii*, a qual foi detectada pela primeira vez no Brasil na safra 2009/10, ano em que as chuvas excederam os valores normais e as temperaturas foram amenas. Dada a grande dependência que as doenças fúngicas têm das condições climáticas para se manifestarem, o presente estudo teve por objetivo avaliar as condições meteorológicas que foram observadas durante as epidemias de ferrugem alaranjada ocorridas na província de Queensland, Austrália, em 1999/2000, e no estado de São Paulo, em 2009/2010, e a partir dessas elaborar modelos que possibilitassem estimar a severidade da doença, de modo a se estabelecer o zoneamento da favorabilidade climática para sua ocorrência. Com base nessas informações foram elaborados mapas de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem no estado de São Paulo e na província de Queensland. As variáveis climáticas favoráveis à ocorrência da ferrugem alaranjada foram o número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC*) e o número de decêndios com temperatura média ideal para a infecção (*NDTideal*). Essas variáveis foram utilizadas no desenvolvimento de modelos lineares para determinação da severidade da doença, com base nos dados observados em diferentes regiões do estado de São Paulo. A elaboração do Índice de Favorabilidade Climática à Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (*IFAC*) se baseou numa ponderação das severidades estimadas para séries de 15 a 30 anos. Posteriormente, o *IFAC* foi correlacionado com as coordenadas geográficas e a altitude o que permitiu se estimar o I*FAC* para todo o Estado de São Paulo. Esse modelo também foi aplicado para a Província de Queensland, Austrália. O IFAC foi empregado na confecção de mapas nos quais se estabeleceram os zoneamentos das regiões de favorabilidade climática à doença. Observou-se que as regiões canavieiras no oeste paulista apresentam risco muito baixo a moderado, enquanto que nas regiões no centro-leste do Estado, o risco é moderado-alto a alto seguindo uma tendência longitudinal. Para Queensland, a região mais favorável à doença é na faixa leste da província, exatamente nas regiões onde se concentra a produção de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*; *Puccinia kuehni*; Fitopatologia; Climatologia agrícola; Modelos de estimativa

ABSTRACT

Climate favorability zoning for the occurrence of sugarcane orange rust in the main producing regions of Brazil and Australia

Brazil, the largest exponent of the sugarcane sector in the world, presents as one of the obstacles for obtaining high yields the occurrence of diseases, which limits the potential productivity of the crop. Presently, one the greatest challenge for sugarcane production is newly introduced sugarcane disease, named orange rust, caused by *Puccinia kuehni*, which was detected by the first time in Brazil during 2009-2010 growing season, when the rainfall exceed the normal values and temperatures remained mild. Considering the great influence of climate conditions on plant diseases occurrence, the present study aimed to evaluate the weather conditions that prevailed during the sugarcane orange rust epidemic in province of Queensland, Australia, in 1999-2000 growing season, and in the state of São Paulo, Brazil, in 2009-2010 growing season, and base on that to develop a disease severity model in order to establish the climate favorability zoning for its occurrence. Based on these data, maps of orange rust climatic favorability were elaborated for the state of São Paulo and province of Queensland. The climatic variables favorable for conditioning orange rust were the number of ten-day periods with soil water surplus (*NDEXC*) and the number of ten-day periods with average temperature within the ideal range for the disease (*NDTideal*). With these variables, linear models were developed to determine the severity of the disease, based on disease and weather data observed in different regions of the state of São Paulo. The Climatic Favorability Index for Sugarcane Orange Rust Occurrence (IFAC) was based on the weighting of the disease severities estimated for weather series of 15 to 30 years. After that, IFAC was correlated with the geographical coordinates and altitude which allowed estimating it for all the state of São Paulo. This procedure was also applied for the province of Queensland, Australia. The IFAC was used to generate maps for zoning the regions of climatic favorability for the disease. The maps allowed to observe that for the state of São Paulo, the west region presents vary low to moderate risk for the disease, while the center-east region presents moderate-high to high risk. For the province of Queensland, the most favorable region for orange rust occurrence is the east, exactly where the sugarcane production is concentrated.

Keywords: *Saccharum officinarum*; *Puccinia kuehni*; Phytopathology; Agricultural climatology; Estimating models

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distribuição das áreas produtoras de cana-de-açúcar (em verde) na Província de Queensland, Austrália. Fonte: BUNDYSUGAR (2011); CTC 2012).....39

Figura 2 Relação das localidades do Estado de São Paulo afetadas pela ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar e as respectivas notas atribu[idas conforme a escala de avaliação de ferrugem. Fonte: CTC (2010).....40

Figura 3 Escala de avaliação da severidade da ferrugem em folhas de cana- -de-açúcar. Fonte: Amorim et al.(1987).....40

Figura 4 Distribuição das localidades do Estado de São Paulo empregadas na determinação do Índice de Favorabilidade Climática para a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (IFAC). Fonte: CTC (2011).....43

Figura 5 Principais regiões canavieiras do Estado de São Paulo e locais com ocorrência da ferrugem alaranjada. Fonte: CTC (2011).....49

Figura 6 Temperatura média e chuva decendiais normais (1980/2009) e observadas para 2009/10, entre os meses de setembro e fevereiro, para dez importantes regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....50

Figura 7 Chuva acumulada e médias das temperaturas máximas e mínimas para para o período de setembro a fevereiro para os anos de 1980 a 2009, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....52

Figura 8 Temperatura média e chuva decendiais normais (1980/2009) e observadas no ano 2000, entre os meses de janeiro e junho, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....56

Figura 9 Chuva acumulada e médias das temperaturas máximas e mínimas para o período de janeiro a junho para os anos de 1980 a 2009, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....58

Figura 10 Extrato do balanço hídrico climatológico normal (1980/2009) e sequencial (2009/2010), para os meses de setembro a fevereiro, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....61

Figura 11 Extrato do balanço hídrico climatológico normal (1980/2009) e sequencial (1999/2000) para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....63
Figura 12 Número de decêndios com excedente hídrico (NDEXC) entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana--de-açúcar do Estado de São Paulo.....65
Figura 13 Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (NDTideal), entre 17 e 26°C, entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....67
Figura 14 Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (NDTideal), entre 20 e 25°C, entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....69
Figura 15 Número de decêndios com excedente hídrico (NDEXC) entre os meses de janeiro e junho para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana--de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....72
Figura 16 Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (NDTideal), entre 17 e 26°C, entre os meses de janeiro e junho para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....74
Figura 17 Relação entre a severidade de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar observada (Sevobs) e estimada (Sevest), a partir dos modelos de regressão linear múltipla com variáveis simples (S) e integradas (I) para faixas de temperatura de 17 a 26°C e 20 a 25°C, considerando-se as 40 localidades do Estado de São Paulo.....78

Figura 18 Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (IFAC) para 46 localidades do Estado de de São Paulo.....85
Figura 19 Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (IFAC) para 40 localidades da Província de Queensland, Austrália.....85
Figura 20 Índice de favorabilidade para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar observado (IFACobs) e estimado (IFACest) obtidos a partir de modelos de regressão linear múltipla com variáveis simples (S) (a) e e integradas (I) (b, c e d) para as faixas de temperatura ideal de 17 a 26°Ce 20 a 25°C, para 46 localidades do Estado de São Paulo, considerando os modelos de severidade (SEV).....87
Figura 21 Índice de favorabilidade para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar observado (IFACobs) e estimado (IFACest) obtidos a partir de modelos de regressão linear múltipla com variáveis integradas (I) para a faixa de temperatura ideal de 17 a 26°C, para 40 localidades da Província de Queensland, Austrália, considerando modelo de severidade (SEV).....88
Figura 22 Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.....89
Figura 23 Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e notas de severidade observadas em levantamentos de campo do CTC entre janeiro e fevereiro de 2010 e médias por faixa de risco.....90
Figura 24 Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar na Província de Queensland, Austrália....92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Anos sob a influência do fenômeno atmosférico-oceânico El Niño Oscilação Sul (ENOS), em sua fase quente (El Niño) e fria (La Niña).....43

Tabela 2 Localidades do Estado de São Paulo empregadas na determinação do Índice de Favorabilidade Climática a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (IFAC), e séries de dados meteorológicos consideradas.....44

Tabela 3 Localidades da Província de Queensland empregadas na determinação do Índice de Favorabilidade Climática a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (IFAC) para série de 30 anos (1980-2010) de dados meteorológicos.....45

Tabela 4 Classes de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar de acordo com Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (IFAC).....47

Tabela 5 Medida da temperatura decendial e chuva normais (1980/2009) e observadas entre setembro de 2009 e fevereiro de 2010, para dez importantes regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....52

Tabela 6 Medida da temperatura decendial e chuva normais (1980/2009) e observadas para o ano 2000, para o período de janeiro a junho, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....54

Tabela 7 Comparação entre os excedentes hídricos decendiais normais (1980/2009) e observados em 2009/10, entre setembro e fevereiro, e respectivos aumentos percentuais, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.....60

Tabela 8 Comparação entre os excedentes hídricos decendiais normais (1980/2009) e observados em 2000, entre janeiro e junho, e respectivos aumentos percentuais, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar na Província de Queensland, Austrália.....62

Tabela 9 Número de decêndios com excedente hídrico (NDEXC) e com a temperatura no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (NDTideal), para as faixas de temperatura de 17 a 26°C e 20 a 25°C, médios (1980-2009) e para 2009/2010, entre os meses de setembro a fevereiro, para dez importantes regiões produtoras de cana-de-açúcar Estado de São Paulo.....65

Tabela 10 Número de decêndios com excedente hídrico (NDEXC) e com a temperatura no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (NDTideal), para as faixas de temperatura de 17 a 26°C, médios (1980-2009) e para 2000, entre os meses de janeiro a junho, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....71

Tabela 11 Coeficientes linear e angular dos modelos de regressão linear múltipla, com variáveis simples (S) e integradas (I) e para faixas de temperatura ideal de 17 a 26ºC e de 20 a 25ºC, para a estimativa da severidade (SEV) da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, para o Estado de São Paulo.....77

Tabela 12 Severidade estimada da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para as seis principais regiões canavieiras no Estado de São Paulo.....80

Tabela 13 Severidade estimada da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para regiões canavieiras da Província de Queensland, Austrália.....81

Tabela 14 Frequência de anos com notas de severidade estimada para a ferrugem alaranjada acima da média da série histórica de 1980 a 2009, nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....82

Tabela 15 Frequência de anos com notas de severidade estimada para a ferrugem alaranjada acima da média da série histórica de 1980 a 2009, nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....83

Tabela 16 Coeficientes linear e angular dos modelos de regressão linear múltipla, com variáveis simples (S) e integradas (I) e para as faixas de temperatura ideal de 17 a 26ºC e de 20 a 25ºC, para a estimativa do Índice de Favorabilidade Climática a ferrugem alaranjada da cana-de-acúcar (IFAC) para o Estado de São Paulo, a partir de modelos de severidade (SEV).....86

Tabela 17 Coeficientes linear e angular do modelo de regressão linear múltipla, com variáveis integradas (I) e para a faixa de temperatura ideal de 17 a 26ºC, para a estimativa do Índice de Favorabilidade Climática a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (IFAC) para a Província de Queensland, Austrália, a partir de modelo de severidade (SEV).....86

LISTA DE SÍMBOLOS

A- número total de anos da série

A_n- número de anos em que a nota “n” ocorreu

BHNorm - balanço hídrico normal

BHSeq- balanço hídrico sequencial

C - coeficiente de confiança

CAD-capacidade de água disponível no solo

Chuva_Norm - chuva normal

d - coeficiente de Willmott

DPM-duração do período de molhamento

EXC - excedente hídrico decendial

DEF - déficit hídrico decendial

I - regressão linear múltipla com variáveis integradas

IFAC- Índice de Favorabilidade Climática a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar

$IFAC_{est}$- Índice de Favorabilidade Climática a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar estimado

$IFAC_{obs}$- Índice de Favorabilidade Climática a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar observado

Mape–Erro Absoluto Médio Percentual

NDEXC-número de decêndios com excedente hídrico

$NDEXC_{med}$-número médio de decêndios com excedente hídrico

NDTideal- número de decêndios com temperatura média ideal

$NDTideal_{med}$- número médio de decêndios com temperatura média ideal

N_n-nota de severidade estimada

Ø - latitude

R^2- coeficiente de determinação

S - regressão linear múltipla com variáveis simples

SEV-severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

UR-umidade relativa

Temp_Norm - temperatura média do ar normal

Tideal- temperatura do ar ideal

Tmáx - temperatura máxima do ar

Tmín - temperatura mínima do ar

λ - longitude

ξ - altitude

1 INTRODUÇÃO

Devido principalmente ao incremento no uso da energia renovável, a cultura da cana-de-açúcar utilizada como matéria-prima para a produção de açúcar e álcool, e seus subprodutos e resíduos para co-geração de energia elétrica, fabricação de ração animal e fertilizante para as lavouras, vem se expandido fortemente no Brasil. Apresentando 676 mil hectares de área nova agregada em todo território nacional, a cultura se destaca como primeiro item na pauta de exportações do agronegócio paulista, responsável por 54,5% (368 mil hectares) dessa expansão (CONAB, 2012).

Líder mundial em tecnologia de produção de etanol, o Brasil leva vantagens por ser um dos mais tradicionais produtores de cana-de-açúcar, com uma área colhida estimada em 8,53 milhões de hectares e um total de cana moída estimado em 596,63 milhões de toneladas para a safra 2012/13. Para o Estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do país, estima-se que a área colhida seja de 4,4 milhões de hectares, com uma produção de 323,124 milhões de toneladas (CONAB, 2012).

Com vários tipos de ambientes de produção devido a sua extensão territorial, o Brasil apresenta, dentre os fatores de produção, cultivo influenciado principalmente pelas condições edafo-climáticas, as quais determinam suas aptidões agrícolas e fitossanitárias, as quais representam os maiores entraves para se atingir produtividades agrícolas elevadas. Dentre as principais doenças que comumente atacam os canaviais, destacam-se: carvão; ferrugem marrom; mosaico; escaldadura; amarelinho e raquitismo.

Recentemente, em dezembro de 2009, uma nova ferrugem, denominada de ferrugem alaranjada, devido à coloração de suas pústulas, causada pelo fungo *Puccinia kuehnii E.J.*, chegou ao país, e já vem apresentando danos à cultura, principalmente nas variedades suscetíveis RB72454, SP89-1115 e SP84-2025, chamando a atenção do setor canavieiro. Os sintomas se apresentam como manchas, que se iniciam com pequenas pontuações alongadas e amareladas nas folhas e conforme se dá o amadurecimento das lesões e a produção de urediniósporos elas vão se tornando alaranjadas (FERRARI et al., 2010; MARTINS, 2010). Assim como em outras doenças, a ferrugem alaranjada reduz a área fotossinteticamente ativa da planta, podendo causar a morte da soqueira de cana

antes da conclusão de seu ciclo normal de vida, afetando o seu desenvolvimento e produtividade (WAGGONER E BERGER, 1987).

Embora muito antiga, a doença vinha sendo observada há muitos anos apenas no sudeste da Ásia e Oceania sem gerar grandes danos à cultura, até causar o surto epidêmico na Austrália, nos anos de 1999/2000, quando infectou a variedade suscetível Q124 que ocupava 86% da área plantada da Província de Queensland, sua principal região produtora, gerando grandes danos ao setor canavieiro (MAGAREY et al., 2001).

Nos lugares onde a ferrugem alaranjada tem ocorrido, o controle tem sido feito basicamente com o plantio de variedades resistentes. Para a localidade de Mackay, na Província de Queensland, devastado pela doença em 2000, os produtores substituíram a variedade Q124 pela Q208, a qual atualmente ocupa 24% da área plantada (ProMED-mail, 2012). Nas variedades suscetíveis, o controle vem sendo feito por meio da aplicação de fungicidas durante as janelas de favorabilidade à doença e no início do ciclo das infecções (EMBRAPA, 2008).

Apesar dos pontos expostos acima, vários aspectos importantes ainda precisam ser conhecidos para um manejo adequado e racional da ferrugem alaranjada nos canaviais brasileiros, sendo as condições ambientais, épocas e locais mais favoráveis para a ocorrência da doença informações extremamente importantes e necessárias para tal, como mencionado por Ferrari et al. (2010). Sendo assim, o presente estudo teve por objetivo geral estabelecer o zoneamento das regiões de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, Brasil, e na província de Queensland, Austrália, de modo a subsidiar a alocação de variedades nas diferentes regiões produtoras e auxiliar nas estratégias de manejo da doença.

Os objetivos específicos deste estudo foram:

a) Caracterizar as variáveis climáticas que condicionam o desenvolvimento da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, a partir da análise das epidemias observadas na Austrália em 1999/2000 e no Estado de São Paulo em 2009/2010;

b) Avaliar a variabilidade do clima nas regiões produtoras de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, Brasil, e na Província de Queensland, Austrália, de modo a determinar a favorabilidade climática dessas áreas para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, considerando-se os anos sob a influência dos fenômenos El Niño e La Niña;

c) Desenvolver modelos lineares múltiplos que correlacionem a severidade estimada da ferrugem alaranjada, a partir das variáveis climáticas condicionantes, com as coordenadas geográficas e altitude;

d) Confeccionar mapas do zoneamento de áreas de favorabilidade para a ocorrência da ferrugem alaranjada no estado de São Paulo, Brasil, e na província de Queensland, Austrália.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

Originária do sudeste asiático, na região de Nova Guiné e Indonésia, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) tem a maior parte das lavouras comerciais entre as latitudes 30°N e 35°S e em altitudes que variam do nível do mar até 1000 m de altitude (DOORENBOS E KASSAM, 1994), apresentando uma ampla adaptação a diferentes ambientes de produção. Pertencente à família *Poacea*, a cana-de-açúcar é uma gramínea tropical do tipo C4 que se caracteriza por apresentar elevada taxa fotossintética e alta produtividade biológica, sendo uma das culturas mais eficientes e produtivas (IRVINE, 1980).

A agroindústria canavieira é a mais antiga atividade econômica do Brasil, sendo no período colonial a principal atividade da região nordeste, difundindo-se posteriormente para o centro-sul, onde teve seu primeiro engenho construído na atual cidade de São Vicente, SP (GOUVÊA, 2008). Segundo Leite (1987), ao final do século XX o Brasil tornou-se o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, liderança atingida principalmente em função da criação do Proálcool, em 1975, assumindo um papel ainda mais importante no aspecto social, econômico e ambiental, devido a uma eficiente estrutura de pesquisa diretamente e especificamente ligada à indústria sucroalcooleira, a qual tem permitido maior dinâmica na estrutura de produção de São Paulo.

A produção de cana-de-açúcar está localizada predominantemente na faixa tropical do planeta, nos países em desenvolvimento da América Latina, da África e do Sudeste Asiático, sendo a produção mundial da ordem de 1,66 bilhões de toneladas, ocupando uma área de 21 milhões de hectares (FAO, 2011). O Brasil se destaca como o maior produtor mundial, com 602,2 milhões de toneladas para a safra 2012/13 (CONAB, 2012), responsável por aproximadamente 35% da produção mundial, seguido pela Índia, com 285 milhões de toneladas (17%) e China, com 116 milhões de toneladas (7%) (FAO, 2011).

A superioridade brasileira é decorrente da implantação de tecnologias no canavial, dentre elas, o melhoramento genético, focado principalmente em resistência a doenças, as quais são capazes de reduzir o rendimento da cana-de-açúcar (HEINZ, 1987).

2.2 Ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

2.2.1Ocorrência e danos

A ferrugem alaranjada pertencente ao filo *Basidiomycota*, ordem *Pucciniales* e família *Pucciniaceae*. O fungo do gênero *Puccinia* é biotrófico e possui uma baixa gama de hospedeiros, atacando principalmente plantas do gênero *Saccharum*. Duas espécies que atacam a cana-de-açúcar são: *P. melanocephala*, causadora da ferrugem marrom, e a *P. kuehnii* Butler, causadora da ferrugem alaranjada. A ferrugem marrom, importante doença da cana-de-açúcar principalmente devido à eficiente disseminação a longas distâncias de seus minúsculos esporos através das correntes aéreas, teve sua primeira ocorrência registrada no país em 1986, causada pelo basidiomiceto *Puccinia melanocephala*, após oito anos de sua chegada aos países do Caribe e da América Central, vinda da África por correntes aéreas. Como consequência de sua manifestação, a conhecida ferrugem marrom, resultou no abandono de diversas variedades comerciais por possuir elevado potencial destrutivo.

Segundo Ryan e Egan (1989), a primeira descrição da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar foi dada em 1890 por Krüger, em Java, que descreveu o patógeno sob o nome *Uromyces kuehnii*, o qual foi renomeado em seguida, em 1898, para *Uredo kuehnii*, por Wakker e Went, que mostraram que o suposto esporo Uromyces era apenas urediniósporos. Conforme os autores, somente em 1918 Butler registrou essa doença na Índia em Saccharum spp. selvagem, sendo o primeiro a localizar teliósporos do patógeno, o que lhe permitiu reclassificá-lo como *Puccinia kuehnii*. Os primeiros sintomas da ferrugem alaranjada são pequenas pontuações alongadas com halo amarelo esverdeado pálido, que evoluem gradativamente para pústulas salientes, que conforme o amadurecimento e produção de urediniósporos vão se tornando alaranjadas a alaranjadas amarronzadas (Ferrari et al., 2010). As pústulas tendem a se agrupar próximas ao ponto de inserção da folha ao colmo, sendo em condições de alta severidade da doença, comum a coalescência das mesmas e necrose das folhas, que geralmente ocorre a partir das bordas (CDA, 2010). Segundo Croft (2000), esse agrupamento pode causar o rompimento das folhas com consequente perda de água pela planta, levando a um estresse hídrico.

Em condições de campo, a ferrugem alaranjada pode ser confundida com a ferrugem marrom, porém esta, em geral, apresenta pústulas de maior tamanho e mais alongadas, ocorrendo em maior número do centro para as extremidades das folhas, com coloração mais escura, (marrom-escuras quando maduras), raramente promovendo necrose nas folhas das variedades cultivadas no Brasil (CDA, 2010). Além das diferenças visuais, a ferrugem marrom também difere da ferrugem alaranjada quanto à época de infestação, pois apresenta alta infestação nos primeiros meses de desenvolvimento da cultura e sazonalidade na manifestação de sintomas, com picos de incidências nos meses de junho a agosto e de novembro a janeiro, ou seja, ataca a cana jovem no período da primavera (GARCIA et al., 2007), enquanto a ferrugem alaranjada, apresenta sintomas predominantemente em canas semi-maduras a maduras (MAGAREY, 2000), com desenvolvimento do seu ciclo favorecido por verões e outonos úmidos e temperaturas amenas, prevalecentes entre os meses de janeiro e abril (STAIR, et al., 2004).

Apesar da presença da ferrugem alaranjada na indústria canavieira australiana ser observada desde 1880, somente em 2000, quando foi notificada a primeira epidemia na variedade Q124, a mais plantada do país, com predominância principalmente na região central da Província de Queensland, foram observadas perdas econômicas significativas (MAGAREY et al., 2001). Esses autores estimaram redução de produtividade de até 40% nos anos 2000/2001, enquanto que Braithwaite (2005) indicou ter havido perdas entre 150 e 210 milhões de dólares australianos, e Willcox e Croft (2004) perdas na colheita de 30%, representando AU$900.00 por hectare nesses anos.

Devido à sua alta eficiência de disseminação, após a ferrugem alaranjada ter causado a epidemia na Austrália, o patógeno chegou ao continente americano, inicialmente na Flórida, no Condado de Palm Beach, em julho de 2007, onde causou significativas perdas por infectar a variedade suscetível CP 80-1743, amplamente cultivada na região (COMSTOCK et al., 2008). Logo após, sua trajetória foi em sentido à América Central, sendo detectada na Costa Rica, onde se distribuiu por todas as plantações comerciais de cana do país, com maior impacto na variedade SP71-5574, que representava 83% da área plantada, causando uma redução de 31% na produtividade da região sul do país que passou de 59 $t.ha^{-1}$ na safra de 2006-2007 para 45 $t.ha^{-1}$ na safra 2007-2008. Na Guatemala, a doença foi registrada pela primeira vez em 7 de setembro de 2007, na variedade CP72-2086, porém sem

nenhum efeito importante na produção das duas safras subsequentes. Semanas depois a doença foi observada na Nicarágua, onde afetou consideravelmente a indústria sucroalcooleira do país (OVALLE et al., 2009). No Panamá, em Natá, Província de Coclé, os primeiros sintomas foram observados de janeiro a fevereiro de 2008, na variedade SP 74-8355; em seguida, no México, em 17 de julho de 2008, em Tuxtla Chico, Chiapas, nas variedades Mex 57-1285, Mex 61-230 e Co 301, e em El Salvador, de agosto de 2008 a janeiro de 2009, no cultivar CP 72-2086, em 117 áreas produtoras de cana-de-açúcar em várias localidades do país (FLORES et al., 2009).

No continente africano, os primeiros sintomas da ferrugem alaranjada foram observados em Zuénoula, Costa do Marfim, em julho de 2009 nas cvs. SP 71-6180 e Co 997. Um ano depois, maio de 2010, essas mesmas cultivares apresentaram sintomas da ferrugem alaranjada em Borotou, também na Costa do Marfim, e em Camarões, em Mbandjock e Nkoteng, onde a doença foi notificada nas cultivares D 88172, 87482 FR, e RB 72-454 e nos clones RCmr 08/319 e RCmr 08/1121 (SAUMTALLY et al., 2011). Segundo os autores, este foi o primeiro relato confirmado de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar na África ocidental e central, região a partir da qual a ferrugem marrom da cana-de-açúcar foi introduzida para o Hemisfério Ocidental.

No Brasil, a primeira notificação da ferrugem alaranjada foi em dezembro de 2009, no município de Rincão, interior de São Paulo, observando-se, em seguida, no início de 2010, sua ocorrência na região central do Estado, com consequente alastramento da doença para plantações do Paraná, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo e Minas Gerais (CTC, 2011). Atualmente, novas ocorrências estão sendo notificadas, sendo confirmada em fevereiro de 2011 a presença da ferrugem alaranjada na região nordeste, com detecção nos Estados do Rio Grande do Norte, Alagoas e Pernambuco.

2.2.2 Influência do clima na ocorrência da ferrugem alaranjada

Investigando duas variáveis climáticas, umidade relativa e temperatura do ar, Magarey et al. (2004b) estabeleceram condições ideais para a germinação de esporos da *P.kuehnii*. Os autores objetivaram avaliar as similaridades entre a favorabilidade de localidades para germinação de esporos e a severidade da

doença, apesar da germinação dos esporos não ser a única a condicionar a ocorrência de doenças foliares. Eles observaram que houve um pico na germinação dos esporos durante as noites de verão, quando a temperatura (T) é mais amena e a umidade relativa (UR) é alta, enquanto que no inverno, houve uma diminuição na incidência da doença, devido às condições de Te UR não serem adequadas para a germinação dos esporos, processo que exige umidade relativa acima de 97% e temperatura do ar entre 17 e 24°C.

De acordo com CDA (2010) e Martins (2010), os esporos de *P. kuehnii* germinam em uma ampla faixa de temperatura, 5 a 34°C e 10 a 25°C, respectivamente, e umidade relativa acima de 90%, sendo descritas por CDA (2010) como condições ótimas T entre 19 e 26°C e UR entre 98 e 99%. Martins (2010), ainda observou maior crescimento do tubo germinativo na faixa de 20°C e condições mais propícias para a infecção, com formação de pústulas maiores e maior severidade da doença, entre 20 e 25°C.

Vasudeva (1958) apud Egan (1964) foi um dos primeiros a observar a germinação dos esporos da ferrugem alaranjada e afirmou que “germinavam facilmente em água com temperatura ótima entre 20 e 25°C, embora a germinação ocorresse entre 16 e 29°C”, e que os urediniósporos “permaneciam viáveis até cinco semanas sob condições de frio, porém perdendo sua viabilidade rapidamente em tempo quente”. De acordo com o sistema SCORALERT (2011), a esporulação máxima ocorre 11 dias após a formação dos esporos em temperaturas entre 22 e 30°C, sendo a temperatura ótima a de 26°C.

Em relação à disseminação dos esporos a partir do monitoramento de urediniósporos em variedades suscetíveis à ferrugem, Sreeramulu e Vittal (1970) apud Magarey (2000) concluíram que o número de esporos é maior em dias secos com pico de incidência das 10 às 14 h, enquanto que Egan (1964) notou que a *P. kuehnii* disseminou-se mais durante os verões e outonos úmidos e amenos na Província de Queensland, Austrália, e Srinivasan e Chenulu (1956) apud Magarey (2000), observou maior avanço da doença nos meses mais frios na Índia.

De acordo com Martins (2010), o esporo de *P. kuehnii* em condições controladas requer no mínimo 8 h de molhamento foliar para apresentar sucesso em sua infecção. No entanto, as severidades mais intensas da ferrugem alaranjada foram observadas com molhamento foliar acima de 12h.

2.3 Interação entre doença e clima

A sinergia entre a agrometeorologia e a fitopatologia tem rendido uma série de sistemas de manejo de doenças de plantas, eficazes e economicamente viáveis, utilizados para avaliar o risco climático para doença e estabelecer o zoneamento agrícola. Para muitas culturas em que a resistência genética a doenças não é suficientemente alta, adota-se o controle químico para manutenção dos rendimentos aliado ao conhecimento do clima para determinação do melhor momento de controle da doença (GILLESPIE E SENTELHAS, 2008).

Segundo Stair et al. (2004), há diversas variáveis climáticas que podem influenciar o desenvolvimento de uma doença nas diferentes fases de seu ciclo, os quais permitem o uso de modelos de previsão de surtos da doença a partir do monitoramento das condições climáticas.

Del Ponte et al. (2006), estudando o surto epidemiológico da ferrugem da soja, apontou para a necessidade desses modelos para avaliar e prever o risco da ferrugem em diferentes escalas geográficas. Eles observaram que uma característica comum na maioria dos modelos da doença é a integração de dados meteorológicos que interferem no ciclo de vida do fungo, sendo a dinâmica da epidemia, que varia de um campo a uma escala continental, fortemente influenciada pelas condições ambientais. Os autores afirmam que todos os fatores considerados para compreensão da epidemia da ferrugem da soja dizem respeito a cada um dos componentes do clássico triângulo da doença - "hospedeiro, patógeno e ambiente", sendo evidenciado empiricamente que as condições ambientais, essencialmente impulsionadas por fatores meteorológicos específicos, fornecem o estímulo ao patógeno e a resposta do mesmo em fases específicas do seu ciclo de vida.

Para Magarey et al. (2001), para atribuir um valor de severidade os modelos da doença consideram principalmente variáveis como temperatura, que afeta todas as fases da doença da planta, e umidade, importante para o processo de infecção (germinação e penetração) e liberação de esporos, sendo a duração do período de molhamento foliar (DPM) considerada como fator decisivo para desencadear um processo infeccioso. Esse binômio “temperatura – DPM” condiciona efetivamente o estabelecimento dos patógenos (Pereira et al., 2002). Uma vez que a DPM não pode ser considerada como sendo unicamente uma variável meteorológica, devido à sua variabilidade espacial estar associada às características do dossel, há variação do

molhamento entre as diferentes partes da planta, o que resulta em níveis variados de infecção na cultura (Santos, 2006).

Apesar de fundamental para o entendimento de uma epidemia, o uso da DPM em modelos epidemiológicos para o mapeamento de zonas de risco climático torna-se inviável, devido tanto à dificuldade de sua medida, por demandar aquisição e instalação de sensores específicos, como de sua estimativa, por meio de modelos físicos, que levam em consideração o balanço de energia, e/ou empíricos, em que se utilizam elementos meteorológicos e métodos estatísticos, os quais muitas vezes não estão disponíveis (MAGAREY et al., 2001). Para Magarey et al. (2001), temperatura e chuva são as principais variáveis para algumas doenças, como as ferrugens, além de serem os elementos meteorológicos de mais fácil obtenção, já que a rede de estações termo-pluviométricas é maior.

Considerando o risco de ocorrência do mal-das-folhas, Cecílio et al. (2006) realizaram o zoneamento agroclimático para a heveicultura no Estado da Bahia, adotando parâmetros do balanço hídrico climatológico, evapotranspiração real anual, déficit hídrico anual, excedente hídrico anual e precipitação total anual, para o estabelecimento de faixas de aptidão a estes parâmetros, adaptadas daquelas considerados por Ortolani (1985) e por Almeida et al. (1987) em Minas Gerais e no sudeste da Bahia.

Para o zoneamento agrícola do estado de São Paulo, a Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo (1974), adotou o excedente hídrico como indicativo de excesso de umidade e favorecimento de doenças.

De acordo com Del Ponte et al. (2011), estudos epidemiológicos têm mostrado que o fenômeno atmosférico-oceânico El Niño Oscilação Sul (ENOS), em suas fases quente (El Niño) e fria (La Niña), exercem influência sobre os padrões espaciais e temporais de doenças de plantas tais como a ferrugem do caule do trigo nos Estados Unidos e China, ergot do sorgo na Austrália e giberela no sul do Brasil, por influenciar a precipitação na parte Sudeste da América do Sul durante os meses de primavera austral, ocasionando aumento (El Niño) ou redução (La Niña)nos níveis de chuva. Os autores quantificaram e avaliaram a influência do ENSO na ocorrência da ferrugem da soja no sul do Brasil. Este estudo evidenciou a utilidade da aplicação das informações decorrentes do fenômeno ENSO na previsão de surtos sazonais da doença no Rio Grande do Sul, tomando por base um modelo empírico de estimativa da severidade final da ferrugem asiática da soja.

2.4 Modelagem epidemiológica

Modelando a influência climática nas epidemias, Del Ponte (2006) afirmou que duas estratégias são normalmente usadas para identificar fatores do clima e quantificar o seu efeito nos processos epidêmicos e aerobiológicos dos fungos. A primeira estratégia consiste na experimentação em ambiente controlado, a qual permite verificar o efeito isolado ou a interação de um ou mais fatores (temperatura, molhamento, luminosidade, radiação, etc.) em determinados processos de interesse no ciclo da doença (germinação de esporos, eficiência de infecção, período latente, etc.). A segunda estratégia se baseia na observação empírica do comportamento das epidemias no campo, de preferência, em um grande número de situações, as quais irão permitir se identificar e correlacionar taxas de intensidade das epidemias com as variáveis climáticas.

Vários estudos em ambiente controlado vêm sendo conduzidos em patossistemas para modelar o efeito de diversas variáveis ambientais em diferentes processos das doenças, tais como: temperatura na sobrevivência do patógeno (Kochman, 1979); radiação solar e ultravioleta na sobrevivência e germinação de esporos (Isard et al., 2006); temperatura na germinação de esporos (Bonde et al., 2007; Martins, 2010), formação de apressórios (Alves et al., 2006) e crescimento do germotubo (Bonde et al., 2007; Martins, 2010);interação de temperatura e molhamento foliar na infecção (Alves et al., 2006); temperatura na infecção (Alves et al., 2006; Bonde et al., 2007); duração do período latente e tamanho das lesões (Alves et al., 2006; Martins, 2010); intensidade e duração da luminosidade na severidade (Dias et al., 2007).

Já nas condições de campo, a modelagem do efeito da precipitação e temperatura nas epidemias foi demonstrada por meio de correlação empírica entre a severidade máxima da doença e variáveis climáticas por períodos de um ou dois meses durante o ciclo da cultura em vários locais e para grande número de anos na China (Tan et al., 1996 apud Del Ponte et al., 2006), no Brasil (Del Ponte et al., 2006) e na África do Sul (Del Ponte etal., 2005). Dentre os procedimentos de modelagem do efeito do clima tem sido usadas técnicas como simulação mecanística (Yang et al., 1991) e métodos de ajuste empírico como: regressão linear (Del Ponte et al., 2006, Tan et al.,1996; Alves et al., 2006), regressão não linear

(Reis etal., 2004), redes neurais (Batchelor et al., 1997) e lógica *fuzzy* (Kim et al., 2005a; Alves et al., 2007).

Três categorias ou gerações de aplicações dos modelos podem ser definidas de acordo com os objetivos e a maior ou menor complexidade de informação e tecnologias necessárias: 1) estudos de avaliação de risco e impacto potencial da doença; 2) sistemas de previsão com base em modelos climáticos; e 3) plataformas tecnológicas de monitoramento e previsão de risco de epidemias.

Na primeira situação, os estudos envolvem o uso de um modelo de concepção simples com variado número de parâmetros (Pivonia e Yang, 2006; Del Ponte et al., 2006), ou mesmo modelos mais elaborados e complexos, do tipo mecanístico, que usam diversos modelos, regras e informações em sua composição (Yang et al., 1991). Estes estudos objetivam determinar probabilidades de risco de componentes das epidemias uma vez que se utilizam registros históricos como variáveis de entrada nos modelos, usualmente com base no clima. Como exemplos de estudos para esse patossistema citam-se aqueles para: mapeamento de áreas com risco de epidemias a partir de modelos climáticos com base em períodos críticos para infecção usando dados climáticos históricos (Magarey et al., 2004a); para estimativa da probabilidade histórica de ocorrência de epidemias de diferentes intensidades (Del Ponte et al., 2005); estimativa de áreas favoráveis à sobrevivência do inoculo (Pivonia e Yang, 2004); estimativa da época de aparecimento da doença (Pivonia & Yang, 2006); estimativa de áreas com risco de disponibilidade de inóculo aéreo oriundo de determinados locais (Kim et al.,2005b); e estimativas de potencial de transporte de inoculo aéreo à longas distâncias (Isard et al.,2005).

No segundo tipo de aplicação, o desenvolvimento de modelos climáticos para previsão de ferrugem asiática durante a safra (Reis et al., 2004) seguiu um modelo antigo com base na estimativa de períodos críticos para a infecção, os quais são monitorados com base em variáveis meteorológicas medidas em estações automáticas.

As plataformas tecnológicas de informações de risco constituem a terceira e mais recente geração de aplicações de modelos para a previsão de risco das epidemias de ferrugem. A mais complexa é a americana PIPE (*Pest Information Platform and Extension*), que foi concebida como uma aplicação genérica, porém ajustada, em sua primeira versão, para a previsão de ferrugem asiática nos Estados Unidos. O sistema é integrador de vários componentes como monitoramento, base

de dados, modelagem, previsão, mapeamento e disseminação da informação sobre a ferrugem asiática (Isard et al., 2006). O sistema emprega informações geograficamente especializadas sobre as fontes de inoculo, informadas pela rede de laboratórios, e informações de risco geradas por um modelo que simula processos aerobiológicos e epidemiológicos da doença, denominado SRAPS (*Soybeanrust aerobiology prediction system*). Em sua parte operacional, o PIPE possui uma hierarquia de usuários que alimentam o sistema com informações sobre ocorrência de focos da doença, outros que manipulam e mantém o sistema em funcionamento e um grupo de especialistas que ajustam os modelos e interpretam os riscos gerados pelos modelos de simulação de esporos, previsão climática e outras camadas de informação.

No Brasil, a primeira plataforma tecnológica de alerta de risco sem usar, porém, um modelo climático, foi o sistema de alerta Embrapa Soja, em 2007, que reunia uma rede de laboratórios que reportava os focos de detecção da doença, sendo o risco avaliado quanto havia a presença do inoculo na região. Em seguida, foi criado o Consórcio Anti-Ferrugem, uma rede de combate à ferrugem asiática da soja, coordenado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) e vários segmentos da cadeia produtiva da soja, com o objetivo de manter um sistema unificado de controle da ferrugem asiática (Embrapa, 2012). A estratégia do Consórcio é disseminar as informações sobre a ferrugem através de ações como: 1) palestra-padrão, que reúne dados atualizados sobre a ferrugem asiática da soja, histórico da doença, condições favoráveis de disseminação do fungo causador da ferrugem, estratégias de monitoramento e controle, número e época de aplicações de fungicidas e tecnologia de aplicação desses produtos, entre outras informações importantes para o manejo da doença; 2) distribuição de cartilhas com informações detalhadas sobre a ferrugem, encaminhadas aos multiplicadores (assistência técnica); e, 3) previsão do monitoramento da dispersão do fungo causador da doença, através de laboratórios em 16 estados brasileiros, formando uma verdadeira rede de diagnose e identificação da ferrugem, sendo as informações geradas pelos laboratórios credenciados e pelas unidades de alerta repassadas à administração do Sistema de Alerta, página da internet administrada pela Embrapa Soja. Em nível regional, a plataforma desenvolvida pela Fundação ABC em Castro, PR, combina informações georeferenciadas sobre a localização de focos da doença e de

estimativas de risco climático por modelos em nível local com base em dados meteorológicos coletados em estações automáticas (Fundação ABC, 2012).

Para a avaliação do risco de ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Martins (2010) empregou informações de temperatura e duração do período de molhamento requeridas para a germinação dos esporos, obtidas em condições controladas, e dados climáticos de um período de 2002 a 2005 para avaliar o número de dias favoráveis à infecção, variável que foi espacializada para todo o estado. De acordo com esse mapa, a região de maior risco para a ocorrência da ferrugem alaranjada nos canaviais é a centro-norte do estado.

Mais recentemente,foi criado o sistema Scoralert (*Sugarcane Orange Rust Alert Network*), inicialmente para desenvolver e organizar estudos, informações e estratégias de prevenção, monitoramento, mapeamento da ocorrência, epidemiologia e controle da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, e também desenvolver métodos quantitativos e modelagem para avaliação de impactos econômicos da doença. O sistema promove a execução de uma série de ações com sequência e integração lógica para prevenir as perdas causadas pela ferrugem alaranjada, tais como: 1) levantamento de zonas de risco de epidemias da doença em função de características climáticas ótimas para sua ocorrência; 2) mapeamento das zonas de risco para a ferrugem alaranjada; 3) aperfeiçoamento de modelos matemáticos para cálculo do grau de favorabilidade ao aparecimento e desenvolvimento das ferrugens alaranjada e marrom da cana-de-açúcar; 4) desenvolvimento de estações agrometeorologias coletoras de dados, de baixo custo; 5) monitoramento de áreas com cana-de-açúcar para detectar a entrada da ferrugem alaranjada; 6) desenvolvimento de sistema *on line* de monitoramento, mapeamento espacial de zonas de risco, mapeamento temporal de janelas de favorabilidade; e 7) desenvolvimento de um sistema de previsão, alerta, recomendação e aviso para manejo integrado das ferrugens da cana-de-açúcar (Scoralert, 2011).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Levantamento da ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

O estudo foi iniciado com o levantamento das informações sobre a epidemia da ferrugem alaranjada e das condições climáticas favoráveis à sua ocorrência para a principal área produtora de cana-de-açúcar na Austrália, na Província de Queensland (Figura 1), a mais afetada pelo surto epidêmico da doença em 1999/2000, quando possuía 86% de sua área plantada com a variedade suscetível Q124. Em seguida, realizou-se o levantamento da ocorrência e da intensidade da ferrugem alaranjada no Estado de São Paulo durante a safra de 2009/2010, a partir de informações obtidas pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), junto às suas áreas experimentais e às usinas associadas, considerando-se levantamentos técnicos realizados para as variedades suscetíveis à ferrugem alaranjada (Figura 2), baseados na escala de avaliação de ferrugem do CTC (Amorim, 1987) (Figura 3), a qual atribui notas de 1, sem manifestação da doença, a 9, mais de 50% da área foliar da planta afetada pelo fungo.

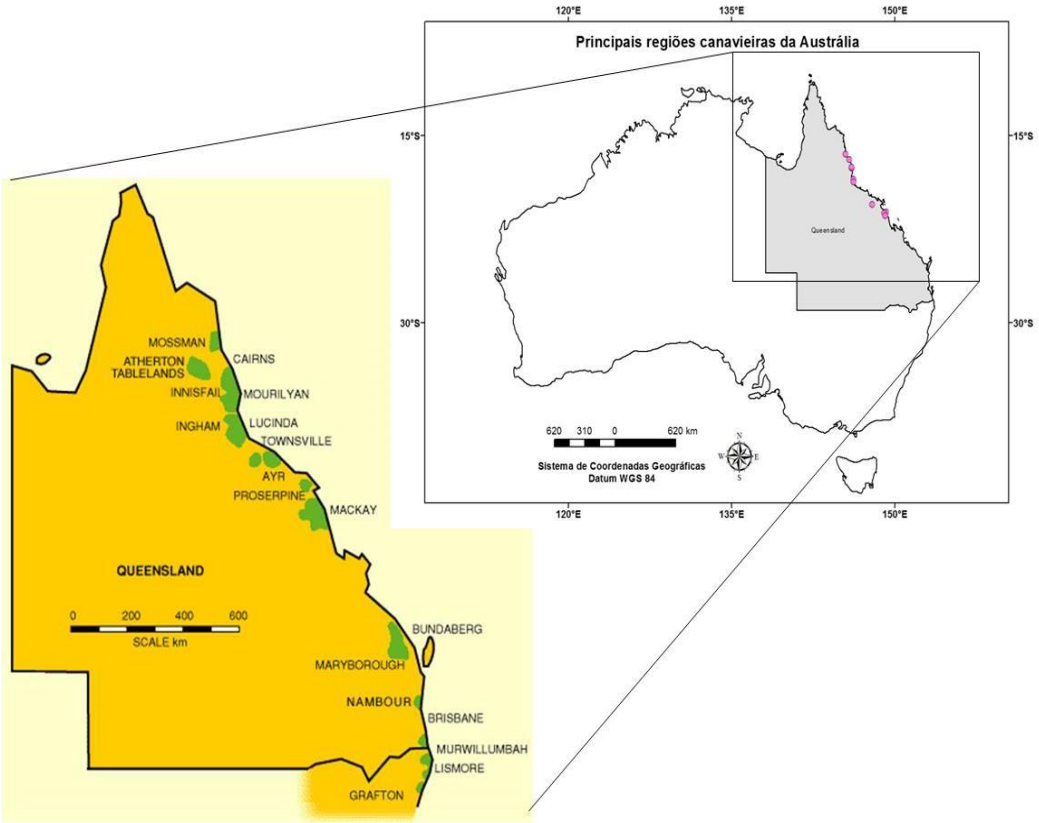

Figura 1 – Distribuição das áreas produtoras de cana-de-açúcar (em verde) na Província de Queensland, Austrália. Fonte: http://www.bundysugar.com.au/education/where

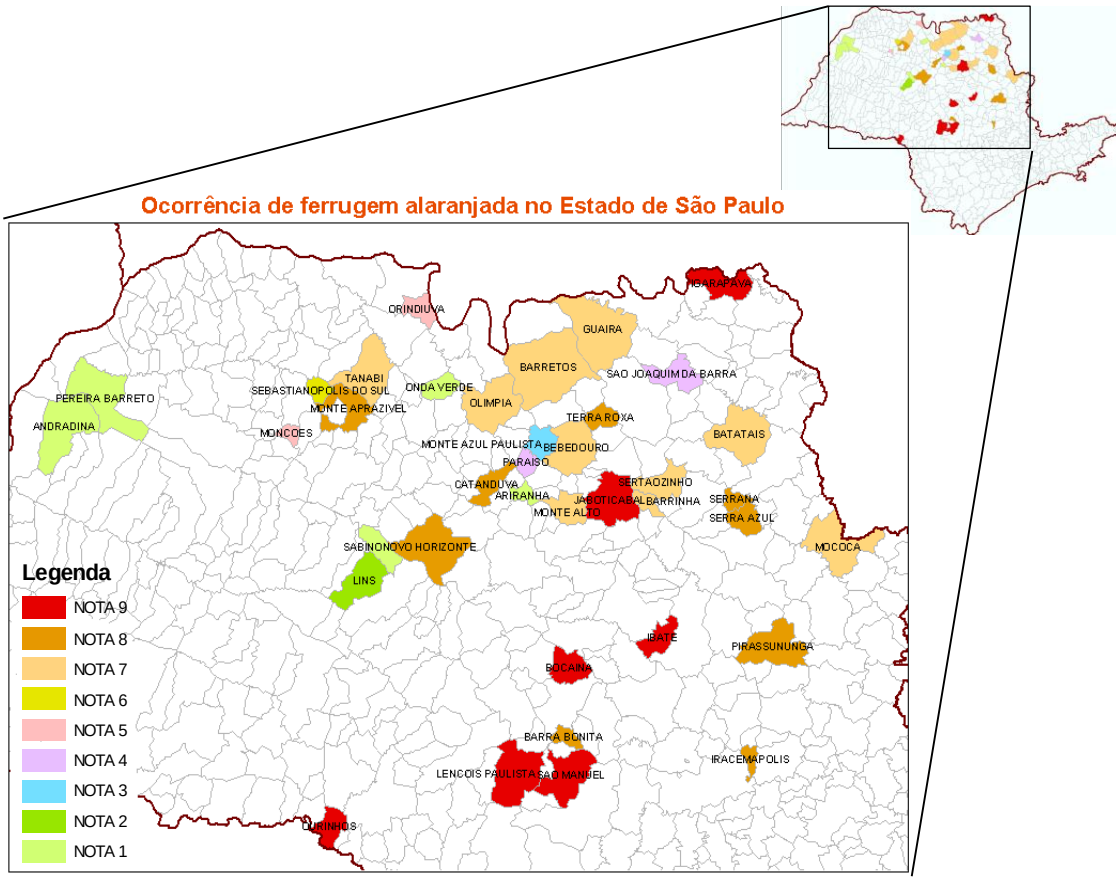

Figura 2 – Relação das localidades do Estado de São Paulo afetadas pela ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar e as respectivas notas atribuídas conforme a escala de avaliação de ferrugem. Fonte: CTC (2010)

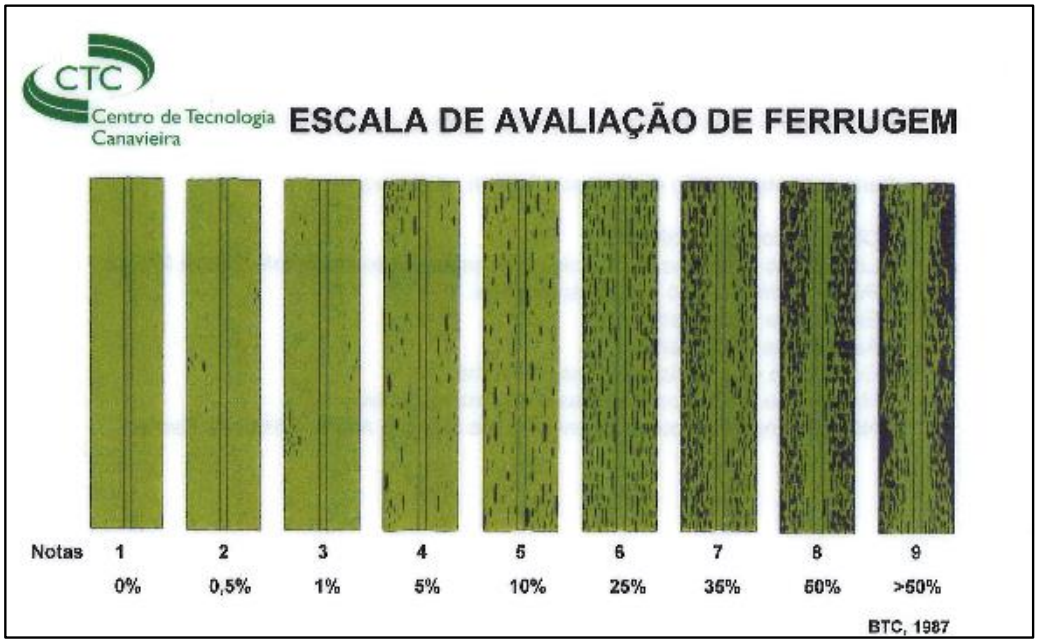

Figura 3 – Escala de avaliação da severidade da ferrugem em folhas de cana-de-açúcar, adotada pelo CTC. Fonte: Amorim et al. (1987)

3.2 Dados meteorológicos, análises climáticas e estabelecimento dos fatores climáticos favoráveis à ferrugem alaranjada

Foram analisados 30 anos (1980/2009) de dados meteorológicos de chuva e temperatura do ar para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar na província de Queensland, provenientes das séries históricas do serviço meteorológico Australiano (*Australian Bureau of Meteorology*), e no Estado de São Paulo, obtidas junto aos bancos de dados do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) - Instituto Agronômico de Campinas (IAC), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e das usinas associadas ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC).

Foram realizadas análises comparativas para os dados de chuva e temperatura, média, máxima e mínima, para a série histórica e para os anos de ocorrência da doença, considerando-se os períodos de janeiro a junho para a Província de Queensland e, de setembro a fevereiro para o Estado de São Paulo, períodos considerados mais críticos para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar nessas regiões.

A análise da disponibilidade hídrica decendial, sazonal e anual, foi realizada por meio do balanço hídrico climatológico, proposto por Thornthwaite e Mather (1955), para valores de CAD de 100 mm, adotando-se a evapotranspiração potencial estimada pelo método de Thornthwaite (1948) ajustado pela temperatura efetiva (CAMARGO et al., 1999) e utilizando-se os programas *BHNorm* e *BHSeq* elaborados em planilha eletrônica por Rolim et al. (1998). Com os dados médios foram determinados os balanços hídricos normais pelo programa *BHNorm* e com a série de dados foram determinados os balanços hídricos sequenciais, para o ano 2000, para as várias localidades da Província de Queensland, e de 2009-10, para os diversos locais do Estado de São Paulo, com o programa *BHSeq*.

Após análises, as variáveis temperatura, chuva e excedente hídrico foram definidas como as principais condicionantes da ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar. O excedente hídrico foi um dos parâmetros considerados por indicar a presença de um ambiente mais úmido pois nessas condições o armazenamento de água no solo é máximo, logo, havendo água no solo a umidade do ar é mais elevada, já que a fonte de umidade para o ar é a umidade na superfície.

A fim de se identificar os níveis de favorabilidade dessas variáveis para a ocorrência da doença, compararam-se os excedentes hídricos da série histórica e a temperatura média, estabelecendo-se os fatores climáticos, definidos como o número de decêndios com excedente hídrico *(NDEXC)* e o número de decêndios com temperatura média ideal para a ocorrência da ferrugem *(NDTideal)*, considerada entre de 17 a 26°C e 20 a 25°C, todos para o período de setembro a fevereiro.

3.3 Severidade da ferrugem alaranjada e condições meteorológicas

Os dados de severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar de 40 locais do Estado de São Paulo (Figura 2) foram correlacionados com os parâmetros climáticos, *NDEXC* e *NDTideal,* considerando-se faixas de temperatura de 17 a 26°C e 20 a 25°C, para o período de setembro a fevereiro, gerando modelos de regressão linear múltipla com variáveis simples (*S*), sem correlação entre os parâmetros, e integradas (I), correlacionando-se os parâmetros (Equações 1 e 2):

$$Sev = a + b * NDEXC + c * NDTideal \quad \text{(Eq.1)}$$

$$Sev = a + b * NDEXC + c * NDTideal + d * NDEXC * NDTideal + e * NDEXC^2 + f * NDTideal^2 \quad \text{(Eq.2)}$$

em que: *Sev* é a severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar; *NDEXC* o número de decêndios com excedentes hídricos; *NDTideal* o número de decêndios com temperatura média ideal; *a* é o coeficiente linear da equação de regressão; e *b,c, d, e* e *f* são os coeficientes angulares da equação de regressão múltipla.

Esses valores de severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para as seis principais regiões canavieiras do Estado de São Paulo e para as regiões canavieiras da Província de Queensland foram analisados considerando-se os anos sob a influência do fenômeno atmosférico-oceânico El Niño Oscilação Sul (ENOS), em sua fase quente (El Niño) e fria (La Niña), classificados como forte, moderado e fraco, de acordo com informações obtidas do CPTEC (2011) (Tabela 1).

Tabela 1 - Anos sob a influência do fenômeno atmosférico-oceânico El Niño Oscilação Sul (ENOS), em sua fase quente (El Niño) e fria (La Niña)

Ano	ENOS	Ano	ENOS	Ano	ENOS
1980	El Niño Fraco	**1990**	El Niño Forte	**2000**	La Niña Moderado
1981	Neutro	**1991**	El Niño Forte	**2001**	Neutro
1982	El Niño Forte	**1992**	El Niño Forte	**2002**	El Niño Moderado
1983	La Niña Fraco	**1993**	Neutro	**2003**	Neutro
1984	La Niña Fraco	**1994**	El Niño Moderado	**2004**	El Niño Fraco
1985	Neutro	**1995**	La Niña Fraco	**2005**	Neutro
1986	El Niño Moderado	**1996**	Neutro	**2006**	El Niño Fraco
1987	El Niño Moderado	**1997**	El Niño Forte	**2007**	La Niña Forte
1988	La Niña Forte	**1998**	La Niña Moderado	**2008**	Neutro
1989	Neutro	**1999**	La Niña Moderado	**2009**	El Niño Fraco

3.4 Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*IFAC*)

A partir dos modelos de severidade determinou-se a severidade para 46 locais distribuídos no Estado de São Paulo (Figura 4 e Tabela 2), considerando-se séries de dados meteorológicos de 15 a 30 anos de dados provenientes do IAC, INMET e CTC, e para 40 locais distribuídos na Província de Queensland (Tabela 3), considerando-se séries de dados meteorológicos de 30 anos provenientes do serviço meteorológico australiano.

Figura 4 – Distribuição das localidades do Estado de São Paulo empregadas na determinação do Índice de Favorabilidade Climática para a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar *(IFAC)*. Fonte: CTC (2011)

Tabela 2 - Localidades do Estado de São Paulo empregadas na determinação do Índice de Favorabilidade Climática para a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (*IFAC*) e séries de dados meteorológicos consideradas

Localidades	**ø** (graus e décimos)	**λ** (graus e décimos)	**ξ** (m)	**Série**	**Localidades**	**ø** (graus e décimos)	**λ** (graus e décimos)	**ξ** (m)	**Série**
Adamantina	-21,67	-51,07	409	1980-2010	Osv. Cruz	-21,77	-50,90	479	1980-2010
Assis	-22,67	-50,37	527	1980-2010	Palmital	-22,80	-50,20	501	1993-2009
Bauru	-22,31	-49,06	500	1980-2010	Pariq.-Açu	-24,72	-47,87	44	1980-2010
Bebedouro	-20,83	-48,50	567	1993-2009	Paulínia	-22,77	-47,15	601	1980-2010
Buritama	-21,01	-50,15	391	1980-2010	Pedrinhas Pta	-22,82	-50,77	354	1980-2010
Campinas	-22,90	-47,07	678	1980-2010	Penápolis	-21,48	-50,11	410	1980-2010
Casa Branca	-21,77	-47,08	698	1980-2010	Piacatu	-21,59	-50,60	422	1980-2010
Cordeirópolis	-22,52	-47,45	648	1980-2010	Pindorama	-21,22	-48,93	587	1980-2010
Franca	-20,55	-47,42	978	1980-2010	Piracicaba	-22,73	-47,65	546	1980-2010
Igarapava	-20,05	-47,75	700	1993-2009	Pres. Prudente	-22,10	-51,37	430	1980-2010
Itapetininga	-23,58	-48,05	656	1980-2010	Quatá	-22,25	-50,70	550	1980-2010
Itararé	-24,25	-49,15	150	1993-2009	Rancharia	-22,23	-50,90	517	1993-2007
Jaboticabal	-21,25	-48,30	589	1980-2010	Registro	-24,48	-47,85	9	1980-2010
Jales	-20,27	-50,57	484	1980-2010	Rib. Preto	-21,17	-47,80	568	1980-2010
Jaú	-22,27	-48,57	555	1980-2010	São Carlos	-22,05	-47,96	829	1993-2009
J. Bonifácio	-21,07	-49,70	454	1980-2010	São Paulo	-23,50	-46,61	754	1980-2010
Jundiaí	-23,20	-46,87	721	1980-2010	São Simão	-21,48	-47,55	668	1980-2010
Limeira	-22,53	-47,45	639	1995-2009	Taquarituba	-23,53	-49,25	619	1980-2010
Manduri	-23,07	-49,35	570	1980-2010	Tarumã	-22,77	-50,52	477	1980-2010
Marília	-22,21	-49,93	652	1993-2009	Tupã	-21,93	-50,51	517	1993-2009
Matão	-21,60	-48,37	563	1980-2010	Tupi Pta	-21,38	-51,58	395	1980-2010
Mirandópolis	-21,01	-51,10	420	1996-2009	Ubatuba	-23,45	-45,07	4	1980-2010
Mococa	-21,47	-47,01	621	1980-2010	Votuporanga	-20,42	-49,97	498	1980-2010

Tabela 3 - Localidades da Província de Queensland, Austrália, empregadas na determinação do Índice de Favorabilidade Climática para a Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (*IFAC*) para a série de 30 anos (1980-2010) de dados meteorológicos

Localidades	ø (graus e décimos)	λ (graus e décimos)	ξ (m)	Localidades	ø (graus e décimos)	λ (graus e décimos)	ξ (m)
Barcaldine	-23,55	145,29	267	Mitchell	-26,49	147,98	337
Boulia	-22,91	139,90	162	Mount Isa	-20,74	139,48	381
Brigalow	-24,84	149,80	168	Musgrave	-14,78	143,50	79
Burketown	-17,74	139,55	6	Quilpie	-26,61	144,26	200
Camooweal	-19,92	138,12	231	Tambo	-24,88	146,26	395
Cardwell	-18,25	146,02	5	Taroom	-25,64	149,80	199
Charleville	-26,41	146,26	302	Weipa	-12,63	141,88	20
Coen	-13,94	143,20	199	Winton	-22,39	143,04	182
Croydon Township	-18,20	142,24	116	Mossman	-16,48	145,56	3
Cunnamulla	-28,07	145,68	189	Mourilyan	-17,55	146,00	18
Gayndah	-25,63	151,61	106	Cairns	-16,87	145,75	2
Happy Valley	-25,28	152,90	3	Innisfail	-17,53	146,03	10
Helidon	-27,55	152,12	155	Lucinda	-18,52	146,18	12
Horseshoe Lagoon	-26,31	148,58	358	Ingham	-18,65	146,22	12
Isisford	-24,26	144,44	203	Proserpine	-20,49	147,85	196
Kairi	-17,22	145,57	697	Marian	-21,13	149,22	30
Kowanyama	-15,48	141,75	10	Mackay	-21,16	149,04	26
Longreach	-23,44	144,28	192	Plane Creek	-21,39	149,12	30
Mareeba	-17,13	145,43	594	Bundaberg	-24,89	152,35	109
Miles	-26,66	150,18	302	Maryborough	-25,52	152,72	249

Os valores estimados de severidade para a série histórica disponível foram empregados na determinação do Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (*IFAC*), por meio da ponderação das severidades e cálculo de suas frequências (Equação 3):

$$IFACobs = \frac{(A_{1-2} * N_{1-2} * 0) + (A_{3-4} * N_{3-4} * 1) + (A_{5-6} * N_{5-6} * 3) + (A_{7-8} * N_{7-8} * 6) + (A_9 * N_9 * 10)}{\sum A} \quad \text{(Eq. 3)}$$

em que: *IFACobs* é o Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar observado; $\sum A$ o número total de anos da série; A_n o número de anos em que a nota “n” ocorreu, sendo n = 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 e 9; N_n a nota de severidade estimada; e os valores *0, 1, 3, 6 e 10* os fatores de ponderação para cada faixa de notas de severidade “n”.

Para as regiões em que não havia dados meteorológicos para se determinar a severidade estimada e assim se calcular o IFACobs, os valores de IFAC foram

estimados por meio de modelos lineares, os quais foram obtidos correlacionando-se os valores de IFACobs com as coordenadas geográficas, latitude e longitude, e altitude, para as localidades em que os dados estavam disponíveis.Com foram gerados modelos de regressão linear múltipla (Equações 4 e 5) para a estimativa do IFAC*(IFACest)* para todo o Estado de São Paulo e para a Província de Queensland:

$$IFACest = a + b\phi + c\lambda + d\xi \quad \text{(Eq. 4)}$$

$$IFACest = a + b\phi + c\lambda + d\xi + e\phi\lambda + f\phi\xi + g\lambda\xi + h\phi^2 + i\lambda^2 + j\xi^2 \quad \text{(Eq. 5)}$$

em que: *IFACest* é o Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar estimado*; a* é o coeficiente linear da equação de regressão; *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *h*, *i* e *j* são os coeficientes angulares da equação de regressão múltipla; e ϕ, λ e ξ, respectivamente, são a latitude, longitude e a altitude da localidade.

3.5 Confecção dos mapas das zonas de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada

Para a espacialização do *IFAC* e a confecção dos mapas de favorabilidade climática para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar empregou-se o método da regressão linear múltipla, ou seja, com o modelo linear de *IFACest* em função das coordenadas geográficas, e altitude. Esse modelo foi convertido em mapa por meio do recurso de álgebra de mapas do Sistema de Informações Geográficas ArcGis 9.2, processando-se as variáveis independentes (latitude, longitude e altitude) como *layers* no formato *raster*.

O *layer* de altitude, em metros, foi obtido do modelo de elevação digital (MED) fornecido pela “NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)”, com resolução de 90 x 90 m. Os *layers* de latitude e longitude, em décimos de graus, foram computados utilizando-se as coordenadas centrais de cada pixel correspondente ao MED.

Os *layers* de latitude, longitude e altitude foram empregados juntamente com as equações 4 e 5 na ferramenta *Spatial Analyst – Raster Calculator,* afim de se calcular o *IFACest* para cada pixel de 90 x 90 m. Posteriormente, transformou-se

essa planilha contendo os *IFACs* de cada pixel em arquivo *shapefile* por meio do *Data – Export* para elaboração dos mapas.

3.6 Avaliação da favorabilidade climática para a ocorrência de ferrugem alaranjada

A avaliação da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada para o Estado de São Paulo e para a Província de Queensland foi feita a partir da delimitação dos níveis de IFAC, de acordo com as classes apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Classes de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar de acordo com Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da Ferrugem Alaranjada da Cana-de-açúcar (*IFAC*)

IFAC	Nível de Risco
0,0 – 2,0	Baixo
2,1 – 4,0	Moderado-Baixo
4,1 – 6,0	Moderado-Alto
6,1 – 8,0	Alto
8,1 – 10,0	Muito Alto

3.7 Validação dos resultados

Os dados provenientes dos dois tipos de abordagem foram analisados junto às equipes de fitopatologia, geo-processamento e agrometeorologia do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), para a validação dos mapas das zonas de favorabilidade climática para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das variáveis meteorológicas

Primeiramente, foram realizadas comparações entre dados de temperatura do ar e chuva médios normais e observados durante o surto epidêmico da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, em 2009/10, ambos na escala decendial, para o período de setembro a fevereiro, para dez localidades de ocorrência da doença nas seis principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São de Paulo (Figuras 5 e 6). Em seguida, compararam-se as médias de temperatura máxima e mínima e o total de chuva acumulada no período de setembro a fevereiro para a série histórica de 1980 a 2009 em relação ao ocorrido em 2009/10 (Tabela 5 e Figura 7). Análise semelhante foi realizada para a Província de Queensland, Austrália, para as principais áreas produtoras de cana-de-açúcar (Figura 1), comparando-se dados normais e médios com os observados em 2000, porém para o período de janeiro a junho (Tabela 6 e Figuras 8 e 9).

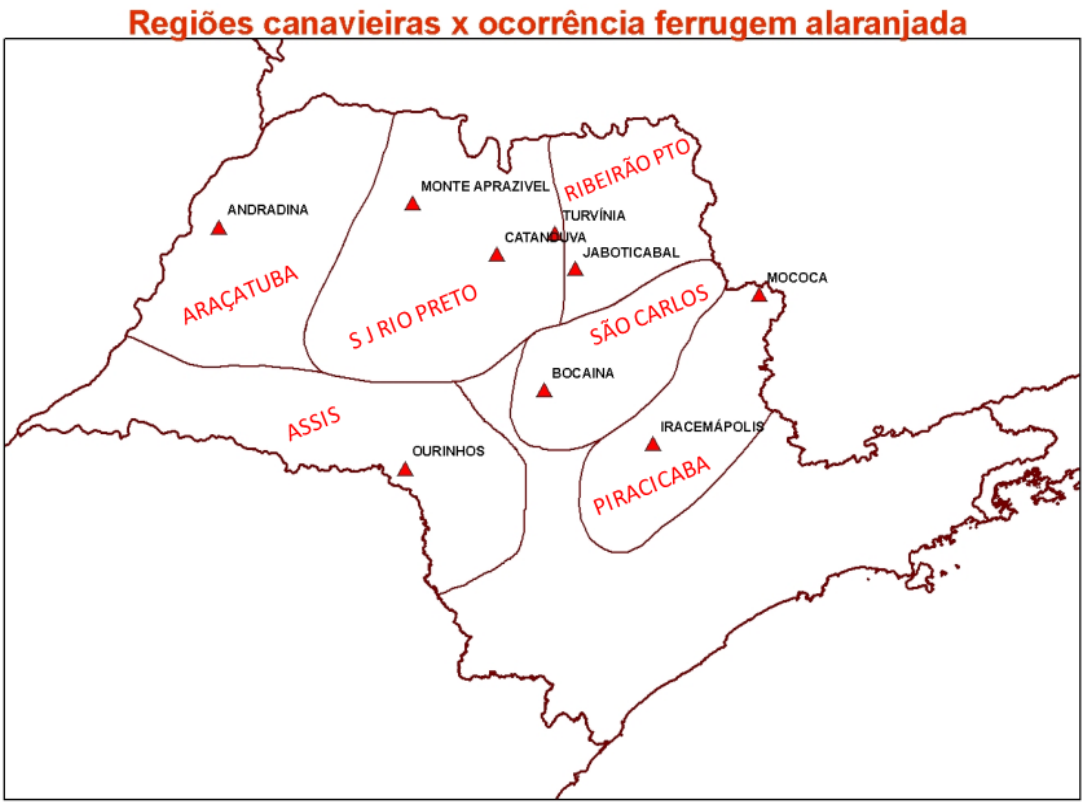

Figura 5 – Principais regiões canavieiras do Estado de São Paulo e locais com ocorrência da ferrugem alaranjada. Fonte: CTC (2011)

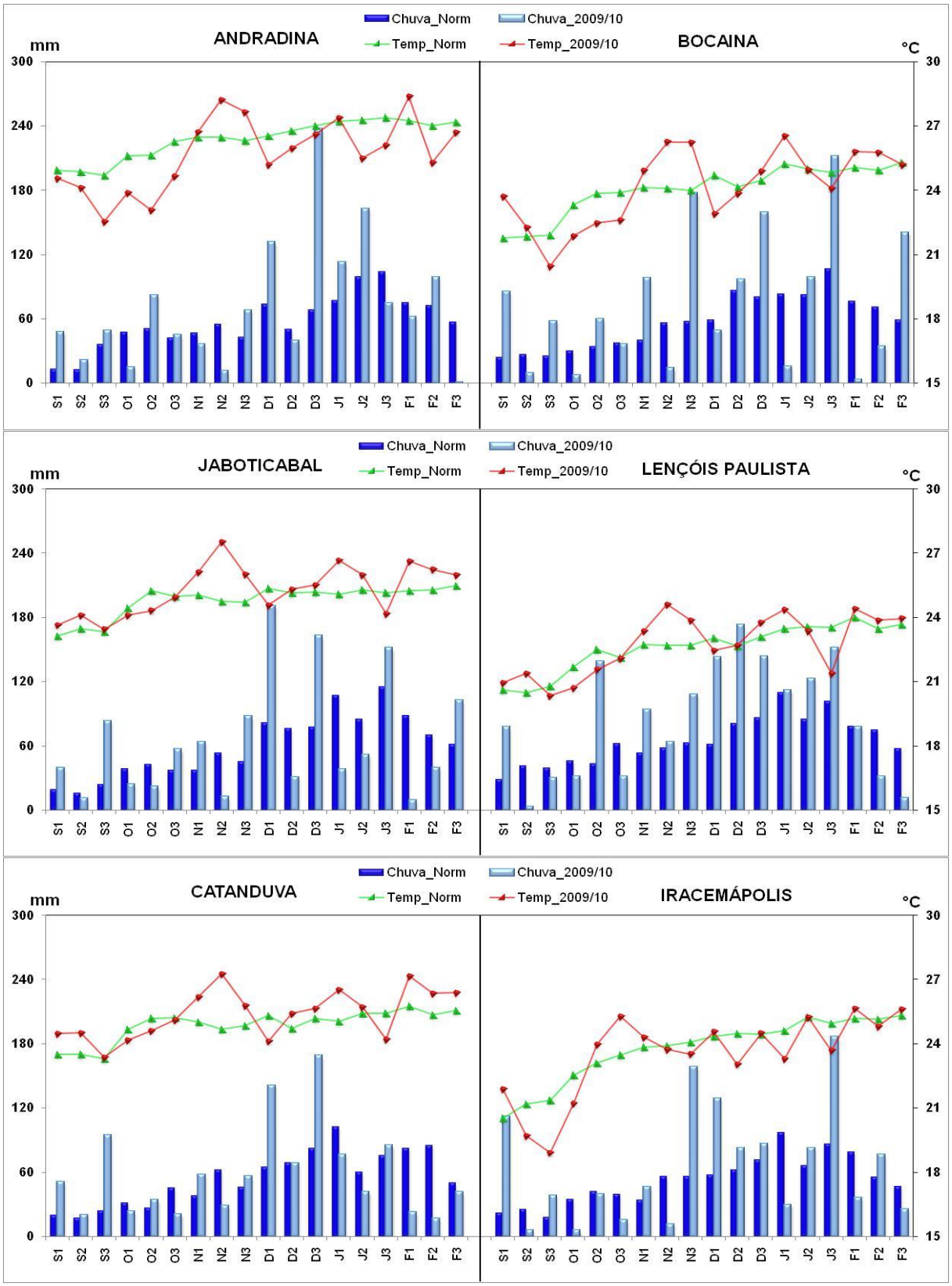

Figura 6 – Temperatura média e chuva decendiais normais (1980/2009) e observadas para 2009/10, entre os meses de setembro e fevereiro, para dez importantes regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(Continua)

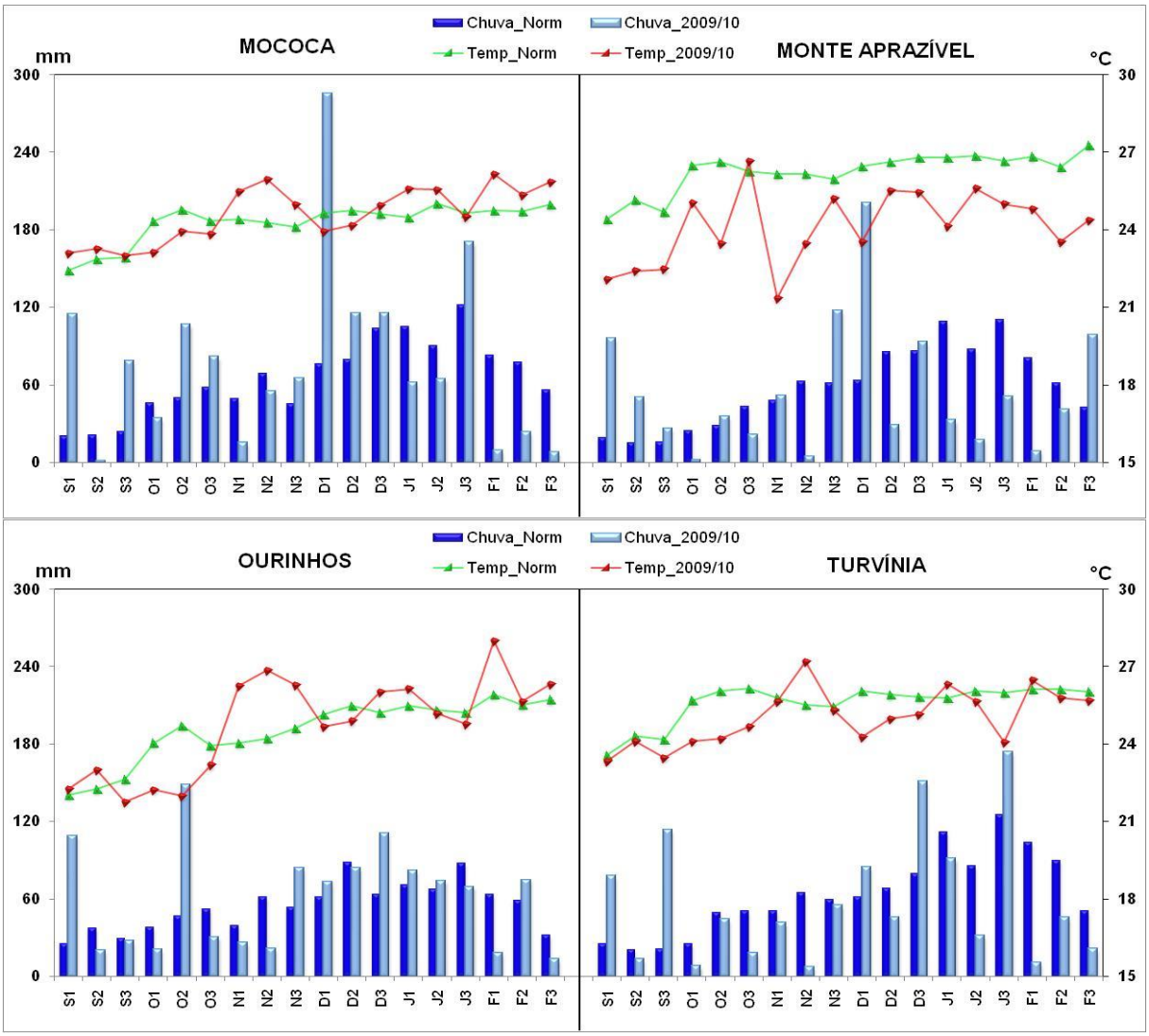

Figura 6 – Temperatura média e chuva decendiais normais (1980/2009) e observadas para 2009/10, entre os meses de setembro e fevereiro, para dez importantes regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(Conclusão)

Observou-se para os locais analisados no estado de São Paulo que em 50% deles as temperaturas médias em 2009/10 foram predominantemente superiores aos valores normais, com 50% ou mais dos decêndios apresentando valores acima da média, enquanto que 30% deles apresentaram valores abaixo no normal, com destaque para Monte Aprazível, onde apenas no terceiro decêndio de outubro a temperatura média foi acima da normal. Quanto às temperaturas máximas e mínimas, respectivamente, em 50 e 70% dos locais os valores apresentaram-se acima dos índices normais (Figura 6 e Tabela 5).

Tabela 5 – Média da temperatura máxima e mínima decendial e chuva normais (1980-2009) e observadas entre setembro de 2009 e fevereiro de 2010, para dez importantes regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo

Localidade	Temperatura máxima (°C)		Temperatura mínima (°C)		Chuva (mm)	
	2009/10	Normal	2009/10	Normal	2009/10	Normal
Andradina	31,1	31,9	20,3	20,8	1292	1023
Bocaina	30,9	29,8	17,4	18,3	1351	1035
Catanduva	30,4	30,5	20,4	19,2	1042	976
Iracemápolis	30,5	29,9	18,5	17,6	1162	944
Jaboticabal	30,8	30,6	19,8	19,0	1173	1072
Lençóis Paulista	28,5	28,5	16,9	16,7	1539	1166
Mococa	30,1	29,7	19,1	18,9	1398	1172
Monte Aprazível	29,6	32,1	18,7	20,4	968	1041
Ourinhos	30,5	30,8	19,0	18,3	1079	972
Turvínia	30,4	32,0	19,7	19,1	1026	1138

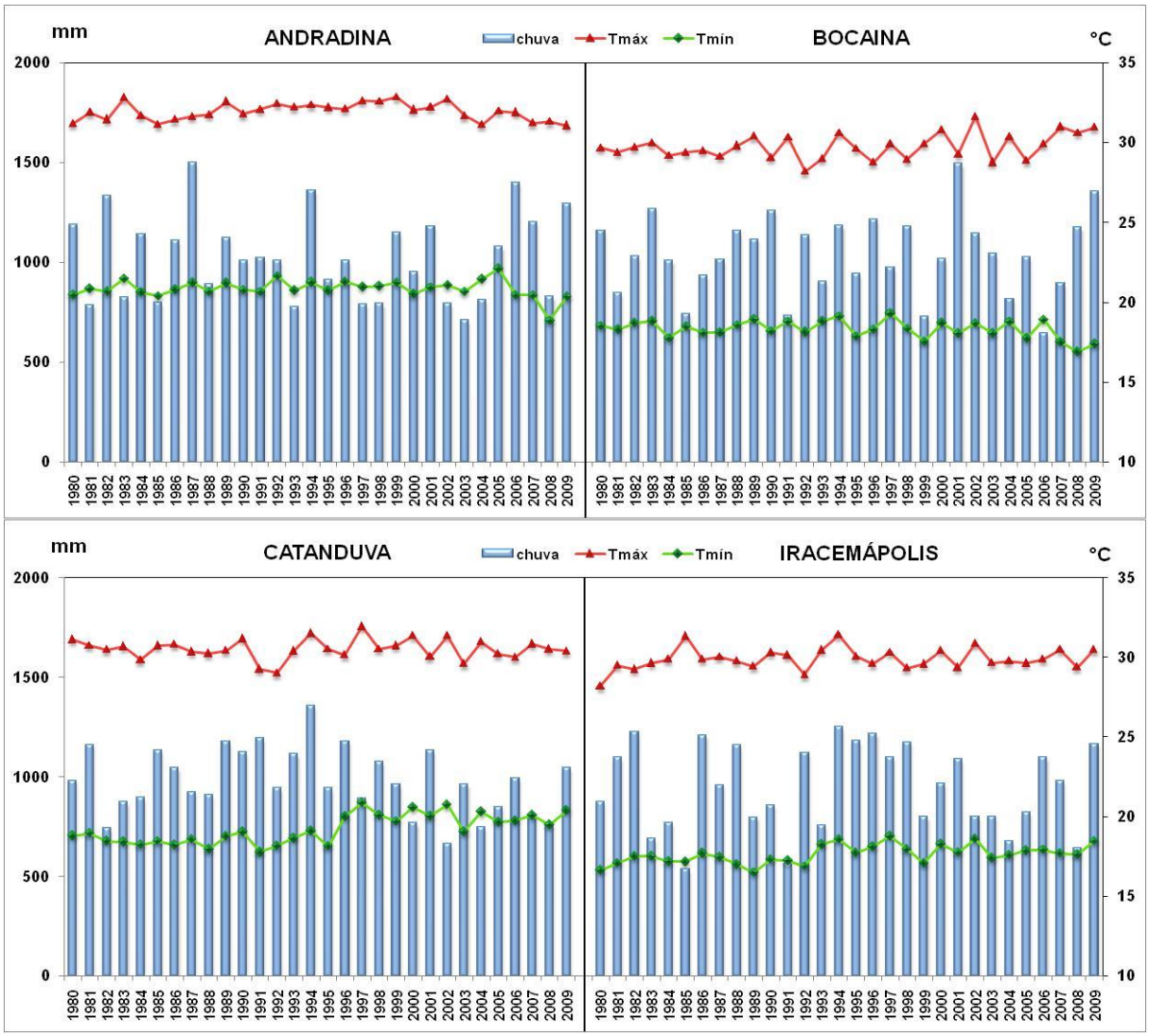

Figura 7 – Chuva acumulada e médias das temperaturas máximas e mínimas para o período de setembro a fevereiro para os anos de 1980 a 2009, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(Continua)

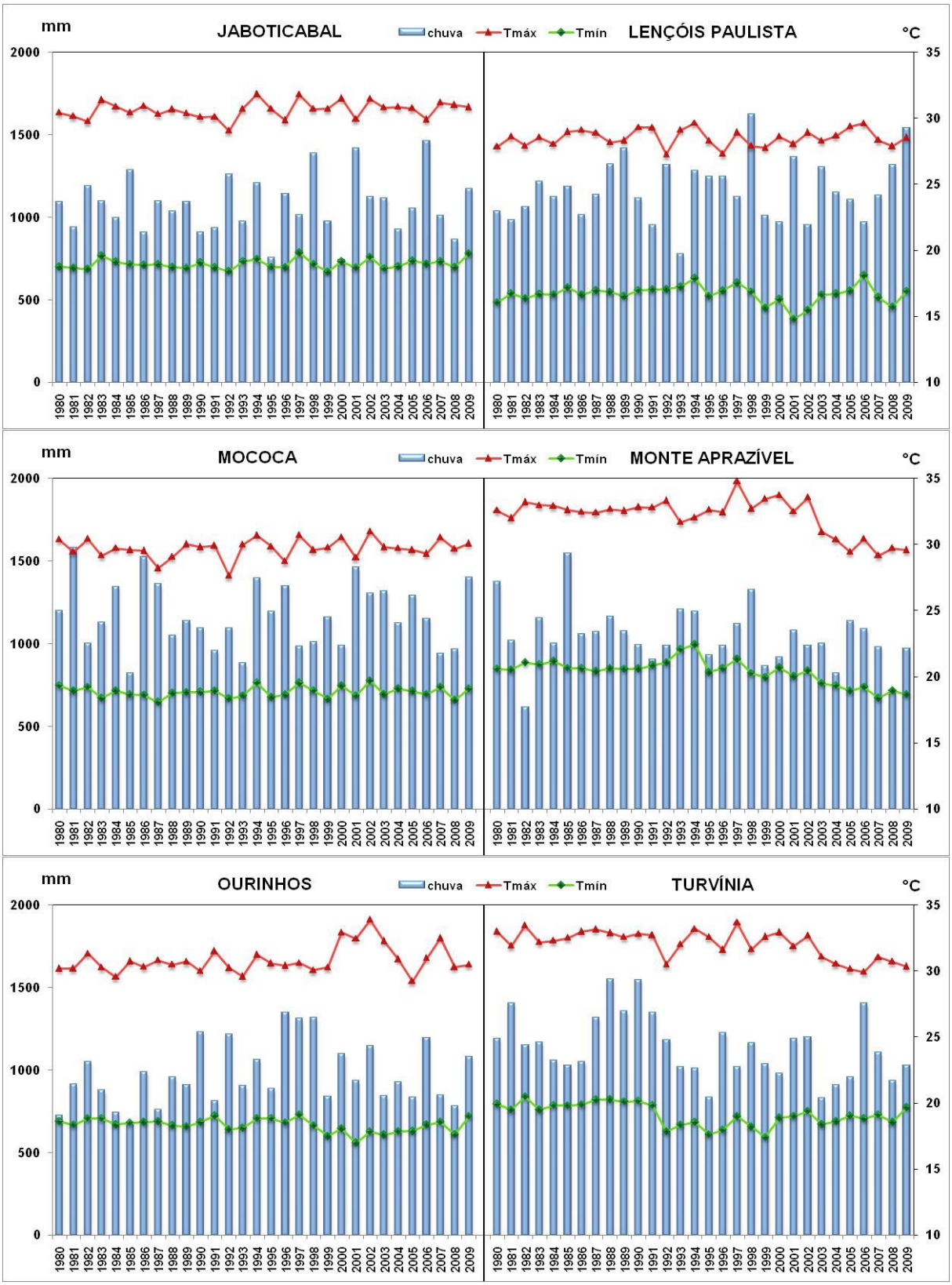

Figura 6 – Chuva acumulada e médias das temperaturas máximas e mínimas para o período de setembro a fevereiro para os anos de 1980 a 2009, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo .....(Conclusão)

Com relação à chuva, pode-se observar que os maiores aumentos no volume precipitado em relação à condição normal foram observados no primeiro decêndio de dezembro de 2009 e no primeiro e terceiro decêndios de fevereiro de 2010, com destaque para Iracemápolis e Turvínia, onde foram observados aumentos de 427 e 433%, respectivamente. Em 80% dos locais a quantidade de chuva em 2009/10 foi superior aos valores normais, com aumento máximo de 32% em Lençóis Paulista e aumento médio para todas as localidades de 14%. As únicas exceções ocorreram em Monte Aprazível e Turvínia, onde houve um ligeiro decréscimo das chuvas de 2009/10 em relação à normal, da ordem de 7 a 10%, respectivamente (Tabela 5).

Analisando-se a Figura 7, observa-se que para a grande maioria das localidades as chuvas do período de setembro a fevereiro de 2009-10 foi uma das dez mais intensas da série histórica, com exceção apenas para Monte Aprazível e Turvínia. Em Bocaina e Lençóis Paulista, a chuva acumulada entre setembro e fevereiro de 2009-10 foi a segunda maior da série histórica, enquanto que nas localidades de Andradina, Catanduva, Iracemápolis, Jaboticabal e Ourinhos, essa chuva acumulada esteve entre a quarta e a décima mais elevada para o período de 1980-81 a 2009-10.

Tabela 6 – Média da temperatura máxima e mínima e chuva normais (1980/2009) e observadas para o ano 2000, para o período de janeiro a junho, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália

Localidade	Temperatura máxima (°C)		Temperatura mínima (°C)		Chuva (mm)	
	2000	Normal	2000	Normal	2000	Normal
Mossman	27,9	27,7	19,8	18,1	2428	1706
Cairns	27,4	28,1	21,0	21,9	2360	1531
Innisfail	26,9	27,4	19,3	20,4	3391	2601
Mourilyan	27,1	27,5	19,2	20,3	3292	2423
Lucinda	27,2	28,1	19,0	19,9	2300	1584
Ingham	27,2	28,1	19,0	19,9	1946	1596
Proserpine	27,9	28,3	16,4	17,8	1511	862
Mackay	26,6	27,3	16,7	17,8	1815	1086
Marian	26,6	27,3	16,7	17,8	1499	1078
Plane Creek	26,6	27,3	16,7	17,8	1703	1059

Diferentemente do observado para o Estado de São Paulo, as temperaturas médias, máximas e mínimas para Província de Queensland entre janeiro e junho apresentaram-se predominantemente abaixo das normais no ano de 2000 em relação às condições normais, com exceção apenas para a localidade de Mossman (Tabela 6). Observou-se entre os meses de janeiro e março e entre o segundo decêndio de maio e o mês de junho, temperaturas médias para o ano de 2000 abaixo das normais, mantendo-se próximas ou um pouco acima das mesmas no restante do período (Figura 8). Para as temperaturas máximas e mínimas, com exceção de Mossman, em 95% dos locais analisados apresentaram-se abaixo das normais. Esse resultado está de acordo com Stair et al. (2004), que afirmaram ser o ciclo de desenvolvimento da *P. kuehnii* favorecido por temperaturas mais amenas, prevalentes entre janeiro e abril. Para os volumes de chuva, assim como observado para o Estado de São Paulo, foram observados aumentos significativos no ano 2000 em relação aos normais, principalmente para os três decêndios de fevereiro e primeiro decêndio de abril, com destaque para Mackay e Proserpine (Tabela 6 e Figura 8), locais normalmente mais secos, que no terceiro decêndio de fevereiro apresentaram chuvas muito elevadas, da ordem de 412 e 433% acima do normal. Considerando-se a quantidade de chuva em todo o período estudado, os aumentos no total de chuva foram de 67 a 75% em 2000 em relação aos valores normais. O aumento médio, considerando-se todas as localidades, foi da ordem de 47% em relação ao normal (Tabela 6).

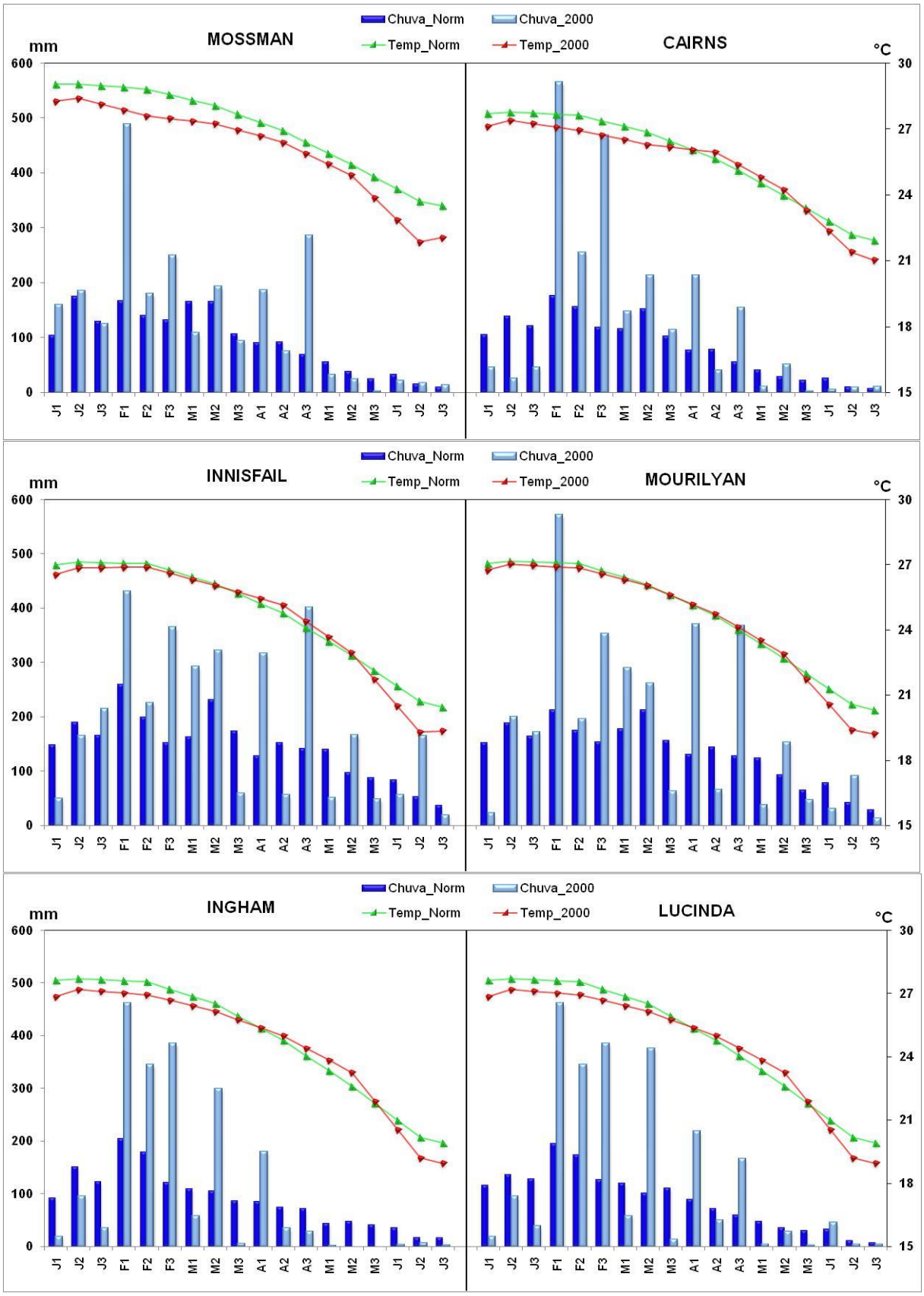

Figura 8 – Temperatura média e chuva decendiais normais (1980/2009) e observadas no ano 2000, entre os meses de janeiro e junho, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(continua)

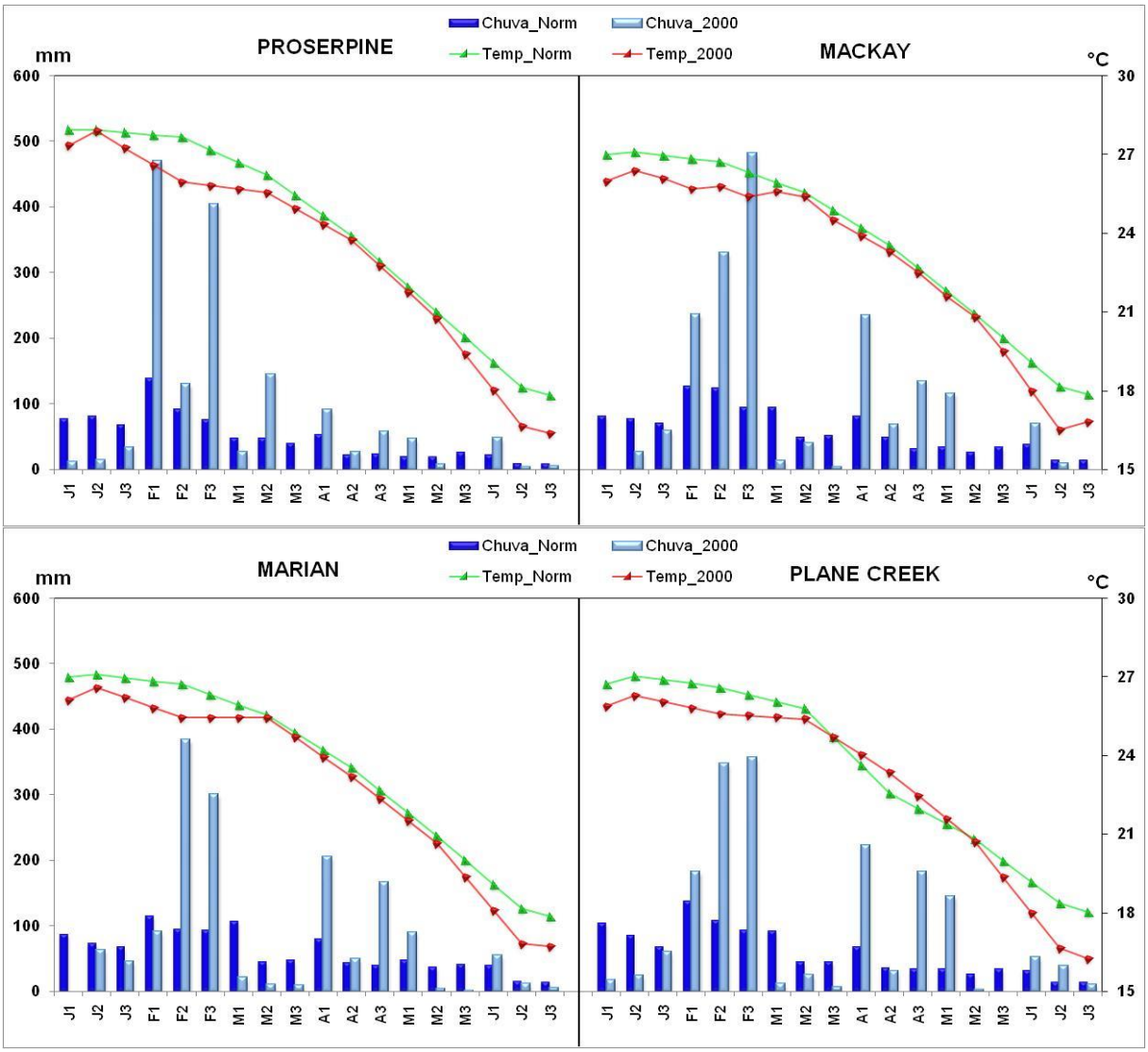

Figura 8 – Temperatura média e chuva decendiais normais (1980/2009) e observadas no ano 2000, entre os meses de janeiro e junho, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(conclusão)

Por meio da Figura 9, observa-se que para a grande maioria das localidades Australianas produtoras de cana-de-açúcar analisadas a chuva acumulada no período de janeiro a junho de 2000 foi uma das três mais elevadas para a série histórica analisada (1980-2009), sendo que em Cairns o referido período em 2000 foi o mais chuvoso, ao passo que em Proserpine e Mackay foi o segundo maior da série. Nas demais localidades o período foi o terceiro mais chuvoso da série.

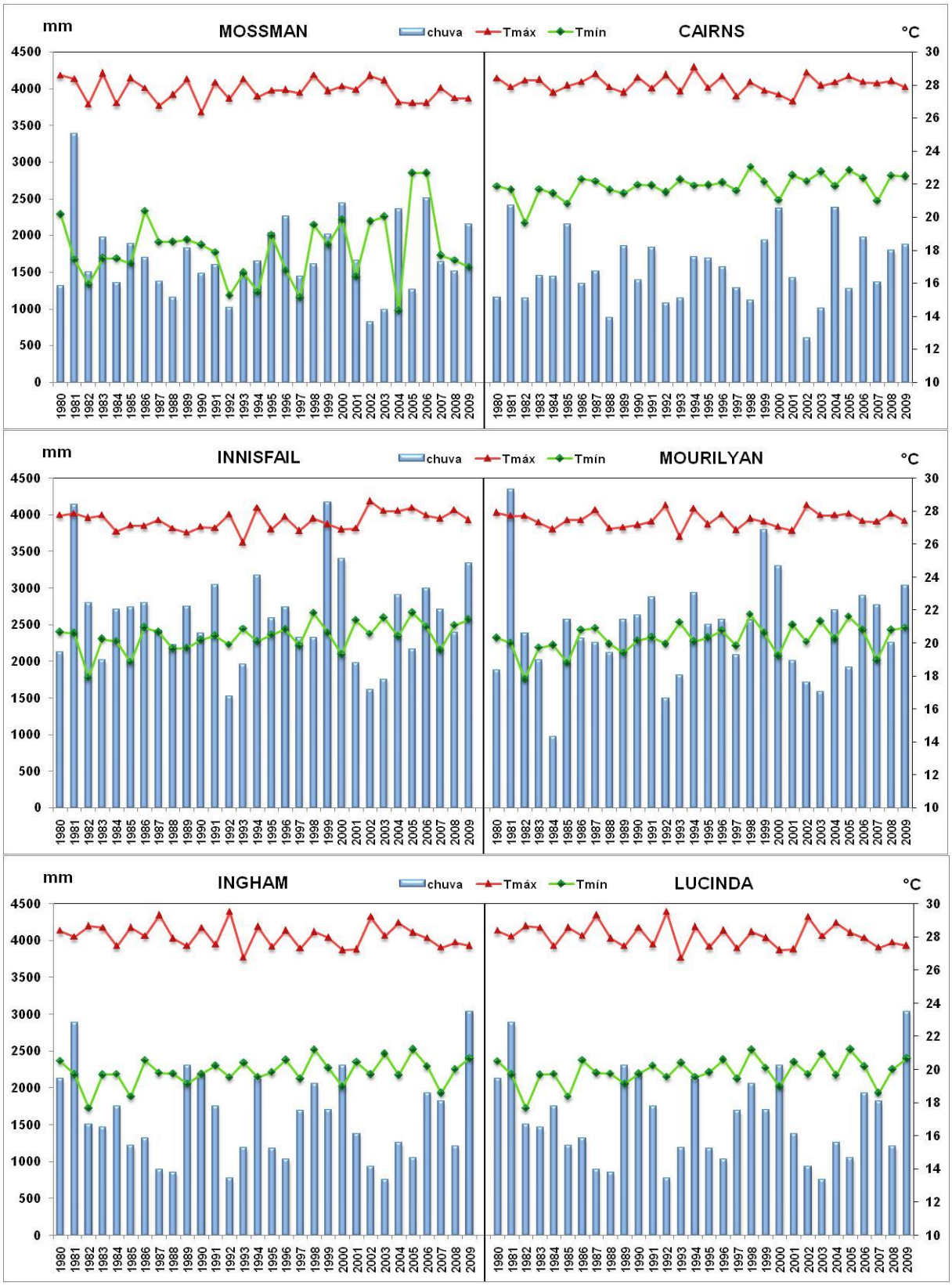

Figura 9 – Chuva acumulada e médias das temperaturas máximas e mínimas para o período de janeiro a junho para os anos de 1980 a 2009, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(continua)

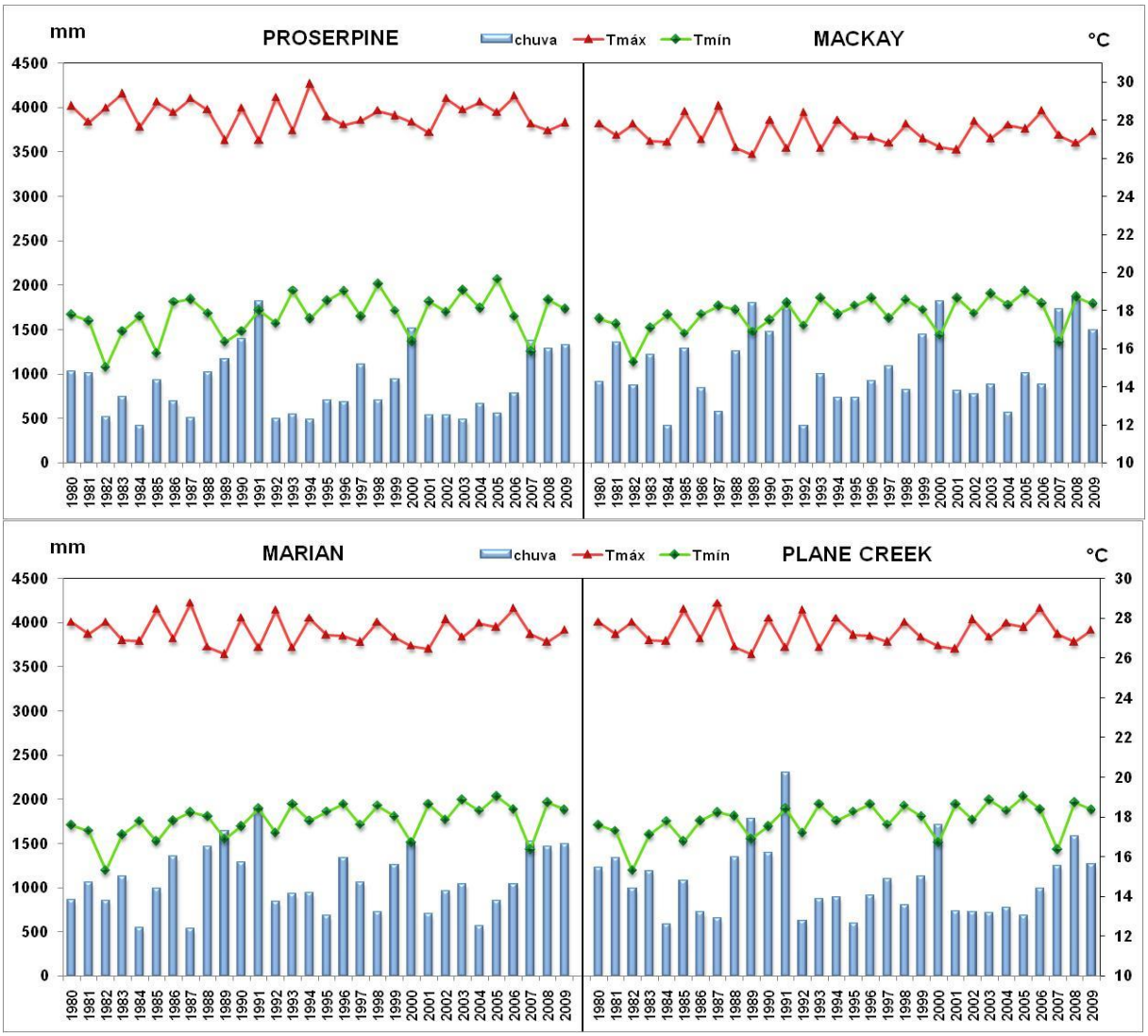

Figura 9 – Chuva acumulada e médias das temperaturas máximas e mínimas para o período de janeiro a junho para os anos de 1980 a 2009, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(conclusão)

4.2 Análise climática e definição dos fatores condicionantes da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

A partir de dados de chuva e temperatura média, ambos na escala decendial, para os meses de setembro a fevereiro para o Estado de São Paulo, e de janeiro a junho para a Província de Queensland, foram feitas comparações entre o balanço hídrico climatológico normal e sequencial para série histórica (1980-2009) em relação aos anos de ocorrência do surto epidêmico da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, respectivamente em 2009-10 e 2000. Essa análise teve por objetivo determinar os fatores climáticos condicionantes da ferrugem alaranjada (Tabelas 7 e 8 e Figuras 10 e 11). As análises das variáveis climáticas permitiram identificar que dois índices se mostraram bastante associados aos eventos dos surtos epidêmicos da ferrugem alaranjada, sendo eles o número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC*) e número de decêndios com temperatura média ideal (*NDTideal*), durante o período mais favorável à ocorrência da doença. As magnitudes dessas variáveis ao longo da série histórica avaliada para o Estado de São Paulo e para a Província de Queensland são apresentadas nas Figuras 12 a 16 e Tabelas 9 e 10.

Tabela 7 – Comparação entre os excedentes hídricos decendiais normais (1980/2009) e observados em 2009/10, entre setembro e fevereiro, e respectivos aumentos percentuais, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo

Localidade	Excedente hídrico (mm)		Aumento
	2009/10	Normal	%
Andradina	355	85	320
Bocaina	516	372	39
Catanduva	366	133	175
Iracemápolis	612	316	94
Jaboticabal	432	355	22
Lençóis Paulista	909	369	147
Mococa	772	553	40
Monte Aprazível	210	258	-19
Ourinhos	378	338	12
Turvínia	589	411	43

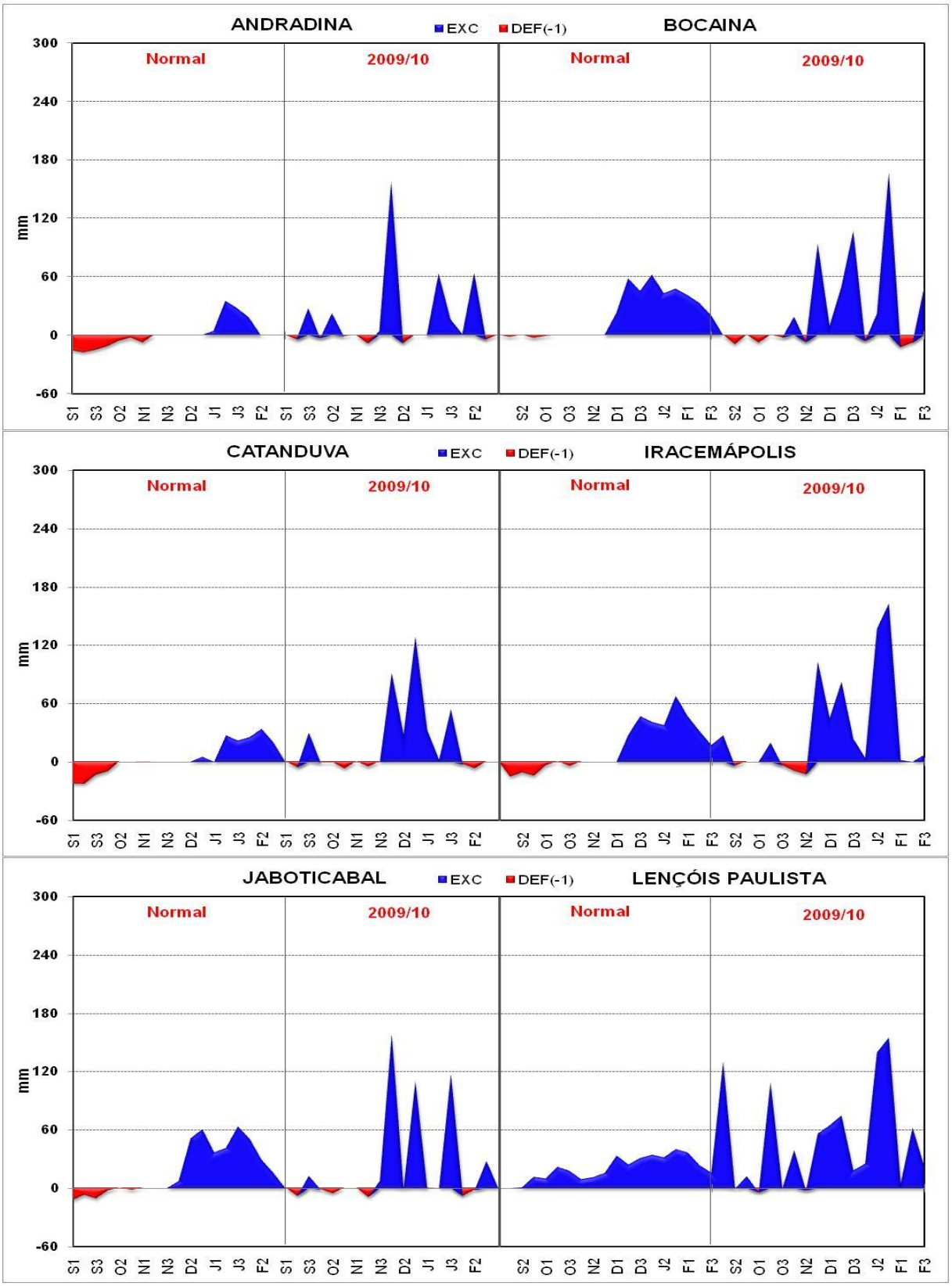

Figura 10 – Extrato do balanço hídrico climatológico normal (1980/2009) e sequencial (2009/2010), para os meses de setembro a fevereiro, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(continua)

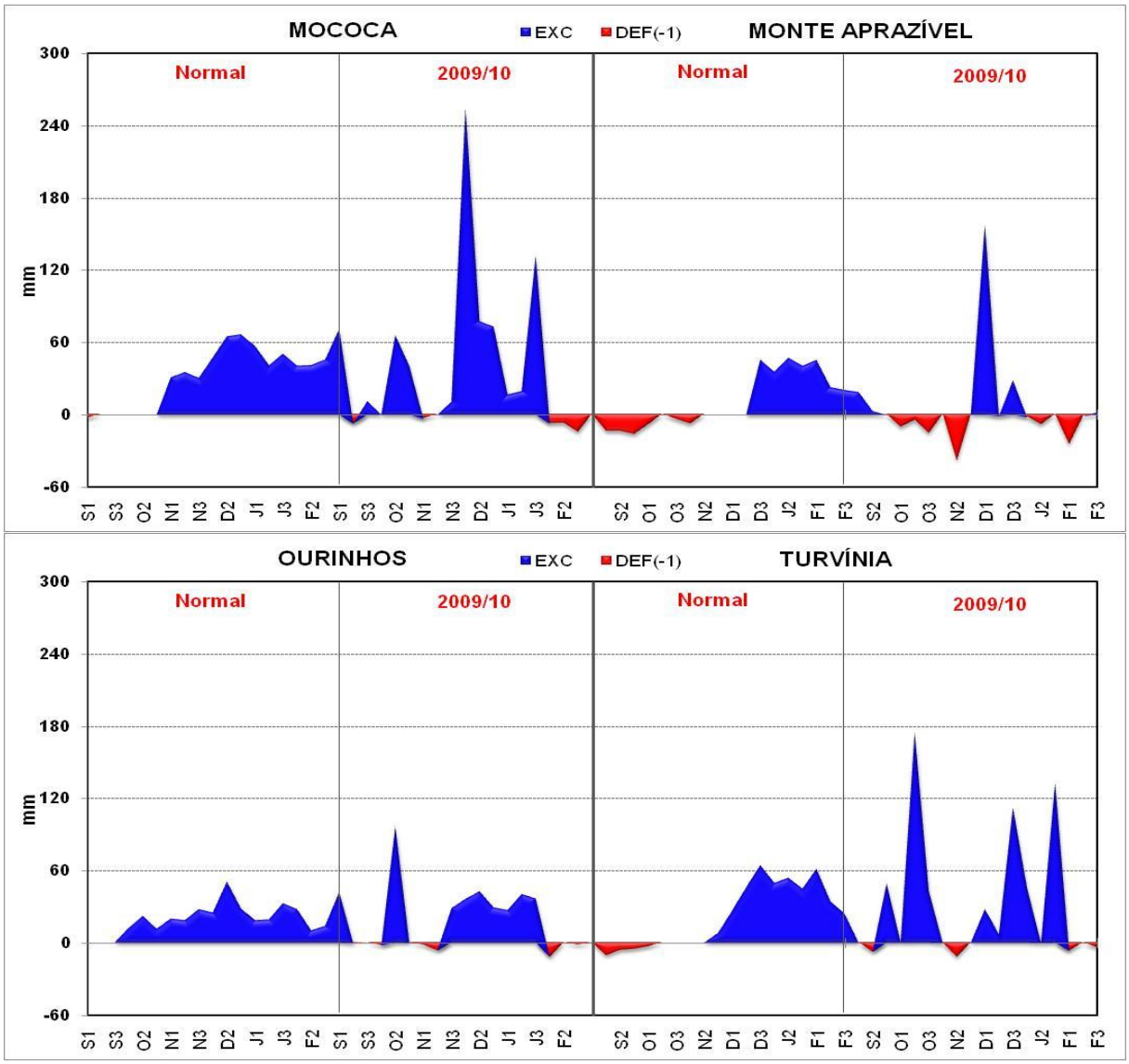

Figura 10 – Extrato do balanço hídrico climatológico normal (1980/2009) e sequencial (2009/2010), para os meses de setembro a fevereiro, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(conclusão)

Tabela 8 – Comparação entre os excedentes hídricos decendiais normais (1980/2009) e observados em 2000, entre janeiro e junho, e respectivos aumentos percentuais, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália

Localidade	Excedente hídrico (mm)		Aumento
	2000	Normal	%
Mossman	1961	1187	65
Cairns	1916	1004	91
Innisfail	2910	2092	39
Mourilyan	2815	1896	48
Lucinda	1514	1030	47
Ingham	1826	1034	77
Proserpine	981	215	355
Mackay	1438	621	132
Marian	1116	613	82
Plane Creek	1314	596	120

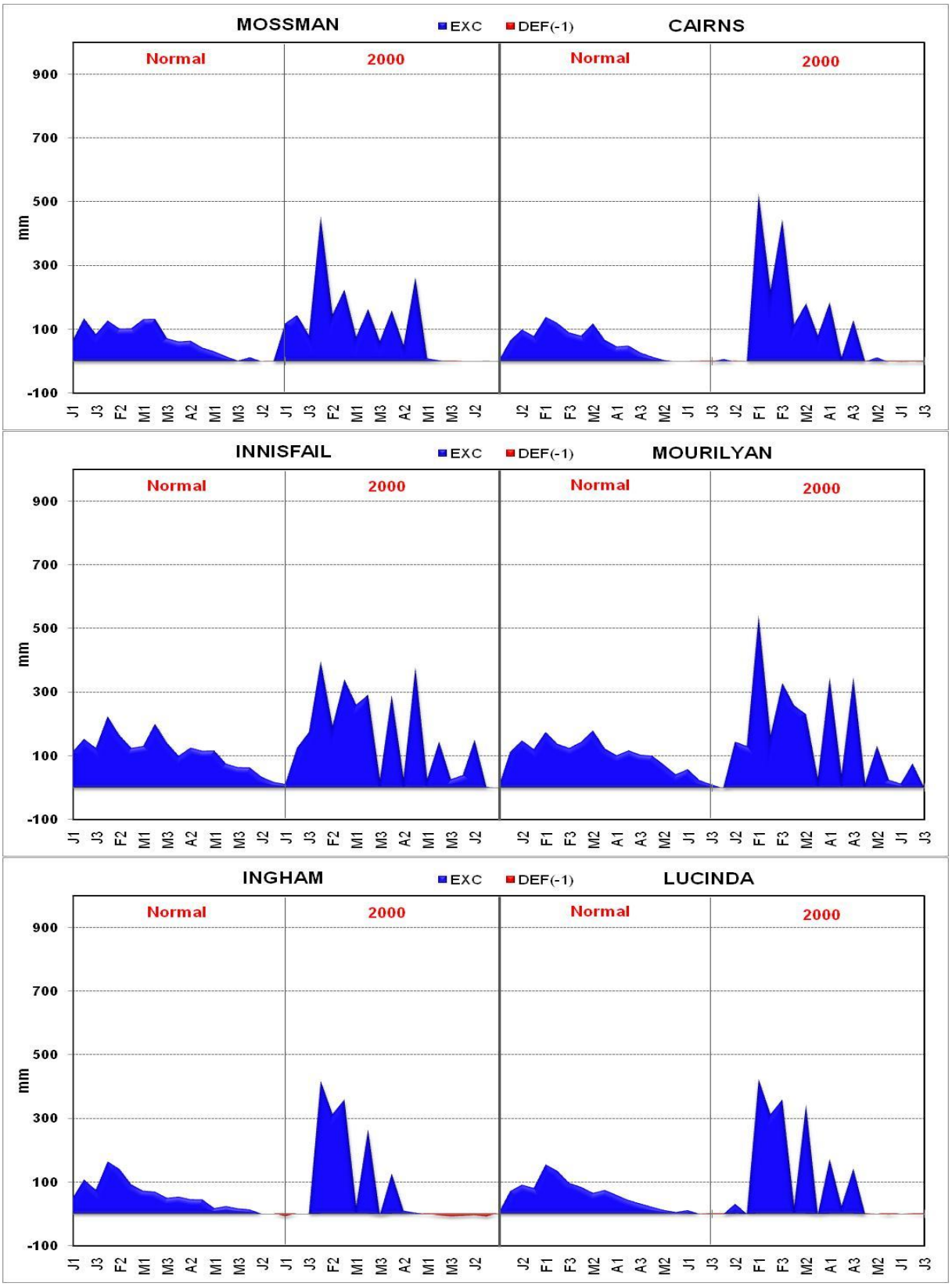

Figura 11 – Extrato do balanço hídrico climatológico normal (1980/2009) e sequencial (1999/2000) para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália..... .....(continua)

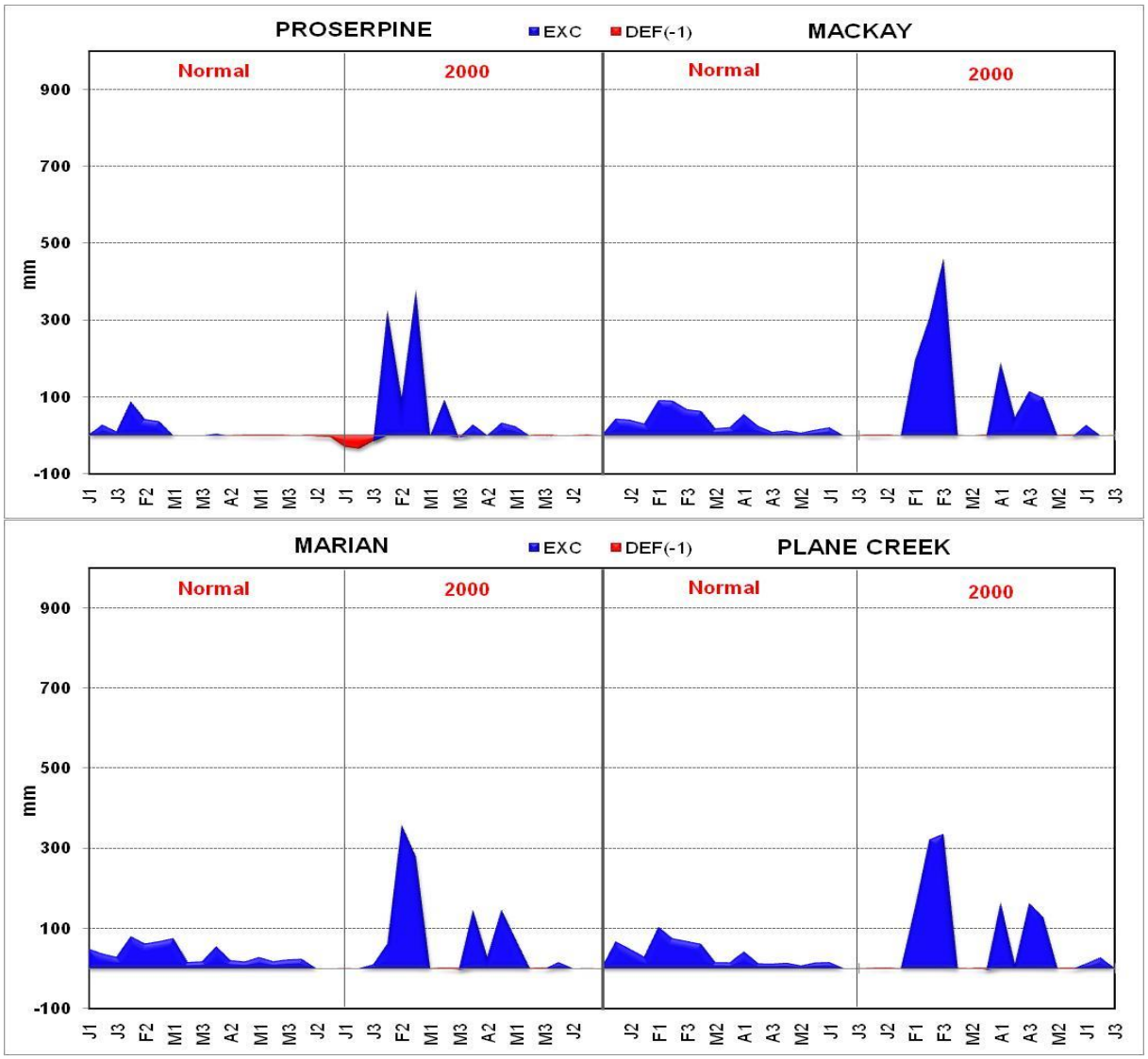

Figura 11 – Extrato do balanço hídrico climatológico normal (1980/2009) e sequencial (1999/2000) para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(conclusão)

Tabela 9 – Número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC)* e com a temperatura no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), para as faixas de temperatura de 17 a 26°C e 20 a 25°C, médios (1980-2009) e para 2009-10, entre os meses de setembro e fevereiro, para principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo

Localidade	NDEXC		NDTideal			
			17 a 26°C		20 a 25°C	
	2009/10	Médio	2009/10	Médio	2009/10	Médio
Andradina	11	3	6	8	3	4
Bocaina	12	7	15	16	12	12
Catanduva	7	6	15	16	12	11
Iracemápolis	13	5	15	16	9	12
Jaboticabal	6	7	12	15	8	10
Lençóis Paulista	14	8	18	18	18	15
Mococa	11	8	17	16	11	12
Monte Aprazível	5	6	12	7	6	3
Ourinhos	8	7	11	14	9	9
Turvínia	14	8	15	10	9	6

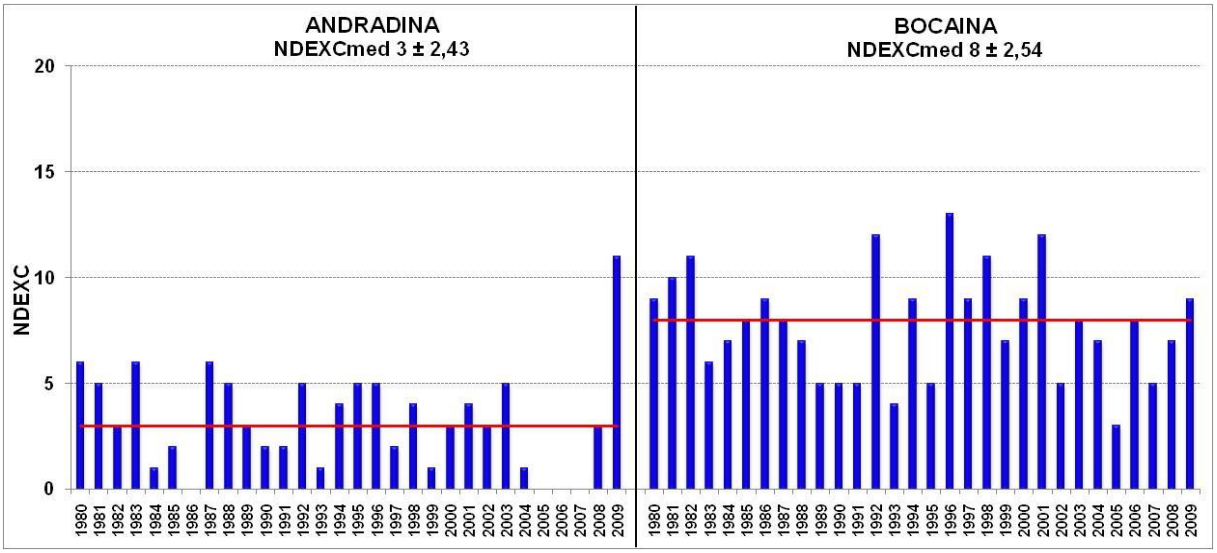

Figura 12 – Número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC)* entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(continua)

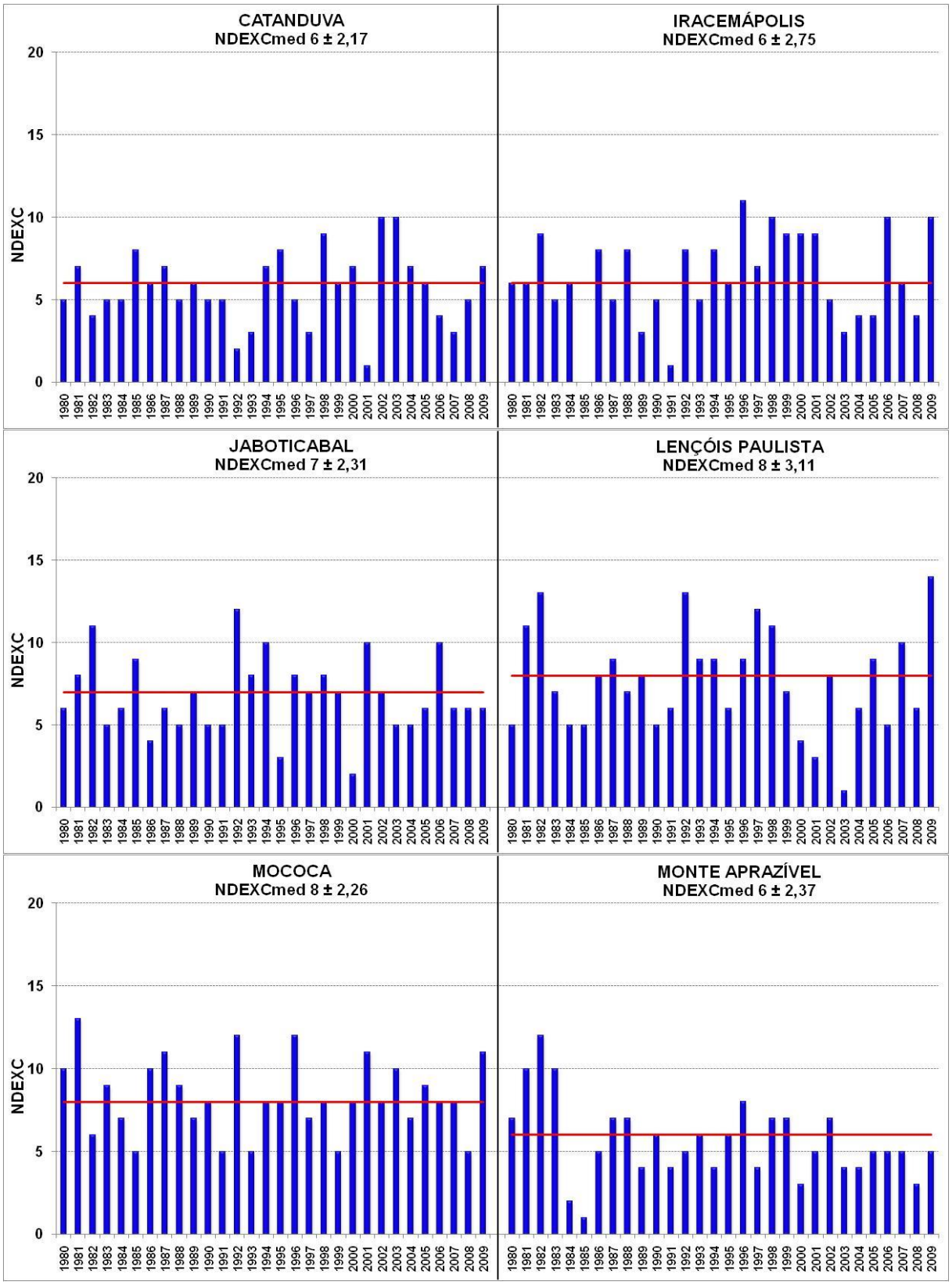

Figura 12 – Número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC)* entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(continuação)

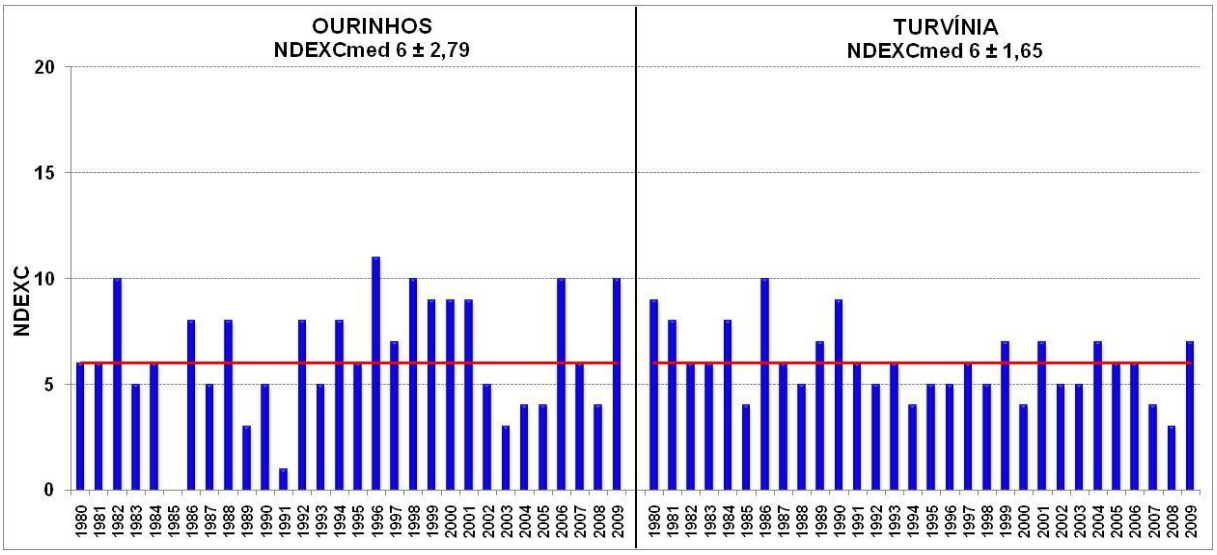

Figura 12 – Número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC)* entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(conclusão)

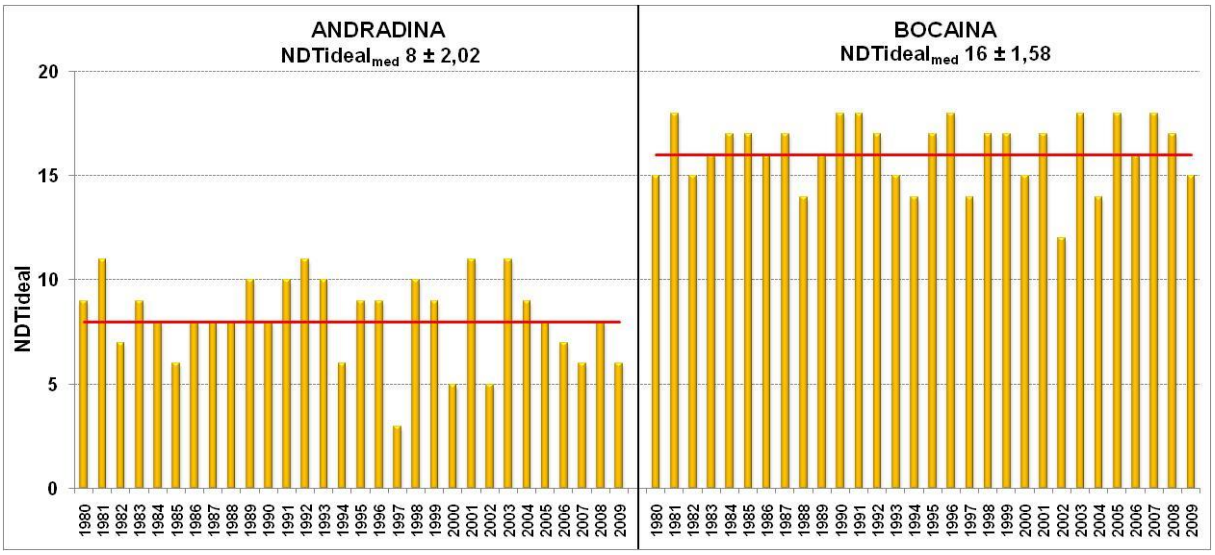

Figura 13 – Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), entre 17 e 26°C, entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(continua)

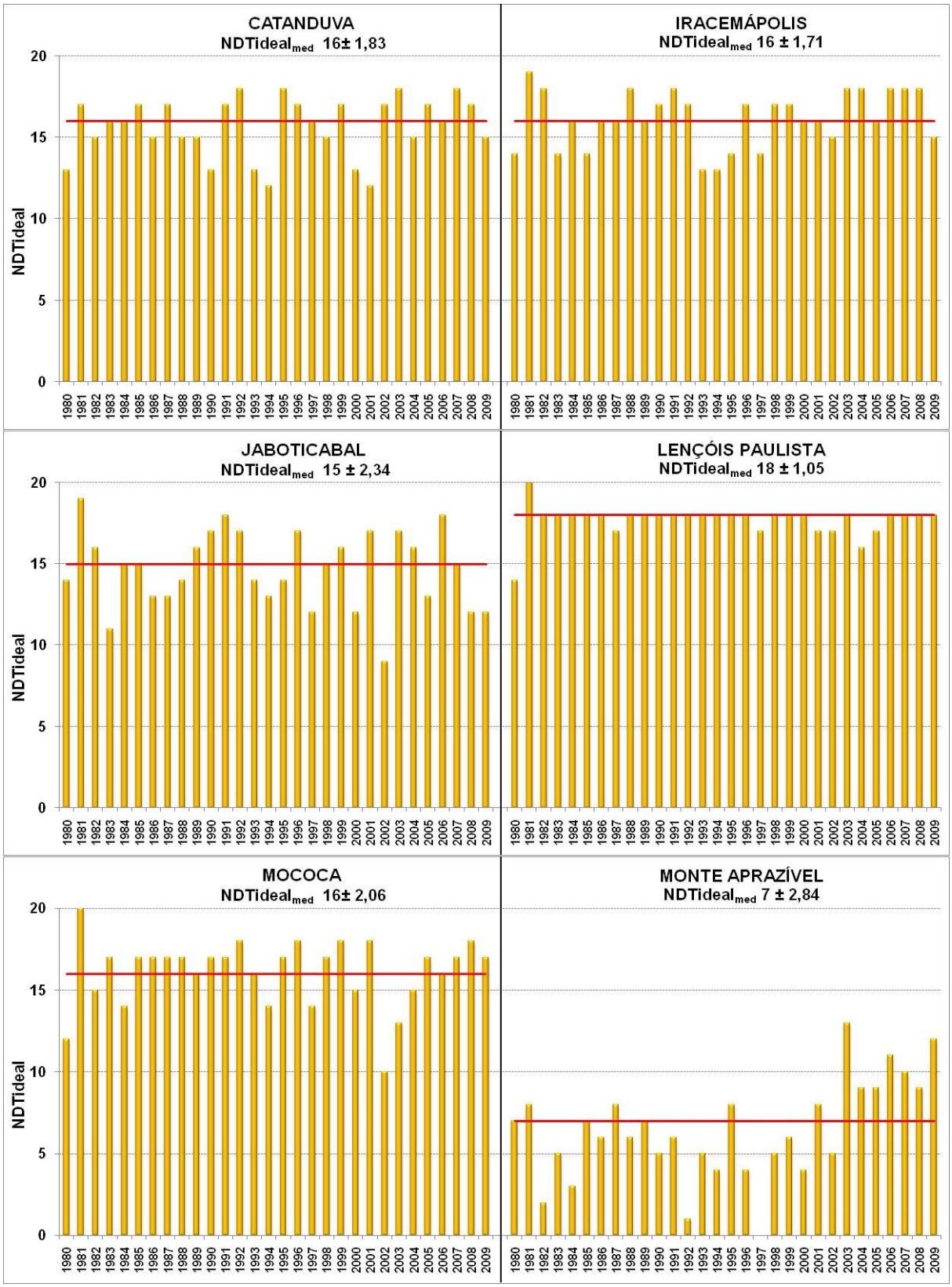

Figura 13 – Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), entre 17 e 26°C, entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(continuação)

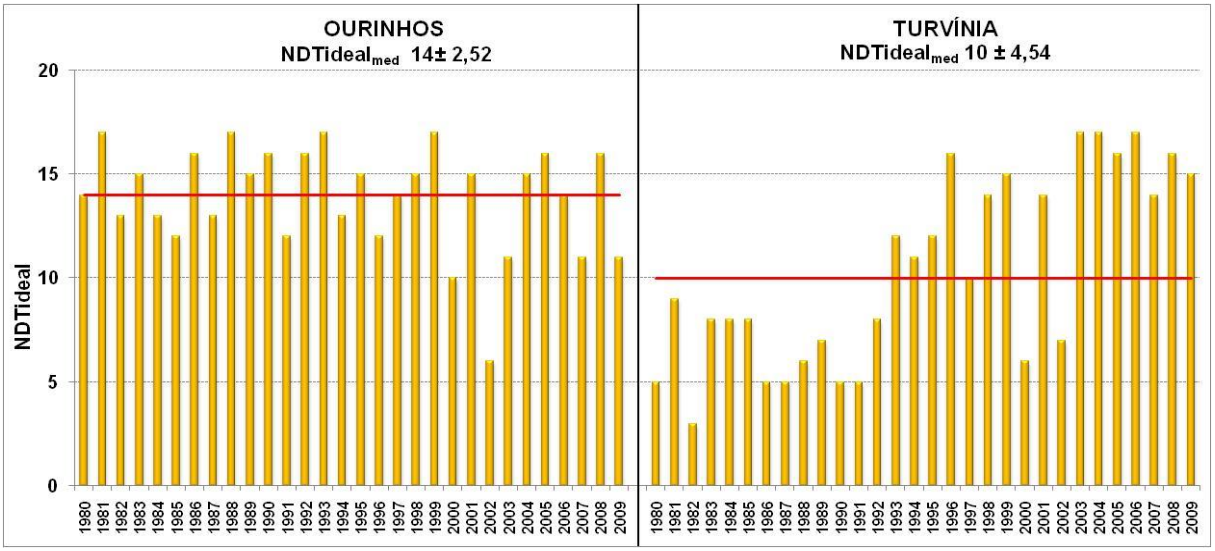

Figura 13 – Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), entre 17 e 26°C, entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(conclusão)

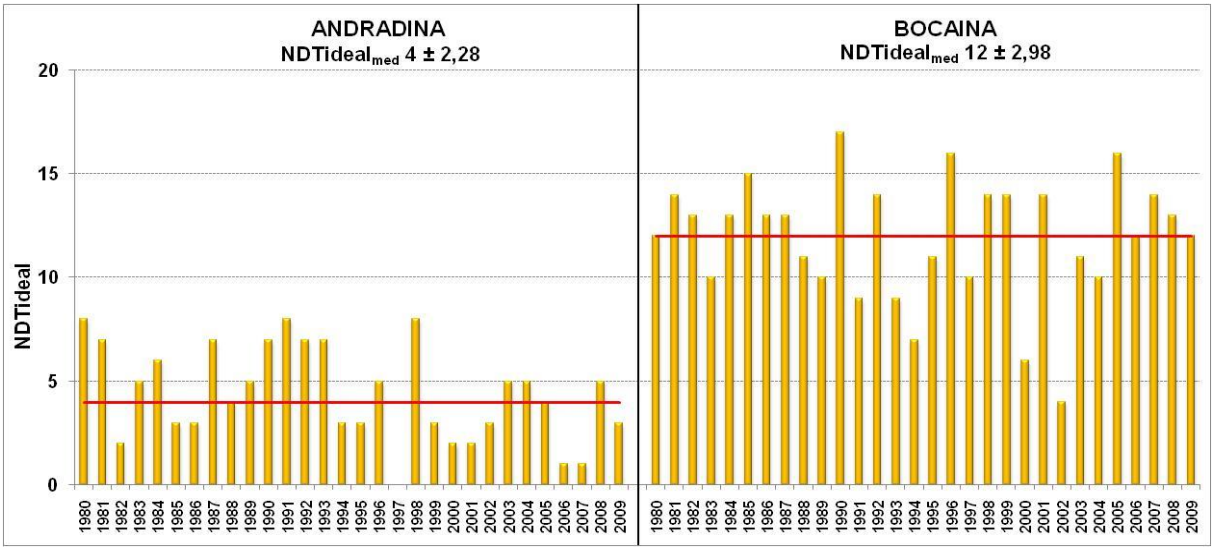

Figura 14 – Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), entre 20 e 25°C, entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(continua)

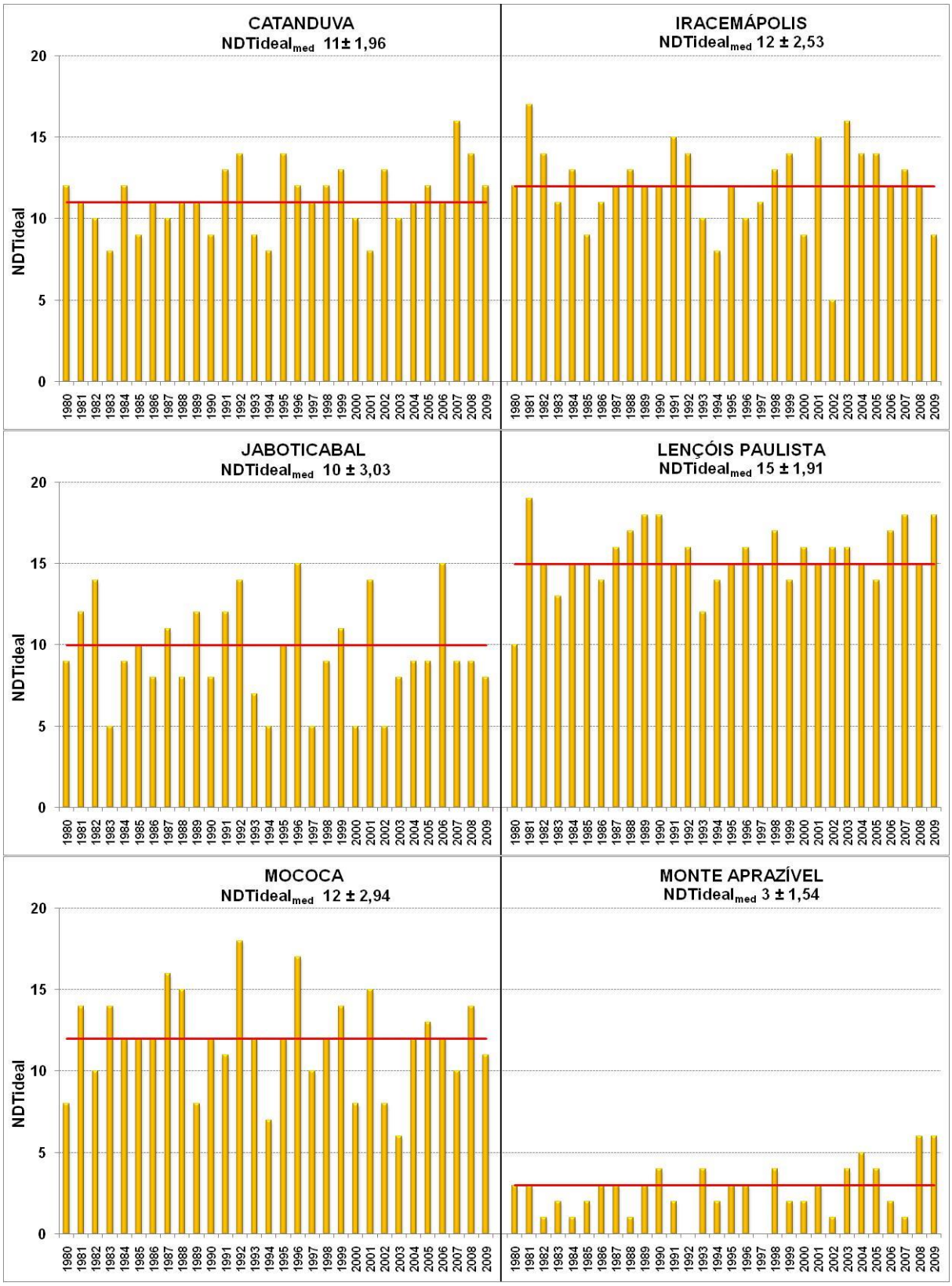

Figura 14 – Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), entre 20 e 25°C, entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(continuação)

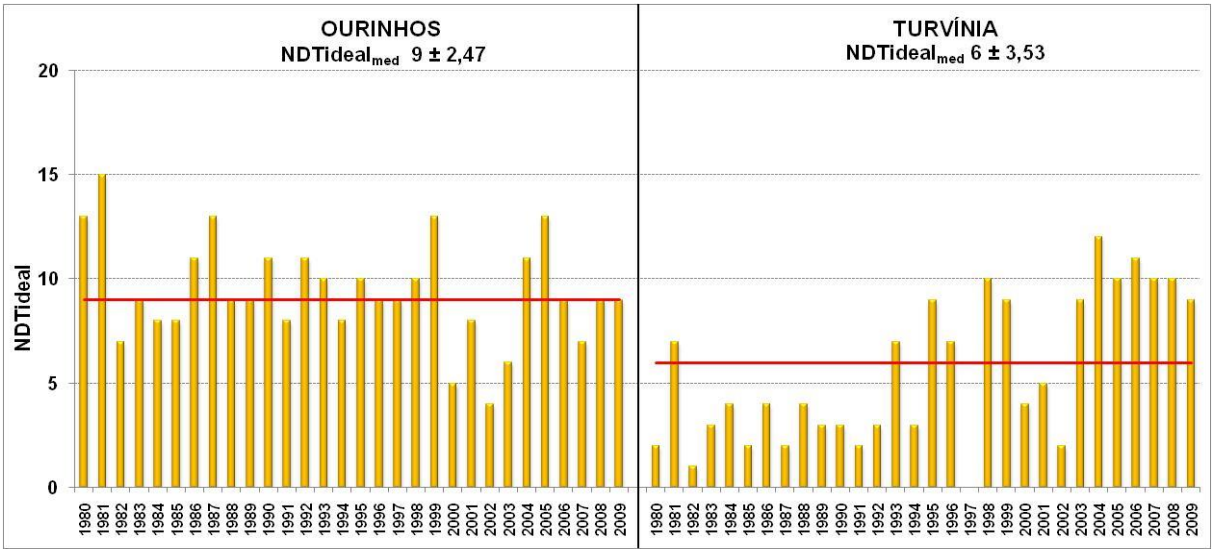

Figura 14 – Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), entre 20 e 25°C, entre os meses de setembro e fevereiro para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....(conclusão)

Tabela 10 - Número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC)* e com a temperatura no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), para as faixas de temperatura de 17 a 26°C, médios (1980-2009) e para 2000, entre os meses de janeiro a junho,para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália

Localidade	NDEXC		NDTideal	
	2000	Médio	2000	Médio
Mossman	14	10	12	12
Cairns	11	9	8	8
Innisfail	18	14	10	11
Mourilyan	16	13	10	11
Lucinda	9	8	10	10
Ingham	8	9	10	10
Proserpine	9	3	12	10
Mackay	8	7	13	12
Marian	9	8	13	12
Plane Creek	9	7	13	12

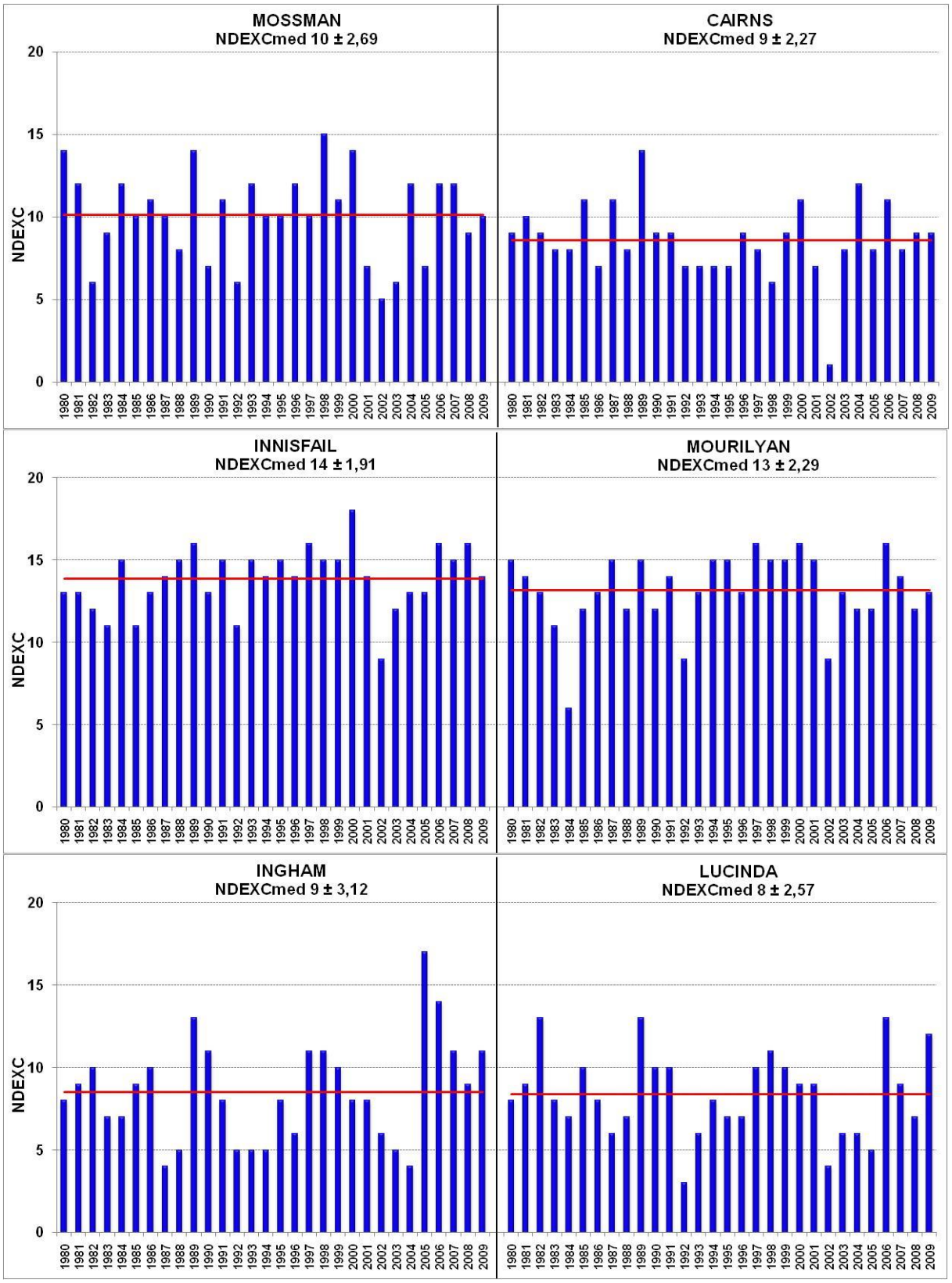

Figura 15 – Número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC)* entre os meses de janeiro e junho para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(continua)

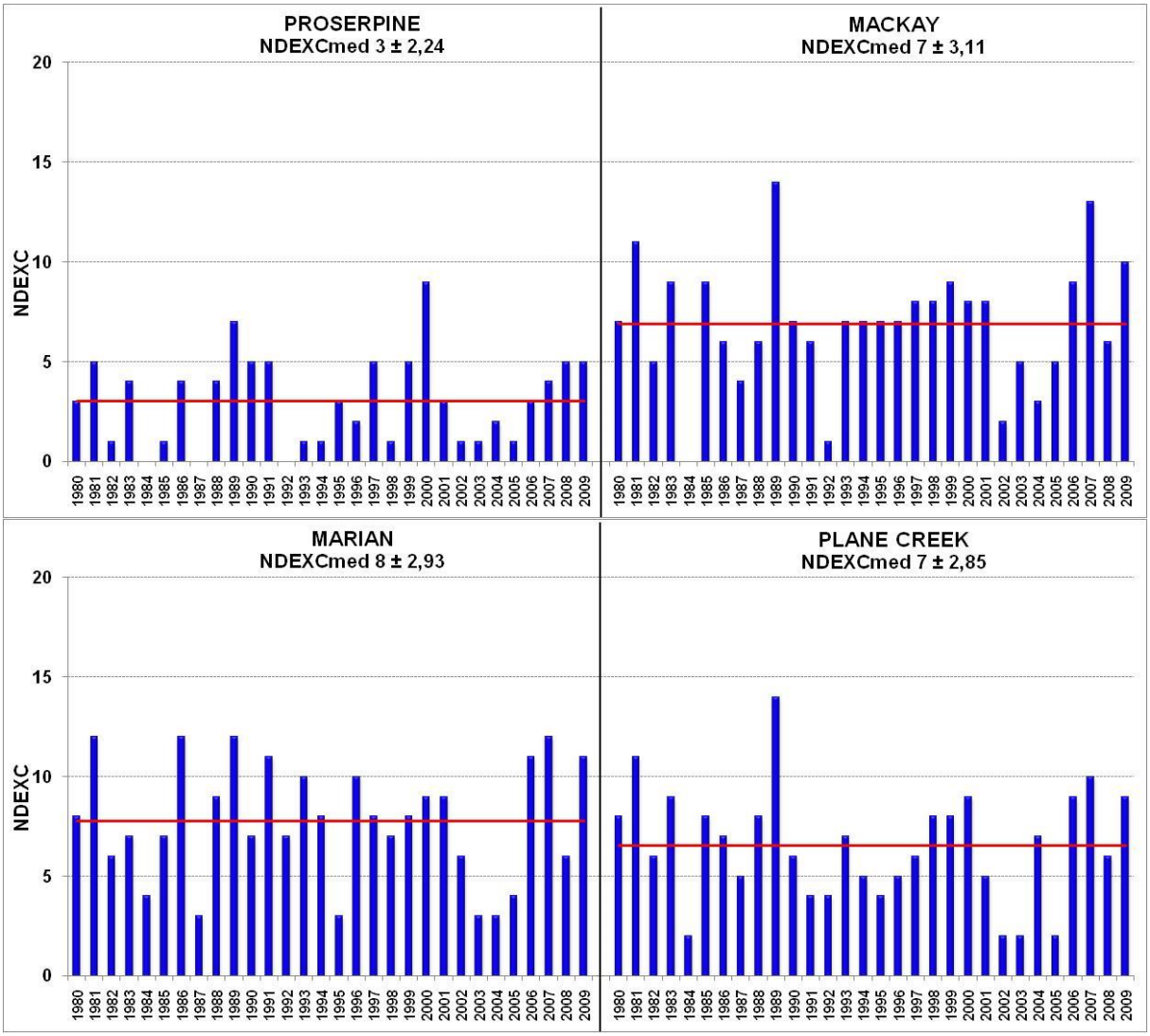

Figura 15 – Número de decêndios com excedente hídrico (*NDEXC)* entre os meses de janeiro e junho para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(conclusão)

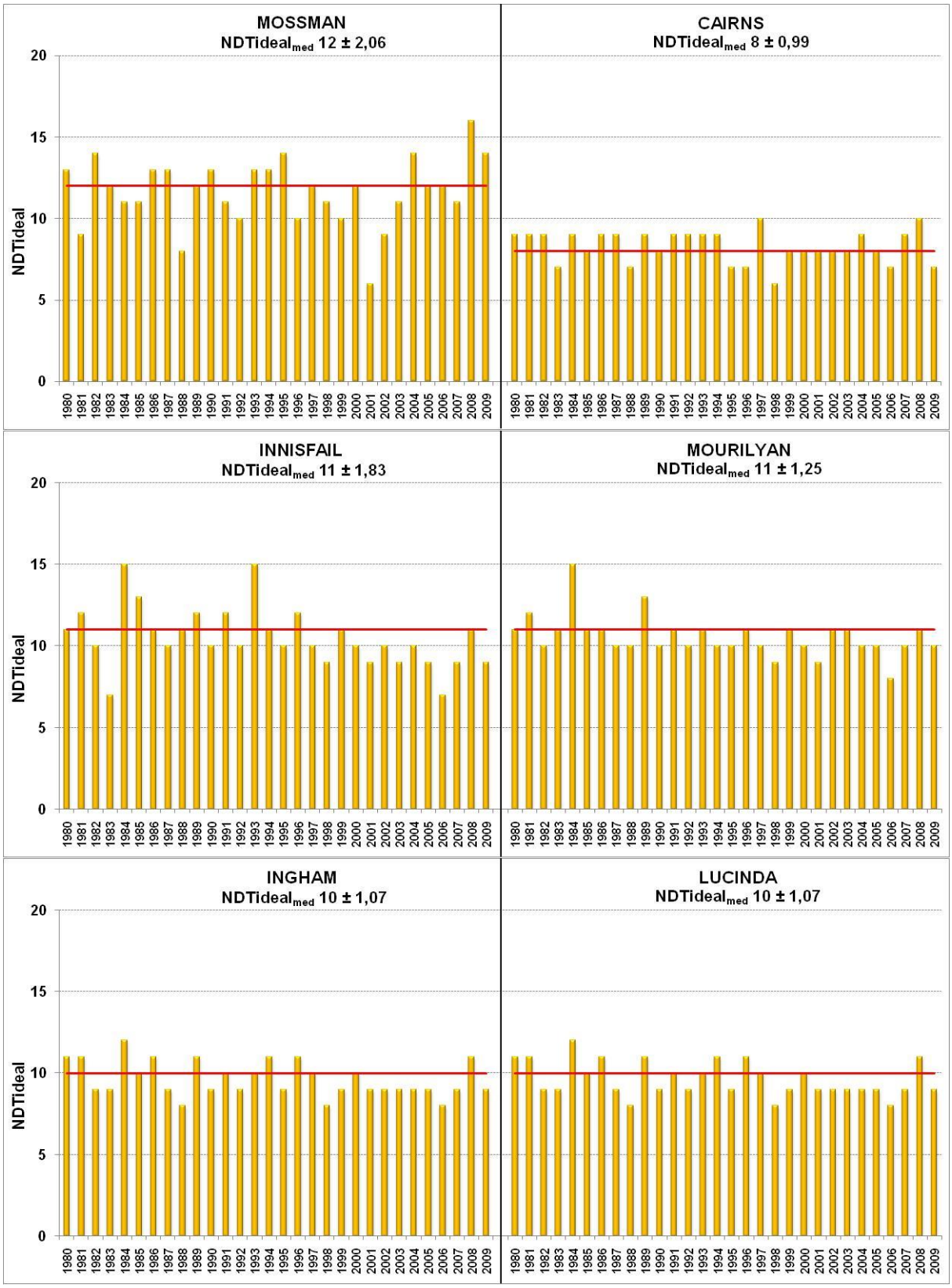

Figura 16 – Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), entre 17 e 26°C, entre os meses de janeiro e junho para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(continua)

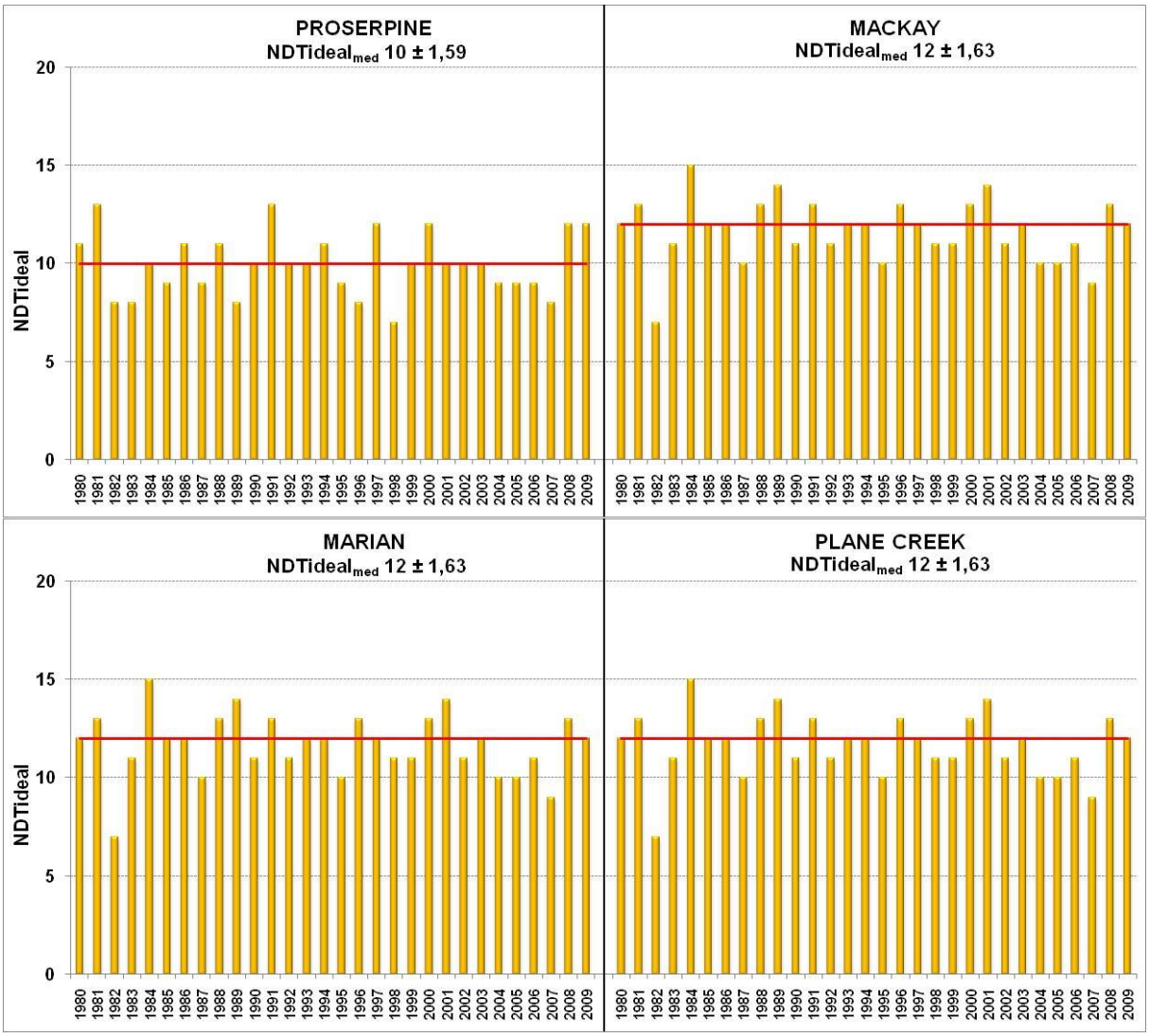

Figura 16 – Número de decêndios com a temperatura média no intervalo ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), entre 17 e 26°C, entre os meses de janeiro e junho para a série histórica (1980 a 2009) e sua respectiva média e desvio padrão, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália.....(conclusão)

Assim como esperado, devido aos maiores alturas pluviométricas, a condição hídrica para o Estado de São Paulo entre setembro de 2009 e fevereiro de 2010 foi de excedentes hídricos superiores à média, destacando-se os municípios de Lençóis Paulista, com aumento de 147%, e Catanduva e Andradina, locais normalmente mais secos, onde os aumentos foram de 175 e 320%, respectivamente. Para Monte Aprazível, em decorrência da diminuição da quantidade de chuva, o excedente hídrico apresentou uma redução de 19% (Tabela 7). Devido ao aumento das chuvas, os valores de *NDEXC* foram maiores do que a média em 80% das localidades Paulistas avaliadas em 2009/10, com destaques para Iracemápolis e Andradina com

aumentos respectivos de 160 e 267%, e exceções para Jaboticabal e Monte Aprazível com reduções de 14 e 17%, respectivamente.

Para as condições térmicas, considerando-se a temperatura média ideal na faixa de 17 a 26°C, apenas em 40% das localidades o NDTideal foi igual ou maior ao valor normal, enquanto que para a faixa de 20 a 25°C isso ocorreu em 60% dos locais. As condições térmicas mais favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar ocorreram nas localidades de Monte Aprazível e Turvínia, apesar de que em todas as localidades as condições observadas em 2009-10 terem sido muito próximas da condição térmica média, entre setembro e fevereiro (Tabela 8).

Similarmente, para a Província de Queensland em 2000 as condições hídricas foram de excedentes muito superiores à média, com destaque para as localidades de Proserpine e Mackay, que apresentaram aumentos no excedente hídrico de 132 e 355%, respectivamente (Tabela 8). Para o *NDEXC*, 90% das localidades em 2000 tiveram valores superiores aos normais, com exceção para Ingham, que apresentou uma redução de 11%, e destaque para Proserpine, onde houve um aumento de 200% no *NDEXC*.

Com relação às temperaturas, considerando-se apenas a faixa de 17 a 26°C, observou-se que em 80% das localidades o *NDTideal* foi igual ou maior aos valores médios, com aumento máximo de 20% nessa variável em Proserpine. Esses resultados condizem com o observado por Egan (1964), que verificou que a maior severidade da ferrugem alaranjada na cultura da cana ocorre durante o verão e outono, quando esses são mais úmidos e com temperaturas mais amenas, indicando que o excedente hídrico e a temperatura média do ar podem ser considerados como fatores decisivos para o estabelecimento das epidemias dessa doença.

4.3 Estimativa da severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

Com base na relação entre a severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*SEV*) observada nos 40 locais levantados pelo CTC em 2009/10, e as variáveis climáticas *NDEXC* e o *NDTideal*, para o período de setembro de 2009 a fevereiro de 2010, foram gerados modelos lineares múltiplos de estimativa da *SEV*, considerando-se as variáveis simples (S) e as integradas (I), como segue:

$$SEV_{(S)} = a + b * \ NDEXC + c * NDTideal_{(17-26)} \text{(Eq. 6)}$$

$$SEV_{(S)} = a + b * \ NDEXC + c * NDTideal_{(20-25)} \text{(Eq. 7)}$$

$$SEV_{(I)} = a + b * \ NDEXC + c * NDTideal_{(17-26)} + d * NDEXC * NDTideal_{(17-26)} + \\ + e * NDEXC^2 + f * NDTideal_{(17-26)}{}^2 \text{(Eq. 8)}$$

$$SEV_{(I)} = a + b * \ NDEXC + c * NDTideal_{(20-25)} + d * NDEXC * NDTideal_{(20-25)} + \\ + e * NDEXC^2 + f * NDTideal_{(20-25)}{}^2 \text{(Eq. 9)}$$

Os coeficientes lineares e angulares dos modelos propostos (Equações 6 a 9) são apresentados na Tabela 11, enquanto que a relação entre a severidade da ferrugem observada nas 40 localidades avaliadas pelo CTC e a estimada pelos modelos propostos, assim como os índices estatísticos referentes a essas relações são apresentados na Figura 17.

Tabela 11 – Coeficientes linear e angular dos modelos de regressão linear múltipla, com variáveis simples *(S)* e integradas *(I)* e para faixas de temperatura ideal de 17 a 26ºC e de 20 a 25ºC, para a estimativa da severidade (*SEV*) da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, para o Estado de São Paulo

Modelo	Tideal	Coeficientes da regressão linear múltipla					
SEV	(°C)	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*
S	17 - 26	-0,561	0,246	0,355	-	-	-
S	20 - 25	-0,452	0,317	0,396	-	-	-
I	17 - 26	-1,683	0,607	0,442	0,077	-0,082	-0,029
I	20 - 25	-3,076	1,033	0,617	0,003	-0,041	-0,019

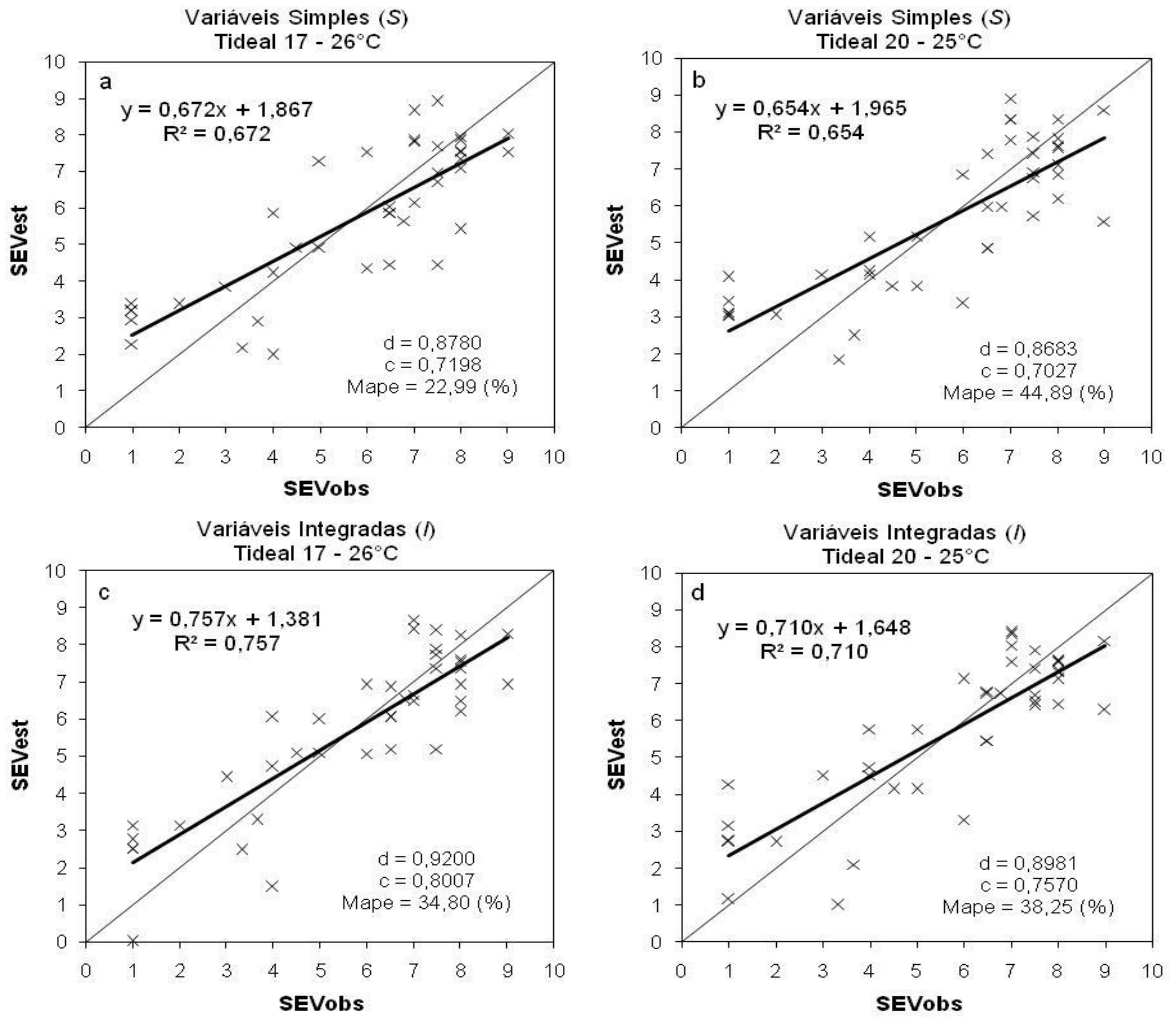

Figura 17 – Relação entre a severidade de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar observada (Sev_{obs}) e estimada (Sev_{est}), a partir dos modelos de regressão linear múltipla com variáveis simples *(S)* e integradas *(I)* para faixas de temperatura de 17 a 26°C e 20 a 25°C, considerando-se as 40 localidades do Estado de São Paulo

Com base nos resultados apresentados na Figura 17, especialmente considerando-se os coeficientes de determinação (R^2), os índices de concordância de Willmott (d) e de confiança de Camargo e Sentelhas (c) e o erro médio absoluto percentual (Mape), pode-se concluir que o modelo de melhor ajuste foi o que empregou as variáveis integradas e com a faixa de temperatura ideal entre 17 e 26°C (Figura 17c), o qual apresentou maior precisão (R^2 = 0,757), maior exatidão (d = 0,92), maior confiabilidade (c = 0,8007) e Mape, da ordem de 35%. Apesar da dispersão observada, as estimativas mostram que o modelo considerado consegue representar com confiabilidade a variabilidade da severidade, entre as notas 1 e 9. Em função da população de pares de dados empregados (n = 40) e do valor do R^2 =

0,757 (r = 0,87), conclui-se, com base em Snedecor e Cochran (1974), que as estimativas pelo modelo são estatisticamente significativas a 1% de probabilidade.

Utilizando-se o modelo de estimativa da severidade com melhor ajuste, estimaram-se as notas de severidade para ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para toda a série histórica considerada (30 anos) para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo ((Tabela 12) e na Província de Queensland (Tabela 13). As notas de severidade foram arranjadas em classes, com notas estimadas entre as faixas 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 e 9, classificadas respectivamente como baixa, moderada-baixa, moderada-alta, alta e muito alta, para cada ano do período de 1980 a 2009. Posteriormente, baseando-se na classificação de cada ano de acordo com a ocorrência e intensidade do fenômeno ENOS, El Niño e La Niña (Tabela 1), calculou-se a frequência de anos com notas de severidade estimada para a ferrugem alaranjada acima da média da série histórica de 1980 a 2009, para o Estado de São Paulo (Tabela 14) e para a Província de Queensland (Tabela 15).

De um modo geral, as regiões e anos com climas mais secos e quentes apresentaram menor severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, enquanto que as mais úmidas e com temperaturas mais amenas apresentaram condições mais severas para a doença. Para o Estado de São Paulo, a região noroeste, representadas por Araçatuba e São José do Rio Preto, apresentou severidades estimadas classificadas como baixa, moderada-baixa e moderada-alta, respectivamente, em 47, 30 e 23% dos anos para Araçatuba, e em 33, 63 e 4% dos anos para São José do Rio Preto. Nas demais regiões, onde os climas são mais favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem alaranjada, as severidades estimadas foram classificadas como moderada-baixa, alta e muito alta, em 43, 33 e 7% dos anos em Assis; 20, 43 e 13% dos anos em São Carlos; 37, 30 e 10% dos anos em Piracicaba e 33, 47 e 13% dos anos em Ribeirão Preto.

Similarmente, para a Província de Queensland, observou-se que em Proserpine, onde o clima é mais seco e quente, as severidades foram baixa a moderada-baixa em 70% dos anos, enquanto que em Mossman, com clima mais úmido e ameno, as severidades foram de moderada-alta a alta em 86% dos anos. Condições intermediárias de severidade foram observadas nas demais localidades, que na média apresentaram severidades baixa, moderada-baixa, moderada-alta e alta respectivamente em 15, 27, 52 e 17% dos anos.

Tabela 12 – Nota de severidade estimada da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para seis localidades representativas das principais regiões canavieiras no Estado de São Paulo

Ano	Nota					
	Araçatuba	**Assis**	**São Carlos**	**Piracicaba**	**Ribeirão Preto**	**SJ Rio Preto**
1980	5	5	8	6	7	4
1981	5	5	4	6	8	4
1982	3	5	7	8	8	1
1983	5	7	8	5	8	3
1984	1	7	6	6	8	1
1985	2	5	4	1	8	3
1986	1	8	6	8	8	3
1987	4	4	6	5	5	4
1988	4	5	8	8	2	3
1989	3	3	8	3	9	4
1990	2	8	9	5	8	3
1991	2	6	4	1	5	3
1992	5	5	9	8	9	1
1993	1	5	7	5	6	3
1994	4	3	8	7	7	2
1995	5	7	4	6	5	3
1996	4	8	9	9	9	2
1997	2	7	7	6	6	1
1998	4	9	9	9	8	3
1999	1	2	4	8	7	3
2000	2	8	8	8	3	2
2001	4	5	8	8	9	4
2002	2	5	6	5	6	2
2003	5	5	8	3	6	3
2004	1	8	3	4	5	2
2005	1	1	6	4	8	4
2006	1	5	1	9	8	6
2007	1	8	8	6	5	3
2008	3	5	6	3	6	2
2009	5	9	7	8	8	3
Média	**3**	**6**	**6**	**6**	**7**	**3**

Tabela 13 – Nota de severidade estimada da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para regiões canavieiras da Província de Queensland, Austrália

Ano	Nota									
	Mossman	**Cairns**	**Innisfail**	**Mourilyan**	**Lucinda**	**Ingham**	**Proserpine**	**Mackay**	**Marian**	**Plane Creek**
1980	6	5	5	3	6	6	3	6	7	7
1981	4	5	6	5	6	6	5	7	7	7
1982	6	5	5	4	3	5	1	4	4	4
1983	7	4	3	6	5	5	4	6	6	6
1984	5	5	7	6	6	6	0	0	4	2
1985	6	4	7	5	5	6	1	7	6	7
1986	7	5	5	5	6	6	4	6	6	6
1987	7	4	3	2	5	4	0	4	3	5
1988	5	4	3	5	5	4	4	6	7	7
1989	5	2	3	5	5	5	5	6	7	6
1990	6	4	4	5	5	4	5	6	6	5
1991	6	5	4	4	5	6	5	6	7	4
1992	5	5	5	6	3	4	0	1	6	4
1993	7	5	7	5	5	5	1	6	7	6
1994	7	5	4	2	6	5	1	6	7	5
1995	8	4	2	2	5	5	3	6	3	4
1996	5	4	5	5	6	5	2	6	7	5
1997	7	6	1	1	5	5	5	7	7	6
1998	3	3	1	1	4	4	1	6	6	6
1999	5	4	3	3	5	5	5	6	6	6
2000	5	4	0	1	6	6	7	7	7	7
2001	3	5	2	1	5	5	3	7	7	5
2002	4	1	6	6	4	5	1	2	5	2
2003	5	5	4	5	5	4	1	5	3	2
2004	7	4	4	5	5	4	2	3	3	6
2005	6	5	3	5	4	0	1	5	4	2
2006	6	3	0	0	2	1	3	6	6	6
2007	5	5	1	3	5	4	4	3	4	5
2008	8	6	2	5	6	6	5	6	6	6
2009	8	4	2	4	4	4	5	7	6	7
Média	**6**	**4**	**4**	**4**	**5**	**5**	**3**	**5**	**6**	**5**

Quanto à ocorrência dos eventos do ENOS, foram observados ao longo da série histórica considerada (1980-2009) que 13 anos tiveram a manifestação do El Niño, 8 anos com La Niña e 9 anos classificados como Neutros. De acordo com os dados de severidade da ferrugem alaranjada estimada para cada ano, observou-se que não há um padrão único da influência desses fenômenos na ocorrência dessa doença na cana-de-açúcar. Nas regiões de Araçatuba, Assis, São Carlos e Piracicaba, as notas de severidade anuais de ferrugem alaranjada acima da média ocorreram predominantemente nos anos de La Niña, respectivamente em 50, 75, 62,5 e 50% dos anos. Por outro lado, nas regiões de Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, os anos de La Niña foram os que apresentaram as menores frequências

das notas de severidade superarem a média, respectivamente 37,5 e 0% dos anos. No caso dessas duas localidades, a maior frequência de anos com a severidade da ferrugem superando a média foi em anos neutros, com 66,7 e 44,4 dos anos (Tabela 14).

Tabela 14 – Frequência de anos com notas de severidade estimada para a ferrugem alaranjada acima da média da série histórica de 1980 a 2009, nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo

Localidade	Frequência de anos com SEV > média (%)		
	El Niño	La Niña	Neutro
Araçatuba	38,5	50,0	44,4
Assis	38,5	75,0	11,1
São Carlos	53,8	62,5	44,4
Piracicaba	38,5	50,0	22,2
Ribeirão Preto	46,2	37,5	66,7
São José do Rio Preto	23,1	0,0	44,4

Para a Província de Queensland, na maioria das localidades analisadas os anos neutros foram os que possibilitaram maior intensificação da severidade da ferrugem alaranjada, já que foi nesses anos em que a doença apresentou sintomas acima da média para a série histórica de 1980 a 2009 (Tabela 15). Isso ocorreu com maior intensidade nas localidades de Cairns, Mourilyan, Mackay e Marian, onde a frequência de anos com severidade maior do que a média foi superior a 50%. Nas localidades de Proserpine e Plane Creek, a maior frequência de eventos com severidade maior do que a média ocorreu em anos de La Niña, enquanto que em Mossman isso ocorreu em anos de El Niño.

Estudo semelhante foi realizado por Del Ponte et al. (2010) para avaliar a influência dos eventos de ENOS na severidade da ferrugem asiática da soja no Estado do Rio Grande do Sul. Os autores observaram que para essa região do Brasil, em função do sinal mais bem definido do efeito do ENOS nas chuvas, há uma maior severidade da ferrugem em anos de El Niño e menor nos anos de La Ninã. Esse padrão difere dos resultados encontrados neste estudo, já que no Estado de São Paulo as severidades mais elevadas foram observadas com maior frequência nos anos de La Niña em Araçatuba, Assis, São Carlos e Piracicaba, enquanto que no norte do estado, em Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, isso ocorreu em anos neutros (Tabela 14). Essas diferenças regionais se devem basicamente à grande variabilidade espacial das consequências do ENOS no Brasil, onde durante

eventos de El Niño predominam chuvas acima do normal na região sul, chuvas abaixo do normal nas regiões norte-nordeste e uma grande zona de transição na região central do país. Esses padrões se invertem em anos de La Niña, enquanto que em anos neutros as chuvas seguem variabilidade climatológica, temporal e espacial (Pereira et al., 2002).

Tabela 15 – Frequência de anos com notas de severidade estimada para a ferrugem alaranjada acima da média da série histórica de 1980 a 2009, nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar da Província de Queensland, Austrália

Localidade	Frequência de anos com SEV > média (%)		
	El Niño	La Niña	Neutro
Mossman	46,2	25,0	22,2
Cairns	53,8	25,0	66,7
Innisfall	38,5	12,5	44,4
Mourilyan	38,5	37,5	88,9
Lucinda	23,1	25,0	33,3
Inghan	23,1	25,0	33,3
Proserpine	38,5	62,5	33,3
Mackay	61,5	75,0	77,8
Marian	30,8	25,0	55,6
Plane Creek	46,2	62,5	55,6

Na Austrália, na Província de Queensland, também predominam maiores efeitos de anos neutros e de La Niña sobre a severidade da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar, como se pode observar na Tabela 15, sendo a única exceção a localidade de Mossman, onde os efeitos do El Niño são mais pronunciados.

4.4 Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar.

Utilizando-se a equação de severidade de melhor ajuste, foram estimadas as notas para ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para as 46 localidades no Estado de São Paulo e para as 40 localidades na Província de Queensland e calculadas as frequências de anos com notas estimadas entre as faixas estipuladas anteriormente. Em seguida, essas frequências foram multiplicadas pelos fatores de ponderação 0, 1, 3, 6 e 10, respectivamente, para as faixas de notas de 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 e 9, sendo o resultado dessa multiplicação dividido pelo número total de anos analisados para cada local, obtendo-se assim o Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (I*FAC*), o qual varia de 1 a 10.

Delimitando os níveis de risco de acordo com as faixas de valores de *IFAC* (Tabela 4), podemos observar que para o Estado de São Paulo (Figura 18), o índice se apresentou igual ou abaixo de 2 em 10 locais (22%) sendo considerado baixo; entre 2,1 e 4 em 12 locais (26%) sendo considerado moderado-baixo; entre 4,1 e 6 em 19 locais (41%) sendo considerado moderado-alto; e acima de 6 em 5 locais (11%) sendo considerado alto. Não foram observados valores acima de 8, ou seja, com risco muito alto.

Análise semelhante foi realizada para a Província de Queensland, Austrália (Figura 19), onde o índice se apresentou igual ou abaixo de 2 em 31 locais (77%) sendo considerado baixo; entre 2,1 e 4 em 8 locais (20%) sendo considerado moderado-baixo; e entre 4,1 e 6 em apenas 1 local (3%) sendo considerado moderado-alto. Não foram observados valores acima de 6, ou seja, com riscos alto ou muito alto.

Os coeficientes lineares, angulares e de determinação (R^2), e os índices estatísticos de Willmott (d) e de confiança (c) e o erro absoluto médio percentual (Mape) dos modelos de estimativa do *IFAC* gerados por meio de regressão linear múltipla com variáveis simples *(S)* e com variáveis integradas *(I)* a partir das correlações entre os valores de *IFAC*obtidos para as 46 localidades do Estado de São Paulo *($IFAC_{obs}$)*, considerando-se severidades estimadas a partir de modelos com variáveis simples e integradas e para faixas de temperatura ideal entre 17 e 26°C e 20 e 25°C, e as coordenadas geográficas, latitude e longitude, e a altitude, são apresentados na Tabela 16 e Figura 20. Os resultados mostram que o modelo que melhor representa a variabilidade do *IFAC* da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é o que emprega a estimativa da SEV e do IFAC com variáveis integradas (Tabela 16 e Figuras 19c e 19d). Apesar do modelo que emprega a faixa de *Tideal* de 20 a 25ºC ter apresentado um menor Mape, optou por empregar o modelo com a faixa de *Tideal* de 17 a 26ºC por este apresentar valores dos índices d e c mais elevados.

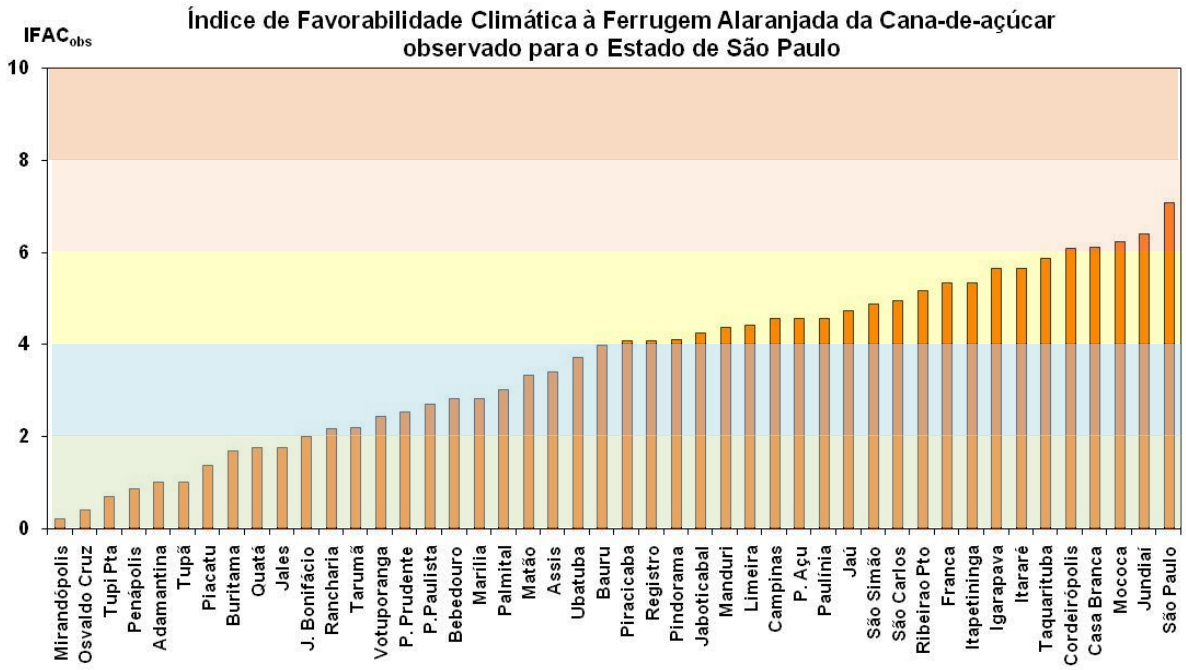

Figura 18 – Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (IFAC) para 46 localidades do Estado de São Paulo

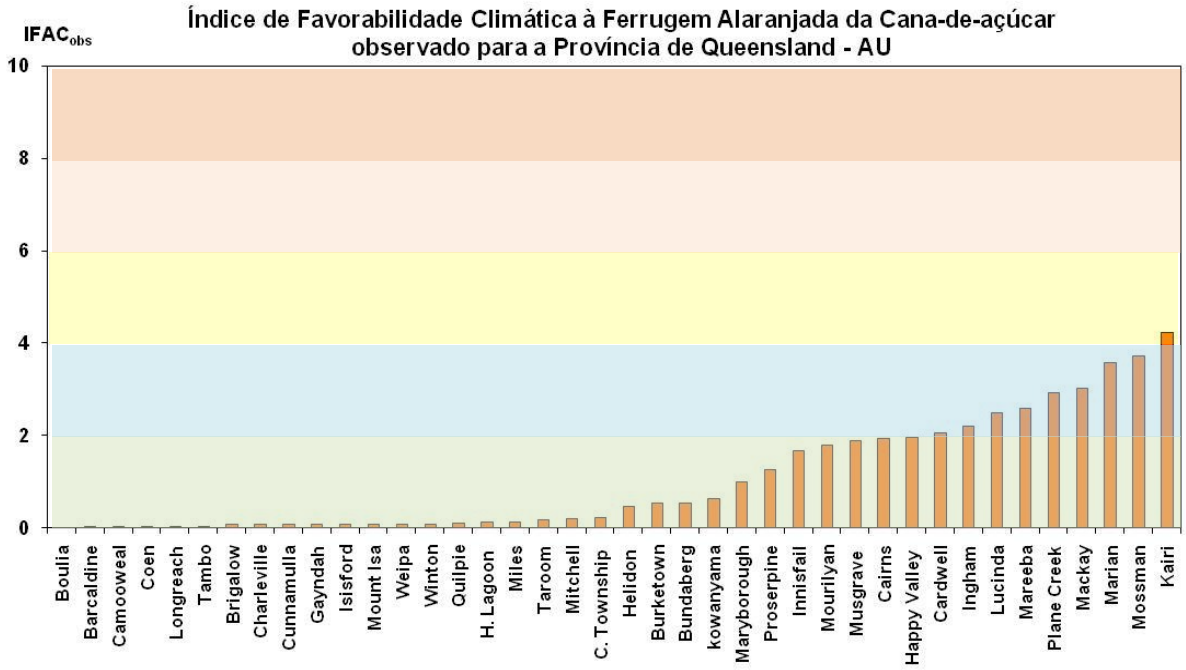

Figura 19 – Índice de Favorabilidade Climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (IFAC) para 40 localidades da Província de Queensland, Austrália

Tabela 16 - Coeficientes linear e angular dos modelos de regressão linear múltipla, com variáveis simples *(S)* e integradas *(I)* e para as faixas de temperatura ideal de 17 a 26ºC e de 20 a 25ºC, para a estimativa do Índice de Favorabilidade Climática a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar *(IFAC)* para o Estado de São Paulo, a partir de modelos de severidade *(SEV)*

Modelos		Tideal °C	Coeficientes da regressão linear múltipla									
IFAC	SEV		a	b	c	d	e	F	g	h	i	j
S	*S*	17-26	35,20	-0,46	0,87	0,003	-	-	-	-	-	-
I	*S*	17-26	652,65	40,63	6,43	-0,094	0,544	-3,1E-03	-3,1E-04	0,290	-0,068	1,1E-05
I	*I*	17-26	963,51	47,99	16,73	-0,021	0,524	-2,0E-03	4,9E-04	0,495	0,046	7,6E-07
I	*I*	20-25	494,73	26,06	6,81	-0,095	0,353	-1,4E-03	-1,3E-03	0,194	-0,024	2,3E-06

Análise semelhante foi feita para a Província de Queensland, Austrália, a partir de 40 localidades, porém, apenas empregando-se o modelo de estimativa de severidade com melhor ajuste (Figuras 18c). O modelo de *IFAC* gerado a partir da correlação entre o *IFAC* e as variáveis independentes (latitude, longitude e altitude) integradas é apresentado na Tabela 17. O ajuste proporcionado entre os *IFAC*s calculados e estimados pelo modelo da Tabela 17, expresso pela regressão linear entre eles e os índices de concordância (d) e confiança (c), é apresentado na Figura 20.

Tabela 17 - Coeficientes linear e angular do modelo de regressão linear múltipla, com variáveis integradas *(I)* e para a faixa de temperatura ideal de 17 a 26ºC, para a estimativa do Índice de Favorabilidade Climática a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar *(IFAC)* para a Província de Queensland, Austrália, a partir de modelo de severidade *(SEV)*

Modelos		Tideal °C	Coeficientes da regressão linear múltipla									
IFAC	SEV		a	b	C	d	e	F	g	h	i	j
I	*I*	17-26	314,44	8,28	-5,69	-0,020	-0,060	1,1E-04	6,0E-05	0,006	0,025	1,7E-05

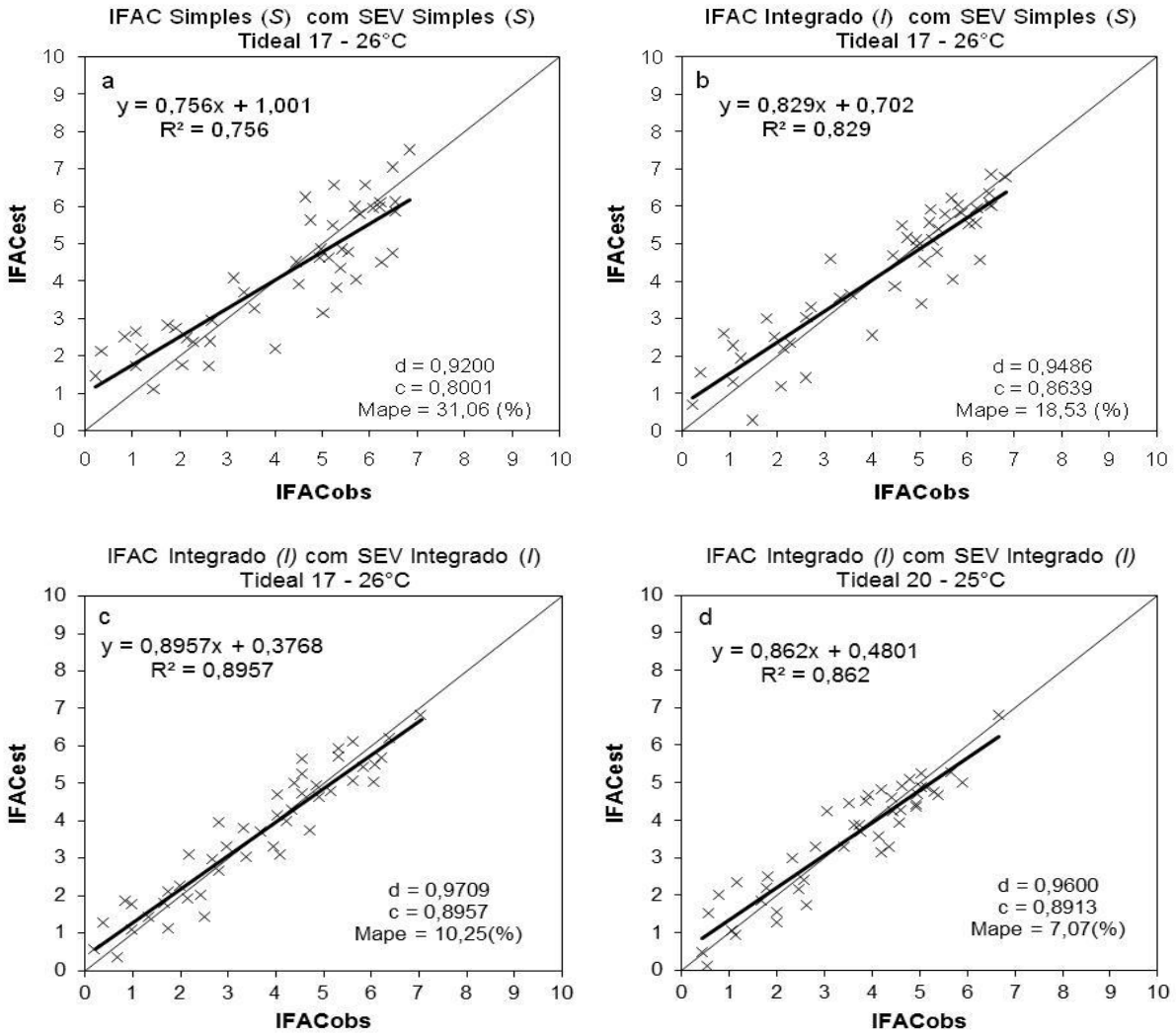

Figura 20 – Índice de favorabilidade para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar observado *($IFAC_{obs}$)* e estimado *($IFAC_{est}$)* obtidos a partir de modelos de regressão linear múltipla com variáveis simples *(S)* (*a*) e integradas *(I)* (*b*, *c* e *d*) para as faixas de temperatura ideal de 17 a 26°C e 20 a 25°C, para 46 localidades do Estado de São Paulo, considerando os modelos de severidade *(SEV)*

.

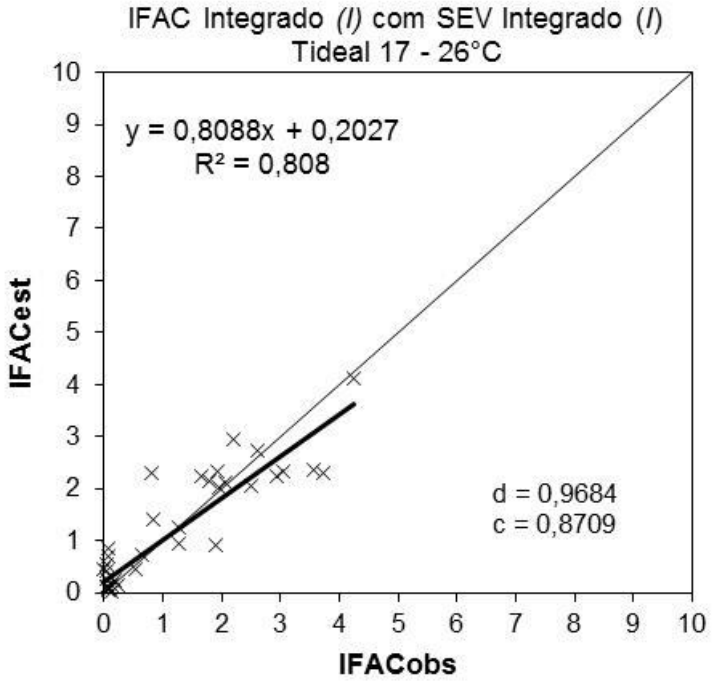

Figura 21 - Índice de favorabilidade para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar observado *($IFAC_{obs}$)* e estimado *($IFAC_{est}$)* obtidos a partir de modelos de regressão linear múltipla com variáveis integradas *(I)* para a faixa de temperatura ideal de 17 a 26°C, para 40 localidades da Província de Queensland, Austrália, considerando modelo de severidade *(SEV)*

4.5 Mapas de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar

Considerando-se os coeficientes das equações de regressão, para os modelos com a SEV e IFAC estimados com variáveis integradas e a Tideal entre 17 e 26ºC (Tabelas 16 e 17), e os “layers” de latitude, longitude e altitude, por meio do recurso de álgebra de mapas, a partir da sequência de comandos: *Spatial Analyst - Raster calculator*, foram confeccionados os mapas de risco climático para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar para o Estado de São Paulo (Figuras 22 e 23) e para a Província de Queensland, Austrália (Figura 24).

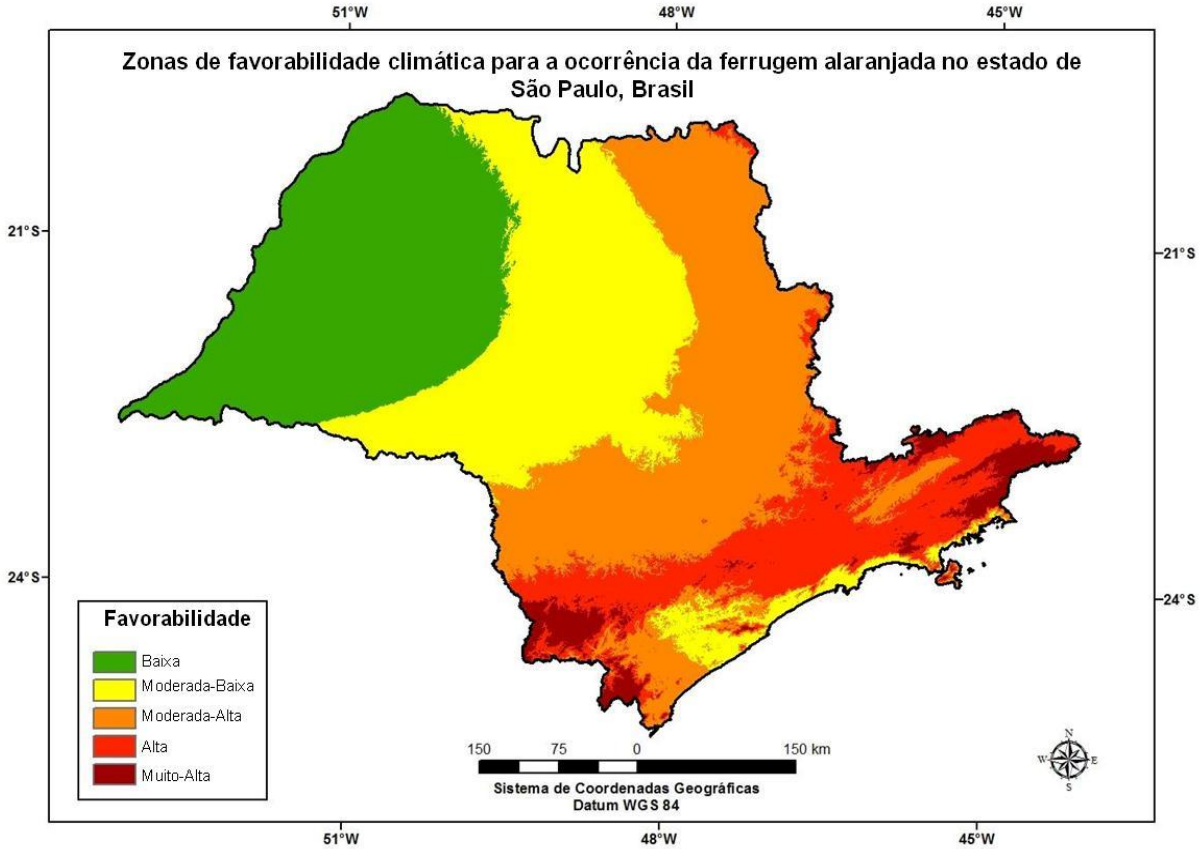

Figura 22 – Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo

Para o Estado de São Paulo (Figura 22), observou-se uma tendência longitudinal da favorabilidade, ou seja, com o *IFAC* aumentando da região oeste, menos favorável à ocorrência da ferrugem, devido ao clima mais seco e quente, em sentido à região leste do estado, mais favorável devido ao clima mais úmido e temperaturas mais amenas. Associando-se o mapa de favorabilidade para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar às notas dessa doença observadas nos levantamentos de campo do CTC entre os meses de janeiro e fevereiro de 2010 (Figura 23), observa-se que há uma concordância bastante expressiva entre eles, mostrando que o mapa de favorabilidade consegue representar o risco de ocorrência dessa doença com boa confiabilidade, apesar da limitação de dados climáticos. Houve assim, uma tendência de notas mais baixas na região de baixo risco, intermediárias na região de risco moderado–baixo e mais altas na região de risco moderado–alto. Apesar disso, observa-se que dentro de cada faixa de favorabilidade as notas de ferrugem alaranjada variaram consideravelmente, de 1 a 8 na zona de baixa favorabilidade, de 1 a 9 na zona de moderada-baixa

favorabilidade e de 4 a 9 na zona de moderada-alta favorabilidade. Isso se deve em grande parte às condições topo e microclimáticas, que não foram consideradas neste estudo, as quais condicionam uma grande variabilidade espacial das condições meteorológicas dentro de um mesmo macroclima (Pereira et al., 2002), assim como à grande variabilidade espaço-temporal e inter-anual das chuvas convectivas, que predominam durante os meses de verão.

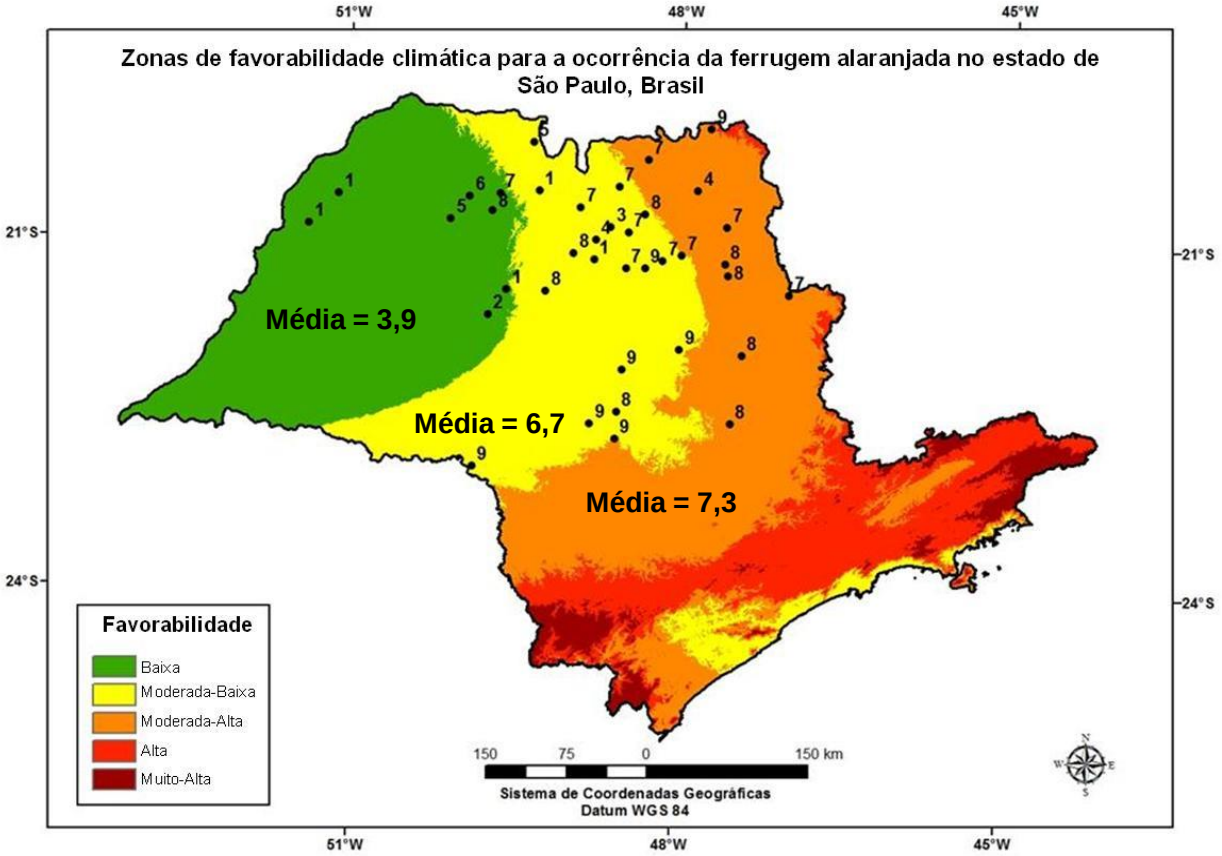

Figura 23 – Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e notas de severidade observadas em levantamentos de campo do CTC entre janeiro e fevereiro de 2010 e médias por faixa de risco

Os resultados apresentados no mapa de zonas de favorabilidade se assemelham ao mapa de dias favoráveis à epidemia da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar obtido por Martins (2010), o qual considerou a temperatura e a duração do período de molhamento mais favoráveis à infecção da *P. Kuehnii* e um período de 4 anos para estabelecer as zonas de risco. Essa semelhança entre os mapas, apesar do período reduzido de anos usados por Martins (2010), de 2002 a 2005, demonstra que os critérios empregados no presente estudo foram suficientemente adequados para representar o real risco de ocorrência da ferrugem

alaranjada nos canaviais paulistas, podendo assim servir de subsídio para o planejamento do cultivo da cultura da cana-de-açúcar, especialmente no que se refere ao manejo varietal, ou seja, à alocação de variedades nas diferentes zonas, já que grande parte do controle dessa doença se dá pelo uso de variedades resistentes (MAGAREY et al., 2008), e para ao controle químico da doença (Ferrari et al., 2010). Para as regiões nordeste e centro-leste do Estado, por serem intensamente cultivadas pela cultura da cana-de-açúcar e por apresentarem risco moderado-alto, aconselha-se o cultivo de variedades resistentes à doença.

Para a Província de Queensland, Austrália, o mapa de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada (Figura 24) mostrou haver uma predominância de baixa a moderada-baixa favorabilidade à doença em grande parte da província, havendo, no entanto, algumas áreas com favorabilidade alta a muito alta especialmente no nordeste da província, como destacado na Figura 24. Nessas áreas, o uso de variedades suscetíveis deve ser descartado, de modo a se evitar surtos epidêmicos em anos muito chuvosos. No entanto, na faixa litorânea da província, onde se concentram a grande maioria dos canaviais (Figura 1), a favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada varia de baixa a moderada-baxia, o que indica que variedades suscetíveis à doença podem continuar sendo empregadas, porém, sabendo-se que em anos de eventos extremos, especialmente como o ocorrido em 2000, poderão causar epidemias da doença, conforme também observado por Magarey et al. (2001).

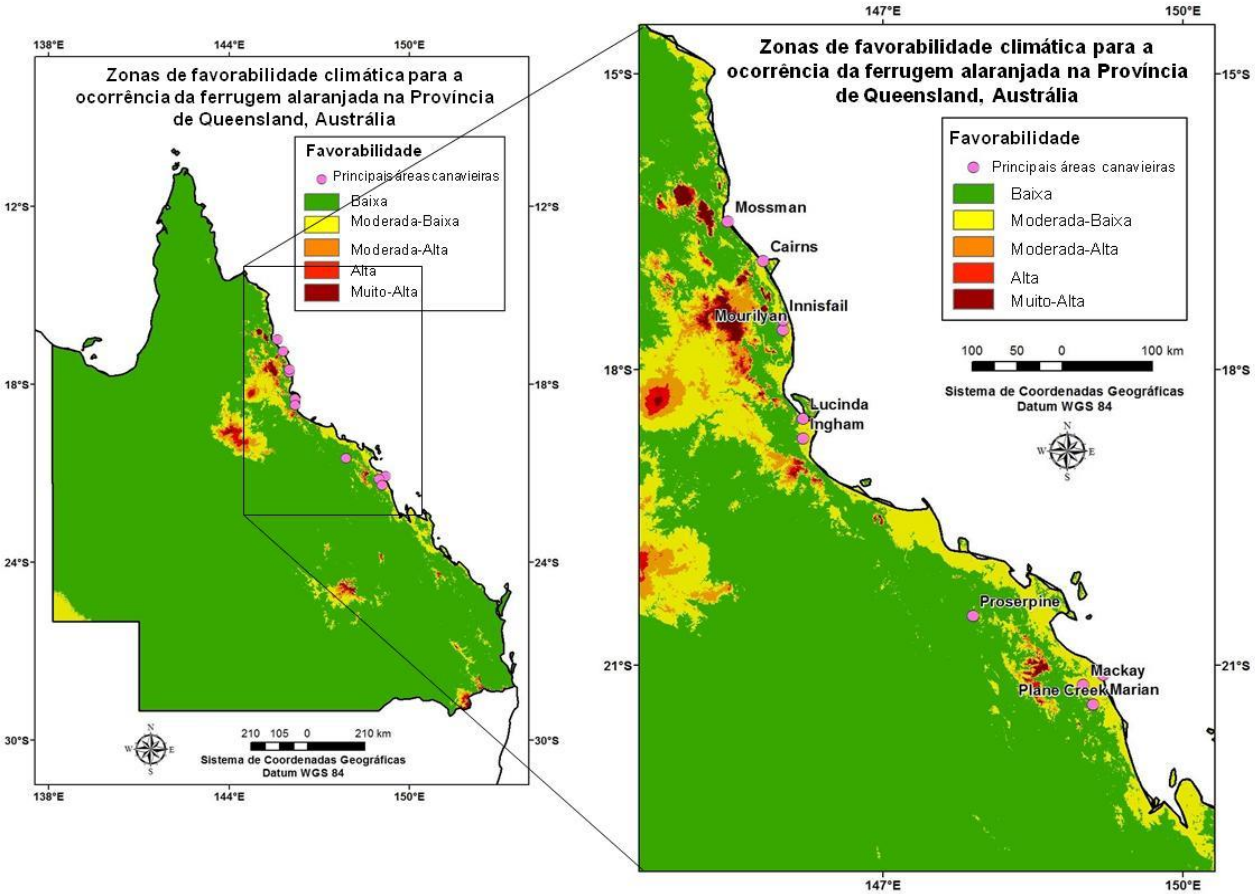

Figura 24 – Zoneamento da favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar na Província de Queensland, Austrália

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que:

a) As variáveis climáticas excedente hídrico (EXC) e temperatura média do ar, expressas em termos do número de decêndios com EXC (*NDEXC*) e com temperatura média dentro da faixa ideal para a ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (*NDTideal*), mostraram-se bastante correlacionadas a ocorrência da doença, possibilitando a obtenção de modelos de estimativa de severidade para qualquer localidade a partir de séries históricas de dados meteorológicos, com significância estatística, a partir da relação entre essas variáveis e a severidade da doença, observada no Estado de São Paulo em 2009-10;

b) Com as severidades da ferrugem alaranjada estimadas para as principais regiões produtoras de cana do Estado de São Paulo e da Província de Queensland, foi possível se avaliar os efeitos do fenômeno ENOS na ocorrência dessa doença da cana-de-açúcar. Observou que, tanto no Estado de São Paulo como na Província de Queensland, a maior frequência de notas de severidade acima da média ocorrem predominantemente nos anos de La Niña e Neutros;

c) Com base nas severidades estimadas foi possível se determinar o índice de favorabilidade climática para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar (IFAC), o qual foi especializado com base na sua correlação com as coordenadas geográficas (latitude e longitude) e altitude, determinando as zonas de favorabilidade para a ocorrência dessa doença. De acordo com o IFAC, concluiu-se que nas regiões canavieiras a oeste do Estado de São Paulo a favorabilidade para a ocorrência da ferrugem alaranjada é baixa, enquanto que para as regiões central e leste do Estado essa favorabilidade varia de moderado-baixa a alta, seguindo uma tendência longitudinal. Na Província de Queensland, predomina baixa a moderada-baixa favorabilidade;

d) O mapeamento da favorabilidade climática para ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar foi realizado em macro-escala, servindo como uma ferramenta estratégica para o manejo varietal nas unidades de produção, assim como para o planejamento

de ações de manejo de doenças, por meio de controle químico, ambas visando minimizar os riscos de perda de produtividade dos canaviais em decorrência da doença. Porém, apesar da representatividade dos mapas, é importante se ressaltar que neste estudo não foram considerados aspectos topoclimáticos, como configuração e exposição do relevo, e microclimáticos, como o uso de irrigação nos canaviais, os quais podem alterar as relações do triângulo epidemiológico, fazendo com que as relações aqui obtidas sejam alteradas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, H. A.; SANTANA, S. O.; SÁ, D. F. Zoneamento edafo-climático para a seringueira no sudeste da Bahia, com enfoque na incidência do mal-das-folhas. R. Theobroma, Ilhéus, v.17, p.111-123, 1987.

ALVES, S.A.M.; FURTADO, G.Q.; BERGAMIN FILHO, A.Influência das condições climáticas sobre a ferrugem da soja. In: Zambolim, L. (Org.). **Ferrugem Asiática da Soja, Visconde do Rio Branco**: Suprema Gráfica e Editora. p. 37-59. 2006

ALVES, M.C.; POZZA, E.A.; SILVA, R.M.A.; OLIVEIRA, M.S.; MACHADO, J.C.; CARVALHO, L.G.; OLIVEIRA, A.A.S. Sistema de lógica fuzzy para descrever o processo monocíclico da ferrugem asiática da soja. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 33. p. 36, 2007 (resumo).

AMORIM, L.; BERGAMIN FILHO, A.; SANGUINO, A.; ARDOSO, C.O.N.; MORAES, V.A.; FERNANDES, C.R. Metodologia de avaliação de ferrugem da cana-de-açúcar (Puccinia melanocephala). **Boletim Técnico Copersucar, São Paulo,** v. 39, p. 13-16, 1987.

AUSTRALIAN BUREAU OF METEOROLOGY. Disponível em: <http://www.bom.gov.au/> . Acesso em: 25 mai. 2011.

BATCHELOR, W.D.; YANG, X.B.; TSCHANZ, A.T. Development of a neural network for soybean rust epidemics. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 40, p. 247-252, 1997.

BONDE, M.R.; BERNER, D.K.; NESTER, S.E.;FREDERICK, R. D.Effects of temperature on urediniospore germination, germ tube growth, and initiation of infection in soybean by Phakopsora isolates. **Phytopathology**, cidade, v. 97, p. 997-1003, 2007. Disponível em: <http://naldc.nal.usda.gov/download/1050/PDF>. Acesso em : 12 jul. 2012.

BRAITHWAITE, K. **Assessing the impact that pathogen variation has on the sugarcane breeding program**. First report, SRDC project BSS258. BSES Limited Publication: Australia, 2005

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 diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.

CDA. **Coordenadoria de Defesa Agropecuária**. Ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar. **Informativo Técnico,** São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.cda.sp.gov.br/arquivos/ferrugem-alaranjada.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2010.

CECÍLIO, R.A.; MEDEIROS, S.S.; SILVA JÚNIOR, J.L.C.; SOUZA, J.A. Zoneamento agroclimático para a heveicultura na parte leste do Estado da Bahia. Revista Bahia Agrícola, Salvador, v.7, n.1, p.14-17, 2006.

CEPTEC. Disponível em : <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em : 28 nov. 2011.

COMSTOCK, J.C.; SOOD, S.G.;GLYNN, N.C.; SHINE, J.M.;JR.; MCKEMY, J.M.;CASTLEBURY, L.A. First report of *Puccinia kuehnii*, causal agent of orange rust of sugarcane, in the United States and in the Western Hemisphere. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 92, n. 6, p. 175, 2008.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento. Brasilia, 2012. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_08_09_15_07_05_boletim_cana_portugues_-_agosto_2012_2o_lev.pdf . Acesso em: 6 set. 2012.

CROFT, B.; MAGAREY, R.; WHITTLE, P. Disease management. In: HOGARTH, M.; ALLSOPP, P. (Ed.). **Manual of Canegrowing,** Indooroopilly, Qld.: Bureau of sugar experiment station.. 2000. p. 263-289.

CTC.**Centro de Tecnologia Canavieira**. Disponível em:<http://www.ctcanavieira.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=485&Itemid=1276.>Acesso em: 30 set. 2011.

DEL PONTE, E.M.; GODOY, C.V.;DUPREEZ, E.D.; VANRIJ, N.C.; CALDWELL, P.M.; YANG, X.B. Predicting regional Asian soybean rust outbreaks in Brazil and South Africa. **Phytopatology**, Saint Paul, v.95, p. 23, 2005.

DEL PONTE, E.M.; GODOY, C.V.; CANTERI, M.G.; REIS, E.M.; YANG, X.B. Models and applications for risk assessment and prediction of Asian soybean rust epidemics. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v.31, p.533-544, 2006.

DEL PONTE, E.M.; MAIA, A.H.N.; SANTOS, T.V.; MARTINS, E.J.; BAETHGEN, W.E. Early-season warning of soybean rust regional epidemics using El Niño Southern/Oscillation information. **International Journal of Biometeorology** (Print), v.55, n.4, p.575-583, 2011.

DIAS, A.S.;HARMON, P.F.; HARMON, C.L.; YANG, X. Effects of light intensity and time on the incidence and severity of Asian soybean rust. **Phytopathology**, St. Louis, v. 97, p. 28, 2007.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB,1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e drenagem, 33).

EGAN, B.T. Rust. In: HUGHES, C.G. ABBOTT, E.V.; WISMER, C.A. (Org.). **Sugar-cane Diseases of the World.** Col. 2. Amsterdam:Elsevier Publishing,1964. p.60-68.

EMBRAPA. Puccinia kuehnii, um risco para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil. **Comunicado Técnico 184**, Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.cenargen.embrapa.br>. Acesso em: 20 ago. 2010.

EMBRAPA SOJA. Sistema de Alerta. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/alerta/>.Acesso em 14 jul. 2012.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <http://faostat.fao.osr/site/339/default.aspx>. Acesso em: 21jan. 2012.

FERRARI, J.T.; HARAKAVA, R.; DOMINGUES, R.J.; TERÇARIOL, I.M.L. **Ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar.** São Paulo: Instituto Biológico, 2010. 8p. (Documento Técnico, 5).

FLORES, R.C.; LOYO, J.R.; OJEDA, R.A.; RANGEL,O.C.A.; CERÓN, F.A.; MÁRQUEZ,W.; GUERRA-MORENO, A.S.; HERNANDEZ-IBARRA, H.M.; GONZÁLEZ, R.E.; CASTLEBURY, L.A.; DIXON, L.J.; GLYNN, N.C.; COMSTOCK, J.C.; FLYNN, J; AMADOR, J. First Report of Orange Rust of Sugarcane Caused by *Puccinia kuehnii* in Mexico, El Salvador, and Panama. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 93, n.12, p. 1347, 2009.

FUNDAÇÃO ABC. Sistema de informação de doenças da soja.Disponível em:< sid.fundacaoabc.org.br>. Acesso em: 14 jul. 2012.

GARCIA, E.O.; CASAGRANDE, M.V.; RAGO, A.M.; MASSOLA JR., N.S. Preservação de urediniósporos de *Puccinia melanocephala*, agente causal de ferrugem em cana-de-açúcar. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v.33, n.2, p.152-156, 2007.

GILLESPIE, T.J.; SENTELHAS, P.C. Agrometeorology and plant disease management – a happy marriage**. Scientia Agricola,** Piracicaba,v.65, special issue, p.71-75, Dec. 2008.

GOUVÊA, J.R.F. **Mudanças Climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura de cana-de-açúcar na região de Piracicaba.** 2008. 100 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) **-** Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

HEINZ, D.J. (Ed.). **Sugarcane improvement through breeding.** Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1987. 603 p.

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.

ISARD, S.A.; RUSSO, J.M.; DEWOLF, E.D. The establishment of a national Pest Information Platform for Extension and Education. **Plant Health Progress**, 2006. Disponível em: <http://www.ceal.psu.edu/Isard06.pdf>. Acesso em:12 jul. 2012.

ISARD, S.A.;GAGE, S. H.; COMTOIS, P.; RUSSO, J.M. Principles of the atmospheric pathway for invasive species applied to soybean rust. **BioScience,** v. 55, p. 851-861, 2005.

KIM, K.S.; WANG, T.C.; YANG, X.B. Simulation of apparent infection rate to predict severity of soybean rust using a fuzzy logic system. **Phytopathology,** Saint Paul, v.95, p. 1122-1131, 2005a. Disponível em:

<http://apsjournals.apsnet.org/doi/pdf/10.1094/PHYTO-95-1122> Acesso em: 12 jul.2012.

KIM, K.S.; YANG, X.B.; PAN, Z.; PEREZ-HERNANDES, O. Simulation of spore trajectories to identify potential pathways of soybean rust in the United States. **Phytopathology,** Saint Paul, v. 95, p. 54, 2005b.

KOCHMAN, J.K. The effect of temperature on development of soybeans rusts (Phakopsorapachyrhizi). **Australian Journal of Agricultural Research,** Victoria, v. 30, p. 273-277, 1979.

LEITE, R.C.C. **Pró-alcool:** a única alternativa para o futuro. Campinas: UNICAMP, 1987. 86 p.

MAGAREY, R.C. Orang rust. *In*: A Guide to Sugarcane Diseases. ROTT, P.; BALEY, R.A.; COMSTOCK, J.C.; CROFT, B.J.; SAUMTALLY,A.S. (Org.). Paris: Cirad and ISSCT, 2000. p.121-125.

MAGAREY, R.C.; CROFT, B; WILLCOX, T; CORDINGLEY, A. Orange rust, a major pathogen affecting crops of Q124 in Queensland in 2000. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Tecnology**, Queensland, v. 23, p.274-280, 2001.

MAGAREY, R.; ISARD, S.; RUSSO, J.; GAGE, S.; HARTMAN, G.; MILES, M. Survey planning for soybean rust based on aerobiological and climatological factors. Report to USDA, 2004a. Disponível em: < http://www.aphis.usda.gov/plant_health/plant_pest_info/soybean_rust/. 2004>. Acesso em:13 jul.2012.

MAGAREY, R.C.; NEILSEN, W.A.; MAGNANINI, A.J**.** Enviromental requeriments for spore germination in three sugarcane leaf pathogens. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Tecnology**, Queensland, v. 26, 2004b.

MAGAREY, R.C.; BULLL, J.I.; NEILSEN, W.A.; CAMILLERI, J.R.; MAGNANINI, A.J. Relating cultivar resistence to sugarcane yield using breeding selection trial analyses; orange rust and yellow spot. **Australian Journal of Experimental Agriculture,** Queensland, v. 44, n. 6, p. 1057-1064, 2008.

MARTINS, T.D. **Aspectos epidemiológicos da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar**. 2010. 67p. Tese (Doutorado em Ciências. Área de concentração: Fitopatologia)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

ORTOLANI, A. A. Aptidão climática para a cultura da seringueira em Minas Gerais. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.11, p.8-12, 1985.

OVALLE, W.; OROZCO, H.; QUEMÉ, J.; MELGAR, M.; GARCÍA, S. A Ferrugem Laranja na Guatemala e Estratégias de Manejo. Disponível em: http://www.SugarJournal.com. Acesso em: 29 jul. 2010.

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

PIVONIA, S., YANG, X.B. Assessment of potential year round establishment of soybean rust throughout the world. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 88, p. 523–529, 2004.

PIVONIA, S.; YANG, X.B. Relating epidemic progress from a general disease model to seasonal appearance time of rusts in the United States: implications for soybean rust. **Phytopathology**, Saint Paul, v.96, p. 400-407, 2006.Disponível em: <http://apsjournals.apsnet.org/doi/pdf/10.1094/PHYTO-96-0400>. Acesso em: 12 jul. 2012.

ProMED-mail. **Program for Monitoring Emerging Diseases**. Orange rust, sugarcane - Australia: (Qeensland), new strain susp. Disponível em: <http://www.promedmail.org/direct.php?id=20120212.1040137>. Acesso em: 6dez. 2012.

REIS, E.M.; SARTORI A.F.; CAMARA, R.K. Modelo climático para a previsão da ferrugem da soja. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 30, p. 290-292, 2004.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas 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, n. 1, p. 133-137, 1998.

RYAN, C.C.; EGAN, B.T. Rust. In: . RICAUD, C.; EGAN, B.T.; GILLASPIE Jr., A.G.; HUGHES, C.G. (Org.).**Diseases of sugarcane**, **major diseases**. Amsterdam:Elsevier Publishing, 1989. p.189-210.

SANTOS, E.A. **Duração do período de molhamento foliar: medida com sensores eletrônicos, variabilidade espacial em culturas e estimativas com modelos empíricos.** 2006. 56p. Dissertação de (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SAUMTALLY, A.S.; VIREMOUNEIX, T.R.;AHONDOKPÊ, B.; GIRARD, J-C.R; CASTLEBURY, L.A.; GLYNN, N.C.; COMSTOCK, J.C. First Report of Orange Rust of Sugarcane Caused by *Puccinia kuehnii* in Ivory Coast and Cameroon. **Disease Notes.** Africa: ORS, 2011. p. 95-357.

SCORALERT. **Sugarcane Orange Rust Alert System.** Disponível em: <http://www.scoralert.com> . Acesso em 29 jul. 2011.

SECRETARIA DA AGRICULTURA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Zoneamento Agrícola do estado de São Paulo. Campinas: CATI, 2 volumes e 1 suplemento, 1974.

STAIER, T.N.; MAGAREY, R.C; FINLAYSON, W.A. Meteorologicol data collection, analysis and sugarcane disease forecasting for orange rust. **Proceedings of**

Australian Society of Sugar Cane Tecnology, Queensland, v. 26, 2004. 1 CD-ROM.

TAN, Y.J.; YU, Z. ;YANG, C.Y. **Soybean rust**. Beijing:China Agricultural Press,1996. 99p.

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

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Tecnology, 1955. 104p.

WAGGONER, P.E.; BERGER, R.D. Defoliation, disease and growth. **Phytopathology**, Saint Paul, v.77, p. 393-398, 1987.

WILLCOX, T.; CROFT, B.J. Quantifying risk of loss from sugarcane diseases and other variety related causes. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Tecnology**, Queensland, v. 26, p. 1-8, 2004.

YANG, X.B.; DOWLER, W.M.; TSCHANZ, A.T. A simulation model for assessing soybean rust epidemics. **Journal of Phytopathology,** Berlin, v.133, p. 187-200, 1991.