

**ROBSON ALVES DE OLIVEIRA**

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA AS  
PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DE MINAS GERAIS**

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

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2010**


**ROBSON ALVES DE OLIVEIRA**

**MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR PARA AS  
PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DE MINAS GERAIS**


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


**APROVADA: 12 de julho de 2010.**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Márcio Henrique Pereira Barbosa  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sérgio Zolnier  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Mariano Pereira Silva

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Welliam Chaves Monteiro da  
Silva

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Aristides Ribeiro  
(Orientador)

*A Deus  
A minha querida Rozi  
A minha mãe  
Aos meus sobrinhos e sobrinha  
A meu pai e meus irmãos*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que me protege em todos os instantes de minha vida e me ilumina.

A minha querida Rozi, meu porto seguro, por todo amor e carinho, por toda a dedicação e estímulo e por sua presença e apoio nas horas mais tensas.

Ao Prof. Aristides por ter acreditado no meu potencial, me dando a oportunidade de realizar esse trabalho.

A minha mãe por nunca ter deixado de acreditar em mim, nos momentos mais difíceis sempre me deu força.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização desse curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante todo o curso.

Ao Prof. Márcio Henrique Pereira Barbosa que generosamente nos forneceu os dados de produtividade do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar, pela atenção, pelas valiosas sugestões e amizade.

Ao professor Sérgio Zolnier pelos valiosos ensinamentos e amizade.

Aos demais professores do programa pós-graduação em Meteorologia Agrícola pelos ensinamentos.

A todos os amigos da SOPA, pela amizade e incentivo, em especial ao Nilton que se mostrou um grande amigo durante esse período.

Aos colegas da pós-graduação em Meteorologia Agrícola pelo apoio e incentivo durante todo o curso, em especial a aqueles que contribuíram diretamente para a realização desse trabalho.

A todos os colegas de Viçosa que torceram muito por mim.

Ao meu pai, meus irmãos, cunhadas, e amigos que mesmo longe sempre estão me apoiando e incentivando.

A Graça, secretária da pós-graduação em Meteorologia Agrícola, sempre disposta a nos ajudar.

A todos os funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Agrícola pela presteza.

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

## **BIOGRAFIA**

Robson Alves de Oliveira, filho de Sinézio de Oliveira e Regina Alves de Oliveira, nasceu no dia 07 de janeiro de 1980, em Cachoeiro de Itapemirim, Estado do Espírito Santo.

Em janeiro de 2009, graduou-se em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais.

Em março de 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em 12 de julho de 2010.

## SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xv
RESUMO .....	xvi
ABSTRACT .....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. A produção da cana-de-açúcar no Brasil e em Minas Gerais.....	4
2.2. A cana-planta e a cana-soca .....	6
2.3. Variedades.....	7
2.4. Condicionamento agrometeorológico da produtividade da cana-de-açúcar.....	8
2.4.1. Temperatura do ar.....	8
2.4.2. Necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar .....	9
2.5. Modelos agrometeorológicos de estimativa da produtividade de culturas.....	11
2.5.1. Modelagem na agricultura .....	11
2.5.2. Modelagem de crescimento para a cultura da cana-de-açúcar.....	13
2.5.3. O método da Zona Agroecológica .....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	18
3.1. Área de Estudo e Base de Dados.....	18
3.2. Método da Zona Agroecológica (ZAE) .....	22
3.2.1. Produtividade potencial da cana-de-açúcar ( $PP_{cana}$ ).....	24
3.2.2. Fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens ( $\bar{F}$ ) .....	25
3.2.3. Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para período de céu nublado ( $\overline{PB}_n$ ) e claro ( $\overline{PB}_c$ ).....	26
3.2.4. Taxa de produção bruta de matéria da cultura padrão ( $PPB_P$ ) .....	27
3.2.5. Determinação do coeficiente de índice de área foliar ( $C_{IAF}$ ) .....	29
3.2.6. Determinação da correção para a respiração ( $C_R$ ).....	30
3.2.7. Determinação do índice de colheita ( $C_{COL}$ ).....	30
3.2.8. Determinação do coeficiente de umidade ( $C_{UM}$ ) .....	30
3.2.9. Evapotranspiração da cultura ( $ET_{C_{cana}}$ ).....	31
3.2.10. Balanço hídrico .....	33

3.2.11. Produtividade da cana-de-açúcar limitada pela disponibilidade hídrica ao longo do ciclo (PRcana) .....	34
3.2.12. Quebra relativa de produtividade (QP) .....	35
3.3. Desempenho estatístico do modelo .....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
4.1. Parametrização e calibração do método ZAE .....	38
4.2. Validação do método ZAE .....	46
5. CONCLUSÕES .....	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
APÊNDICES .....	60
APÊNDICE A .....	61
APÊNDICE B .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANA	Agência Nacional de Água
ARM	Armazenamento de água no solo [mm]
CAD	Capacidade de água disponível [mm]
$C_{COL}$	Índice de colheita [adimensional]
$C_{IAF}$	Coeficiente de correção do índice de área foliar [adimensional]
$C_R$	Coeficiente de correção da respiração [adimensional]
$C_{UM}$	Coeficiente da umidade da cana-de-açúcar [adimensional]
d	Índice de Concordância de Willmott [adimensional]
DEF	Deficiência hídrica [mm]
$ET_c$	Evapotranspiração da Cultura [mm]
$ET_{C_{cana}}$	Evapotranspiração da cana-de-açúcar [mm]
$ET_o$	Evapotranspiração de Referência [mm]
$ET_r$	Evapotranspiração real [mm]
$ET_{r_{cana}}$	Evapotranspiração real da cana-de-açúcar [mm]
EXC	Excedente hídrico [mm]
F	Fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens [adimensional]
FAO	Food and Agriculture Organization
GDA	Graus-dia Acumulados [ $^{\circ}C d^{-1}$ ]
IAF	Índice de Área Foliar [ $m^2 m^{-2}$ ]
$IAF_{max}$	Índice de área foliar máximo [ $m^2 m^{-2}$ ]
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
$K_c$	Coeficiente de Cultivo [adimensional]
$K_y$	Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico [adimensional]
MAE	Erro Absoluto Médio [ $t ha^{-1}$ ]
MBE	Viés Médio [ $t ha^{-1}$ ]
ND	Duração do ciclo de crescimento [dias]
$PB_c$	Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para período de céu claro [ $kg ha^{-1} d^{-1}$ ]
$PB_n$	Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para

	período nublado [ $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ]
PMGCA	Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar
PPB <sub>P</sub>	Taxa de produção bruta de matéria seca [ $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ]
PPB <sub>P</sub>	Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão [ $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$ ]
PP <sub>cana</sub>	Produtividade Potencial da Cana-de-açúcar [ $\text{kg ha}^{-1}$ ]
PR <sub>cana</sub>	Produtividade limitada pela disponibilidade hídrica da cana-de-açúcar [ $\text{kg ha}^{-1}$ ]
QP	Quebra relativa da produtividade da cana-de-açúcar [%]
$r^2$	Coefficiente de Determinação
RIDESA	Rede Interuniversitária para Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio [ $\text{t ha}^{-1}$ ]
$R_o$	Irradiância solar no topo da atmosfera [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ]
$R_s$	Irradiância solar global à superfície [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ]
$R_{so}$	Irradiância solar na superfície para dias claros [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ]
$T_b$	Temperatura Base [ $^{\circ}\text{C}$ ]
TCH	Toneladas de Colmos por Hectare [ $\text{t ha}^{-1}$ ]
$T_{med}$	Temperatura Média do Ar [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_n$	Temperatura mínima do dia [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_{n+1}$	Temperatura mínima do dia posterior [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_x$	Temperatura máxima do dia [ $^{\circ}\text{C}$ ]
ZAE	Zona Agroecológica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação relativa dos principais países produtores de cana-de-açúcar no ano de 2007 (FAOSTAT – 2010). .....	4
Figura 2 – Evolução da produção e da área plantada de cana-de-açúcar em Minas Gerais nos anos de 2000 a 2010 (SEAPA-MG, 2010). .....	5
Figura 3 – Participação relativa das regiões produtoras de cana-de-açúcar no Estado de Minas Gerais em 2010 (IBGE, 2010). .....	5
Figura 4 – Mapa do Estado de Minas Gerais com a localização das Usinas e Destilarias do PMGCA utilizadas neste estudo. ....	20
Figura 5 – Esquema do Método da Zona Agroecológica. ....	23
Figura 6 – Descrição dos estádios de crescimento. ....	32
Figura 7 – Relação entre a produtividade limitada pela disponibilidade hídrica estimada pelo método ZAE e a produtividade observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV para o ciclo da cana-planta. ....	39
Figura 8 – Distribuição da produtividade observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV e estimada pelo método ZAE para o ciclo da cana-planta. ....	40
Figura 9 – Relação entre a produtividade limitada pela disponibilidade hídrica estimada pelo método ZAE e a produtividade observada em condições de campo nos experimentos do PMGCA-UFV para o primeiro ciclo da cana-soca. ....	41
Figura 10 – Distribuição da produtividade observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV e estimada pelo método ZAE para o primeiro ciclo de cana-soca. ....	42
Figura 11 – Perdas estimadas pelo método ZAE na produtividade da cana-planta devido ao déficit hídrico ao longo do ciclo. ....	43
Figura 12 – Perdas estimadas pelo método ZAE na produtividade da primeira cana-soca devido ao déficit hídrico ao longo do ciclo. ....	43

Figura 13 – Precipitação total observada por experimentos para o ciclo da cana-planta. ....	44
Figura 14 – Precipitação total observada por experimento para o ciclo de primeira cana-soca. ....	45
Figura 15 – Distribuição temporal da produtividade média estimada pelo método ZAE e da produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE). ....	47
Figura 16 – Relação entre a produtividade média estimada pelo método ZAE e a produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE). ....	48
Figura 17 – Distribuição temporal das médias corrigidas de produtividade estimadas pelo método ZAE e da produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE). ....	49
Figura 18 – Relação entre produtividade média estimada pelo método ZAE corrigida e a produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE)...	50

## **APÊNDICE A**

Figura 1 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 1 para o ciclo da cana-planta. ....	61
Figura 2 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 2 para o ciclo da cana-planta. ....	62
Figura 3 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 3 para o ciclo da cana-planta. ....	63
Figura 4 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 4 para o ciclo da cana-planta. ....	64

Figura 5 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 5 para o ciclo da cana-planta.....	65
Figura 6 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 6 para o ciclo da cana-planta.....	66
Figura 7 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 7 para o ciclo da cana-planta.....	67
Figura 8 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 8 para o ciclo da cana-planta.....	68
Figura 9 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 9 para o ciclo da cana-planta.....	69
Figura 10 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 10 para o ciclo da cana-planta.....	70
Figura 11 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 11 para o ciclo da cana-planta.....	71
Figura 12 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 12 para o ciclo da cana-planta.....	72
Figura 13 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 13 para o ciclo da cana-planta.....	73
Figura 14 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 14 para o ciclo da cana-planta.....	74

Figura 15 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 15 para o ciclo da cana-planta. ....	75
---	----

## APÊNDICE B

Figura 1 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 16 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	76
Figura 2 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 17 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	77
Figura 3 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 18 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	78
Figura 4 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 19 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	79
Figura 5 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 20 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	80
Figura 6 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 21 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	81
Figura 7 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 22 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	82
Figura 8 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 23 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	83

Figura 9 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 24 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	84
Figura 10 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 25 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	85
Figura 11 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 26 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	86
Figura 12 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 27 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	87
Figura 13 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 28 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	88
Figura 14 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 29 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	89
Figura 15 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 30 para o ciclo da primeira cana-soca. ....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Época de colheita da cana-de-açúcar em função do ciclo de maturação das variedades.....	7
Tabela 2 – Identificação das estações meteorológicas do INMET utilizadas	18
Tabela 3 – Identificação das estações pluviométricas da ANA utilizadas....	19
Tabela 4 – Usinas e destilarias, estações do INMET e código das estações da ANA utilizadas.....	19
Tabela 5 – Experimentos utilizados para o ciclo da cana-planta, com as respectivas datas de plantio e corte e a duração do ciclo.....	21
Tabela 6 – Experimentos utilizados para o ciclo da primeira cana-soca, com as respectivas datas dos cortes e a duração do ciclo.....	21
Tabela 7 – Valores de $PPB_P$ ( $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) para a cultura da cana-de-açúcar em função da temperatura média do ar durante o ciclo da cultura ..	28
Tabela 8 – Coeficientes de cultura para a cana-de-açúcar.....	31
Tabela 9 – Valores médios de produtividade para os dados observados em condições de campo, estimados após o ajuste estatístico .....	49

## RESUMO

OLIVEIRA, Robson Alves de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **Modelagem da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais.** Orientador Aristides Ribeiro. Coorientadores: Márcio Henrique Pereira Barbosa e Sérgio Zolnier.

A cana-de-açúcar compõe um setor da agricultura, que tem apresentado uma rápida e grande expansão no Estado de Minas Gerais, principalmente na região do Triângulo Mineiro, movimentando grande montante de capital, tecnologia, pessoas e informação. Entretanto, são encontrados poucos estudos que relacionem a produtividade agrícola real (limitada pela disponibilidade hídrica ao longo do ciclo) da cana-de-açúcar aos fatores climáticos característicos desse estado. Nesse contexto a modelagem apresenta-se como uma importante ferramenta para integrar os fatores que afetam a produtividade da lavoura canavieira, podendo gerar subsídios para a definição de políticas públicas e de tomada de decisão, para a caracterização das alternativas de manejo e minimização dos riscos ambientais. Além disso, a modelagem pode proporcionar maior sustentabilidade do planejamento agrícola, reduzindo custos de produção e maximizando o uso dos recursos naturais sem prejudicar o meio ambiente. Assim, diante do exposto, este estudo teve por objetivo parametrizar, calibrar e validar o método da Zona Agroecológica (ZAE) para a estimativa da produtividade limitada pela disponibilidade hídrica (em condições de sequeiro) da cana-de-açúcar de modo a torná-lo aplicável à previsão de safra, a partir de dados meteorológicos e da cultura. Nas simulações, foram utilizados, como parâmetros de entrada do modelo, dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados de precipitação da rede de estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA). Para calibração e parametrização do método ZAE, foram utilizados dados de produtividade da variedade RB835486 de 15 experimentos para o ciclo da cana-planta e 15 experimentos para a primeira soca, realizados em usinas e destilarias de Minas Gerais, os quais foram obtidos junto ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, e eram provenientes do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar (PMGCA-UFV).

Para o ciclo da cana-planta, o método ZAE apresentou bom ajuste com os dados observados pelo PMGCA-UFV, com  $r^2 = 0,77$ ; RMSE = 7,1 t ha<sup>-1</sup>; MAE = 5,6 t ha<sup>-1</sup>; MBE = 1,0 t ha<sup>-1</sup> e índice d = 0,94. Para o primeiro ciclo de cana-soca, obteve-se um  $r^2 = 0,89$ ; RMSE = 8,4 t ha<sup>-1</sup>; MAE = 6,7 t ha<sup>-1</sup>; MBE = 5,9 t ha<sup>-1</sup> e índice d = 0,95. Uma vez que a parametrização e a calibração apresentaram bons resultados, buscou-se validar o método ZAE utilizando-se uma série temporal de dados de produtividade do IBGE das safras de 1989/90 a 2007/08, para a região do Triângulo Mineiro. Foram simulados três períodos de colheita da cana-soca (precoce, média e tardia) pelo método ZAE, utilizando-se a média dos três períodos como produtividade estimada. Pela análise, foi constatado um erro sistemático do modelo com tendência de superestimativa da produtividade de aproximadamente 37 t ha<sup>-1</sup> ( $r^2 = 0,55$ ; RMSE = 37,3 t ha<sup>-1</sup>; MAE = 37,0 t ha<sup>-1</sup>; MBE = 37,0 t ha<sup>-1</sup>; índice d = 0,19). Entretanto, as estimativas pelo método ZAE seguiram o comportamento temporal da série histórica da produtividade média do IBGE. Corrigindo-se a tendência média de superestimativa, o método ZAE apresentou ajuste satisfatório ( $r^2 = 0,55$ ; RMSE = 4,9 t ha<sup>-1</sup>; MAE = 4,0 t ha<sup>-1</sup>; MBE = 0,0 t ha<sup>-1</sup>; índice d = 0,80). Assim, este modelo se apresentou como uma importante ferramenta para estimar a produtividade da cana-de-açúcar em macroescala no Estado de Minas Gerais, podendo auxiliar no planejamento da expansão otimizada da atividade na região.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Robson Alves de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2010. **Yield modeling of sugarcane for the major producing regions of Minas Gerais.** Adviser: Aristides Ribeiro. Co-Advisers: Márcio Henrique Pereira Barbosa and Sérgio Zolnier.

The sugarcane composes a sector of agriculture that has presented a fast and great expansion in the State of Minas Gerais, especially in the Triângulo Mineiro region, involving large amounts of capital, technology, people and information. However, few studies relate real agricultural yield (limited by water availability throughout the cycle) of sugarcane to the climatic factors characteristic of this state. In this context, the modeling presents as an important tool to integrate the factors that affect the yielding of sugarcane crop, which may generate input for the definition of public policies and decision-making, concerning the characterization of alternative management and minimization of environmental risks. Besides, the modeling may provide more sustainability in agricultural planning, reducing production costs and maximizing the use of natural resources without harming the environment. In this context, this study had for objective to parameterize, calibrate and validate the method the Agroecological Zone (AEZ) for estimating the yield limited by water (dry conditions) of sugarcane in order to make it applicable to the crop forecast, from meteorological data and culture. In simulations, meteorological data from the National Institute of Meteorology (INMET) and precipitation data of the network of rainfall stations from National Water Agency (ANA) were used as input parameters of model. For calibration and parameterization of the AEZ method, data from the cultivar RB835486 productivity of 15 experiments for the cycle of plant crop and 15 experiments for the first cycle ratoon crop which took place in, mills and distilleries in Minas Gerais, obtained from the Plant Science Department, Federal University of Viçosa and from the Breeding Program of Sugarcane (PMGCA-UFV) were used. For the cycle of plant crop, the ZAE method presented good fit with the data observed by PMGCA-UFV, with  $r^2 = 0.77$ , RMSE = 7.1 t ha<sup>-1</sup>; MAE = 5.6 t ha<sup>-1</sup>, MBE = 1.0 t ha<sup>-1</sup> and d index = 0.94. For the first cycle of ratoon crop it was obtained  $r^2 = 0.89$ , RMSE = 8.4 t ha<sup>-1</sup>; MAE = 6.7 t ha<sup>-1</sup>,

MBE = 5.9 t ha<sup>-1</sup> d index = 0.95. As calibration and parameterization showed good results, it was attempted to validate the method AEZ, using a series of yielding data from the IBGE harvest from 1989/90 to 2007/08, for the Triângulo Mineiro region. Three periods of harvest ratoon crop (early, middle and late) were simulated by the AEZ method, using the average of the three periods as estimated yield. Through the analysis, it was verified a systematic error of the model with a tendency to overestimate the yield of approximately 37.0 t ha<sup>-1</sup> ( $r^2 = 0.55$ , RMSE = 37.3 t ha<sup>-1</sup>; MAE = 37.0 t ha<sup>-1</sup>, MBE = 37.0 t ha<sup>-1</sup>; d index = 0.19). However, estimates by the AEZ method followed the temporal behavior of the historical series of the average yield of the IBGE. Correcting the average trend of overestimated, the AEZ method presented satisfactory fit ( $r^2 = 0.55$ , RMSE = 4.9 t ha<sup>-1</sup>; MAE = 4.0 t ha<sup>-1</sup>, MBE = 0.0 t ha<sup>-1</sup>; d index = 0.80). Thus, this model presented an important tool for estimating the yield of sugarcane in macro scale in the State of Minas Gerais, assisting in planning the optimal expansion of activity in the region.

## 1.INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar foi incorporada ao território brasileiro durante sua colonização, voltada principalmente para a produção de açúcar, configurando-se como um dos primeiros sistemas agrícolas para exportação. A cultura apresenta expressiva importância na formação sócio-política nacional, sendo componente histórico, econômico e cultural. Atualmente, a cultura da cana-de-açúcar compõe um setor que movimenta grande montante de capital, tecnologia, pessoas e informação (CARVALHO, 2009).

Na década de setenta, do século passado, projetos governamentais que incentivavam o plantio, devido à importância estratégica do etanol para o desenvolvimento nacional como alternativa de combustível frente às crises do petróleo, ocasionaram uma grande expansão da cana-de-açúcar no país. (ZANZARINI et al., 2009).

A produção da cana-de-açúcar teve um novo incentivo no início do século XXI devido à crescente preocupação com o meio ambiente e com a redução dos estoques e alta do preço dos combustíveis fósseis. A procura por fontes de energia renováveis e menos poluentes beneficia a produção da cana-de-açúcar, visto que o etanol é uma importante fonte de energia alternativa de menor impacto ao meio ambiente.

O Estado de Minas Gerais tem apresentado uma rápida e grande expansão da cultura da cana-de-açúcar, em especial na região do Triângulo Mineiro. Esta região que antes se destacava pela criação de gado e cultivo de grãos vai adquirindo novas características, com a expansão das lavouras de cana-de-açúcar. Entretanto, apesar da expansão da atividade canavieira, poucos estudos contemplam o planejamento otimizado no estado, principalmente os que relacionem a produtividade agrícola da cana-de-açúcar aos fatores que afetam seu sistema de produção, tais como fatores relacionados à planta (variedades, ciclo da cultura), ao clima (temperatura do ar, radiação, precipitação), ao solo (tipo, fertilidade) e às práticas culturais (época de plantio, densidade, rotação de cultura) (SILVA, 2009; BONNET et al., 2006; GILBERT et al., 2006; BELL e GARSIDE, 2005; PARK et al., 2005; SINGELS et al., 2005a; BEZUIDENOUT, 2000; DOORENBOS; KASSAM,

1979). Esses fatores têm sido incorporados a modelos de simulação de crescimento que descrevem processos ambientais, fisiológicos e de manejo da cultura, tornando-se possível avaliar as restrições ao desenvolvimento agrícola e obter estratégias para o incremento da produção.

Os modelos de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas possibilitam uma economia de tempo, trabalho e quantidade de recursos. Eles fornecem meios importantes para integrar muitos fatores diferentes que afetam a produtividade das culturas. A aplicação desses modelos na agricultura constitui uma ferramenta que pode ser um importante subsídio para a definição de políticas públicas e tomada de decisão, para minimização dos riscos ambientais e redução dos custos de produção, proporcionando maior sustentabilidade do planejamento agrícola, pois maximiza o uso dos recursos naturais sem prejudicar o meio ambiente (GOUVÊA, 2008; SANTOS, 2008; KEATING et al., 1999). Portanto, a utilização de um modelo de estimativa de produtividade para a cana-de-açúcar exerce importante papel econômico, sendo uma ferramenta eficaz para a análise do comportamento da cultura em diferentes condições climáticas (GOUVÊA, 2008).

Modelos biofísicos que integram as informações sobre as condições de cultivo das culturas podem dar uma visão antecipada sobre a produção de uma cultura. Scarpari e Beauclair (2009) destacam que os modelos de previsão de produtividade são importantes na lavoura canavieira, pois as estimativas de rendimento ao longo da safra possibilitam a caracterização das alternativas de manejo e o aumento da eficácia das decisões gerenciais e estratégicas. Everingham et al. (2009) enfatizam que as previsões de produção são úteis para o sucesso de qualquer indústria agrícola que planeja ou vende a produção antes da colheita anual.

Dentre os modelos disponíveis para simulações, o método apresentado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, sigla em inglês) para a estimativa da produtividade potencial, Método da Zona Agroecológica (ZAE), e da produtividade penalizada pelo déficit hídrico relativo ao longo do ciclo, tem se mostrado

como um dos mais aplicáveis, em razão da baixa exigência em termos de dados de entrada (ANDRIOLI et al., 2006).

Sendo assim, considerando-se a importância da cultura da cana-de-açúcar na agricultura do Brasil, bem como de Minas Gerais, torna-se necessário a utilização de um modelo simplificado de previsão de produtividade que seja adaptado a realidade deste Estado e de fácil utilização pelo público não especializado. Logo, diante do exposto acima, este estudo tem por objetivo parametrizar, calibrar, e validar o método da Zona Agroecológica (ZAE) da FAO para a estimativa da produtividade limitada pela disponibilidade hídrica (em condições de sequeiro) da cana-de-açúcar de modo a torná-lo aplicável à previsão de safra a partir de dados meteorológicos e da cultura para as principais regiões produtoras do Estado de Minas Gerais.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. A produção da cana-de-açúcar no Brasil e em Minas Gerais

Atualmente, a cana-de-açúcar ocupa mais de 8,2 milhões de hectares, sendo o país o maior produtor mundial. Em 2006, o Brasil representou cerca de 40% do total do comércio mundial de açúcar (COLIN, 2009). A produção brasileira em 2008 foi de 645,3 milhões de toneladas, com produtividade média de 79,27 t ha<sup>-1</sup> (IBGE, 2010). A Figura 1 apresenta a participação relativa dos principais países produtores de cana-de-açúcar. Em 2007 a produção brasileira representou 33% da produção mundial de cana-de-açúcar (FAOSTAT, 2010).

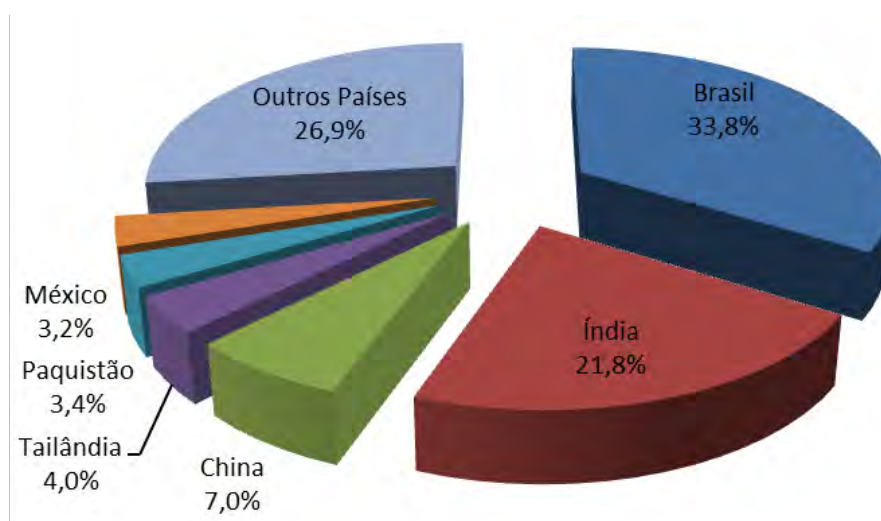


Figura 1 – Participação relativa dos principais países produtores de cana-de-açúcar no ano de 2007 (FAOSTAT – 2010).

A cana-de-açúcar expandiu-se rapidamente no estado na última década (Figura 2) e Minas Gerais já é o segundo maior produtor nacional, contribuindo com 8,75% da produção nacional, com uma produção superior a 61 milhões de toneladas (IBGE, 2010), sendo que aproximadamente 54% desse total são destinados à indústria de etanol (SEAPA – MG, 2010).

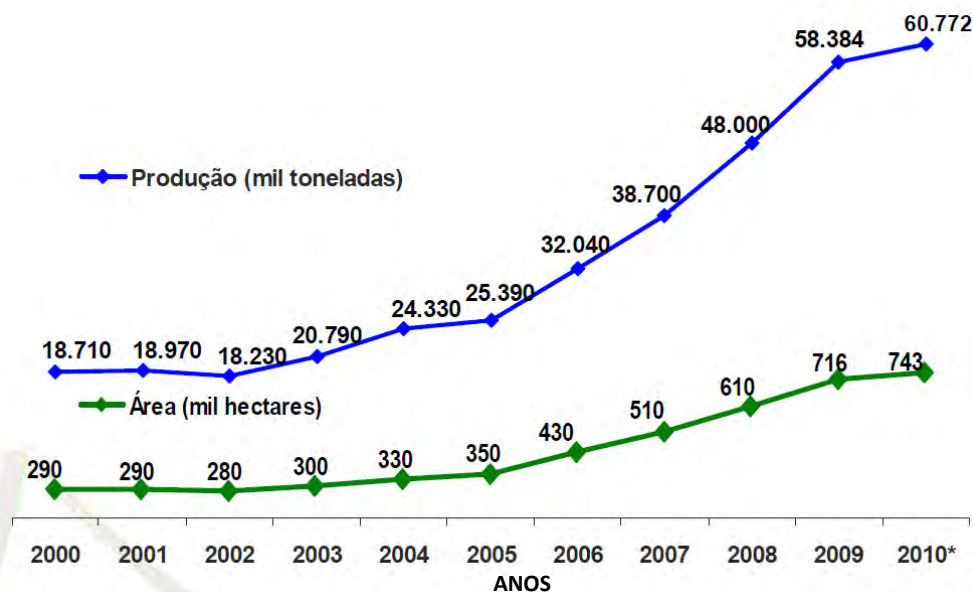


Figura 2 – Evolução da produção e da área plantada de cana-de-açúcar em Minas Gerais nos anos de 2000 a 2010 (SEAPA-MG, 2010).

A região do Triângulo Mineiro é a principal produtora de Minas Gerais e Uberaba lidera a produção de cana-de-açúcar entre os municípios, com destaque também para os municípios de Conceição das Alagoas, Ituiutaba, Frutal e Iturama. Das 10 usinas que entraram em funcionamento na safra de 2010 no Brasil, três estão em Minas Gerais (SEAPA – MG, 2010). Atualmente, existem 43 usinas de açúcar e etanol em produção no Estado, 23 delas localizadas no Triângulo, representando 69% do total da produção mineira (IOMG, 2010).

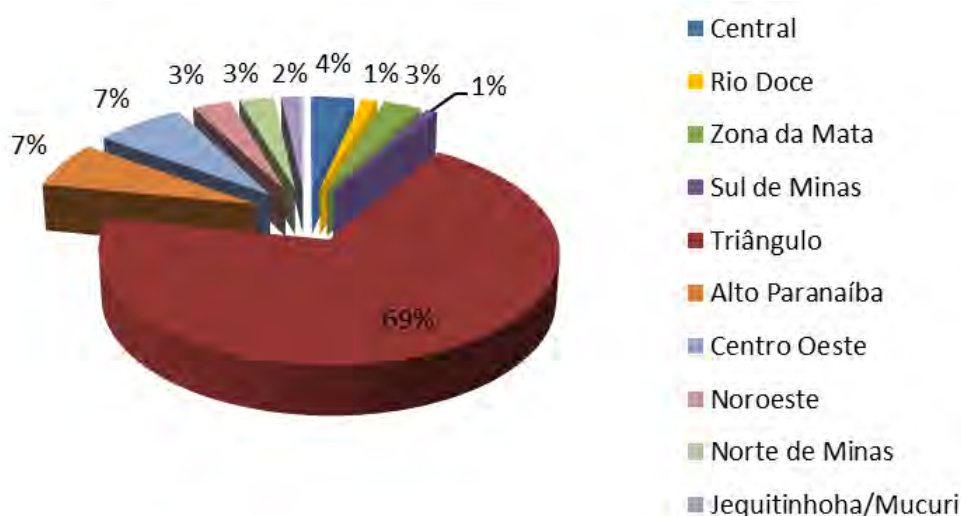


Figura 3 – Participação relativa das regiões produtoras de cana-de-açúcar no Estado de Minas Gerais em 2010 (IBGE, 2010).

## 2.2. A cana-planta e a cana-soca

O ciclo da cana plantada pela primeira vez, oriunda de partes vegetativas e que receberá o primeiro corte, recebe o nome de ciclo da cana-planta.

Devido as condições do clima predominantes no centro-sul do Brasil, o plantio da cana-de-açúcar geralmente é realizado em duas épocas distintas, proporcionando cultivos conhecidos como cana-de-ano e cana-de-ano-e-meio (CARVALHO, 2009; SEGATO et al., 2006).

A cana-de-ano, normalmente, é plantada entre setembro e novembro, no início da estação chuvosa, com colheita após um ciclo médio de 12 meses. Neste sistema, o canavial apresenta máxima taxa de crescimento entre novembro e abril em virtude do longo fotoperíodo, alta temperatura e disponibilidade hídrica, diminuindo após esse período devido às condições climáticas adversas, com possibilidade de colheita, dependendo da variedade, a partir do mês de julho. Tem-se, então, aproximadamente 8 meses de desenvolvimento vegetativo e 4 meses para ocorrer a maturação (SEGATO et al., 2006).

A cana-de-ano-e-meio é plantada entre janeiro e início de abril (no meio da estação chuvosa e quente) e colhida entre maio e novembro do ano seguinte, dependendo da época de maturação e da variedade utilizada, permanecendo em média de 14 a 18 meses no campo, daí sua designação cana-de-ano-e-meio. Neste sistema, após seu estabelecimento, o canavial passa por um período de repouso durante seu primeiro inverno, sendo cortado no inverno do ano seguinte (MARIN et al., 2009). Assim, como na cana-de-ano, o período de maior crescimento da cana-de-ano-e-meio também vai de novembro a abril, mas o canavial atinge este período mais desenvolvido, sendo capaz de responder em crescimento vegetativo mais rapidamente às condições ambientais favoráveis à cultura (SEGATO et al., 2006).

Após o corte da cana-planta, permanecem no solo as socas ou soqueiras da cana-de-açúcar. Com o corte da parte aérea da cana-de-açúcar, há perda de boa parte do sistema radicular da antiga planta. O corte

da cana-de-açúcar possibilita a renovação da cultura, não só da parte aérea, mas também do seu sistema radicular. O ciclo da cana-soca dura aproximadamente 12 meses.

Em termos da época de colheita, considera-se que canas a serem colhidas nos meses de abril, maio e junho são precoces; canas a serem colhidas em julho, agosto e setembro são consideradas de ciclo médio e canas a serem colhidas em outubro e novembro são consideradas tardias (Tabela 1). A colheita de cana-de-açúcar no período correto (no pico da maturidade) é necessária para conseguir um peso máximo de canas para moer produzidas com as menores perdas possíveis sob um dado ambiente de crescimento (SEGATO et al., 2006).

Tabela 1 – Época de colheita da cana-de-açúcar em função do ciclo de maturação das variedades

Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
PRECOCE			MÉDIA			TARDIA	

### 2.3. Variedades

Segundo Scarpari e Beauclair (2004), as características das diversas variedades de cana-de-açúcar são rusticidade, teor de açúcar, resistência a doenças e, principalmente, diferenciação quanto ao tempo para a maturação.

Dentre os programas de melhoramento no Brasil, destaca-se na obtenção de variedades o das Universidades Federais que compõem a Rede Interuniversitária para Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro – RIDESA, que gera as variedades com a sigla RB de República do Brasil (BARBOSA e SILVEIRA, 2010)

Montans Neto (2008) apresentaram um levantamento realizado em 99 unidades produtoras, totalizando uma área de 2.544.198 hectares. Os autores constataram que as variedades RB ocupam 54% da área total de produção, seguidas pelas variedades SP, com 39%. Na ocasião, as variedades IAC representam 2% e, as demais variedades (clones e, ou, variedades antigas), ocupam 5% da área total de produção.

## **2.4. Condicionamento agrometeorológico da produtividade da cana-de-açúcar**

### **2.4.1. Temperatura do ar**

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a temperatura é um dos fatores mais importantes na produção da cana-de-açúcar, sendo que a sua temperatura ótima gira em torno de 22 a 30°C, condições nas quais a cultura apresenta seu máximo desenvolvimento. Acima de 38°C não há crescimento da cana-de-açúcar.

O clima é outro fator que afeta a maturação e, como regra geral, cada variedade ao alcançar a maturação máxima deve ser colhida, caso contrário seu teor de sacarose declinará. Por isso existe um ajuste de época de plantio e colheita ao ciclo climático normal da região geográfica, sabendo-se que a precipitação intensa pode dificultar a colheita.

Dentro deste ciclo, considera-se que a diminuição da temperatura tem importância fundamental no processo de maturação, sendo responsável pela redução do ritmo vegetativo para o acúmulo de sacarose nos colmos. Quando não ocorre a redução da temperatura, necessariamente deve ocorrer uma seca moderada para ocasionar a redução da elongação do internódio, resultando no aumento do teor de sacarose nos colmos (SCARPARI, 2007).

A cana-de-açúcar, para aumentar seu teor de sacarose, necessita de uma época mais fria e mais seca. Onde não há deficiência hídrica, a temperatura ótima média tem que ser inferior a 21 °C pelo período de três meses para que ocorra um repouso vegetativo e inicie-se o processo de maturação. Em geral, os trabalhos não relatam a influência da queda de temperatura, mas apenas que a amplitude térmica poderá atuar como fator favorável à maturação (SCARPARI, 2002).

Segundo Carvalho (2009) e Almeida et al. (2008), o melhor índice bioclimático para correlacionar o desenvolvimento dos vegetais é o método dos graus-dias, que se baseia na premissa de que a planta necessita de certa quantidade de energia, representada pela soma de graus térmicos

acima de uma temperatura-base inferior, abaixo da qual o desenvolvimento é considerado nulo.

O tempo térmico é obtido a partir da acumulação da diferença entre a temperatura média ( $T_{med}$ ) e a temperatura base ( $T_b$ ) para cada dia desde a data de plantio. Em experimentos, para uma temperatura base de 16°C, a máxima densidade de colmos foi em torno de 500 graus-dias acumulados (GDA), e se estabilizou em torno de 1200 GDA (INMAN-BAMBER, 1994).

Almeida (2008) avaliou os padrões de crescimento e de produção da variedade RB92579 com os graus-dias, durante os cultivos de cana-planta e cana-soca, na região dos Tabuleiros Costeiros Alagoanos. Segundo o autor, a fase de estabelecimento da cultura (estádio inicial e estágio vegetativo) ocorreu com 750 GDA desde o plantio do cultivo da cana-planta, e com 600 GDA desde o corte na cana-soca. O estágio reprodutivo ocorreu entre os 750 e 1500 GDA na cana-planta e entre 600 e 950 GDA na cana-soca. A fase final (maturação) ocorreu entre 1500 e 2015 GDA na cana-planta e 950 e 1800 GDA na cana-soca.

#### **2.4.2. Necessidades hídricas da cultura da cana-de-açúcar**

Na cana-de-açúcar, os déficits hídricos provocam a redução da área foliar e o acúmulo de biomassa com ligeiro impacto na produção final (WIEDENFELD, 2000). O déficit hídrico severo ocasiona um impacto maior na produtividade dos colmos e de sacarose. Inman-Bamber (2004) concluiu que o acúmulo de biomassa é grandemente reduzido com déficit hídrico superior a 120 mm anuais e o acúmulo de sacarose no colmo é afetado com déficit hídrico superior a 145 mm anuais (ARGETON, 2006). A deficiência hídrica diminui a velocidade e o fluxo de translocação tanto para a região apical como para as raízes à medida que a restrição hídrica se acentua (MACHADO et al., 2009).

A água tem um importante papel na rebrota, mesmo assim, a sua escassez, dependendo da variedade, não implica em grandes perdas nesta fase. Porém, na fase sequente, a falta de água pode comprometer gravemente o rendimento final da cultura (CARVALHO, 2009).

Quando a quantidade de água não atende às necessidades hídricas da cultura, desenvolve-se um estado de estresse que afeta negativamente o crescimento e, por fim, o rendimento final da cultura, pois acarreta o fechamento dos estômatos e a diminuição da fotossíntese (PEREIRA et al., 2002). Um modo prático de se quantificar a deficiência hídrica e sua época de ocorrência é pela estimativa do balanço hídrico, o qual nada mais é do que o cômputo da precipitação e da evapotranspiração.

A razão entre a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) é denominada coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), que é utilizado para o processamento do balanço hídrico da cultura e para as estimativas das produtividades potencial e real com o método da Zona Agroecológica.

Os valores do  $K_c$  para a cana-de-açúcar variam de 0,4 no início do ciclo, 1,25 para a fase de desenvolvimento da cultura e 0,75 para a colheita (ALLEN et al., 1998). Inman-Bamber e Mcglinchey (2003) determinaram o  $K_c$  para a cultura de cana-de-açúcar, utilizando o método da razão de Bowen na Austrália. Estes autores validaram os valores do  $K_c$  de Allen et al. (1998) para os períodos iniciais e para a fase de desenvolvimento da cultura.

Sobre o consumo hídrico da cana-de-açúcar, vários autores têm procurado determinar as necessidades hídricas da cultura, mas os resultados diferem significativamente em relação aos métodos de cálculo e as condições do experimento. Entretanto, a cana-de-açúcar tem uma maior exigência de água durante o período de crescimento (CARVALHO, 2009).

Thompson (1967), citado por Carvalho (2009), verificou uma variação no consumo de água de 5,5 a 6,0 mm d<sup>-1</sup> nos meses de janeiro e fevereiro e de 1,8 a 2,3 mm d<sup>-1</sup> nos meses de junho e julho, na África do Sul.

Facounier e Bassereau (1970), citados por Marin et al. (2009) concluíram que um canavial produzindo 100 toneladas de colmos por hectare (TCH), com fornecimento de cerca de 1500 mm de água ao longo do ciclo, sintetiza 1kg de matéria seca para cada 150 a 200 kg de água transpirada.

O consumo anual de água pela cana-de-açúcar fica em torno de 1500 a 2500 mm, uniformemente distribuídos durante o ciclo. Ainda não há uma

relação precisa entre produção da cana-de-açúcar e consumo de água. Porém, essa relação fica entre 8 a 12 mm t<sup>-1</sup>, na maioria das situações (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Silva (2009), ao analisar o crescimento e a eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no submédio do vale do São Francisco, utilizando a variedade RB92579, no ciclo de cana-soca, obteve uma eficiência de produção de 9,49 kg de colmos, 1,22 kg de açúcar e 875,23 ml de etanol por metro cúbico de água evapotranspirada pela cultura (ETc) e de 5,36 kg de colmos, 0,69 kg de açúcar e 494,14 ml de etanol por metro cúbico de água que entrou na área de cultivo por precipitação e irrigação.

## **2.5. Modelos agrometeorológicos de estimativa da produtividade de culturas**

### **2.5.1. Modelagem na agricultura**

O uso de modelos de crescimento e desenvolvimento vegetal possibilita uma economia de tempo, trabalho e quantidade de recursos para tomada de decisões de manejo no setor agrícola.

Reynolds (1979) definiu um modelo como sendo uma equação ou conjunto de equações que representam um sistema real. Para De Wit (1982), um modelo é a representação simplificada de um sistema do mundo real. Sistema é uma parte limitada da realidade, que contém elementos inter-relacionados. Simulação é a arte de construir modelos matemáticos e o estudo de suas propriedades com relação às do sistema.

Os modelos de simulação são simplificações dos processos de crescimento das plantas e das suas interações com o meio ambiente. Sendo assim, sempre haverá diferenças entre o sistema real e os modelos. Tais diferenças podem ser verificadas por meio do teste do modelo, que consiste na comparação dos resultados obtidos observados no sistema real com os dados simulados pelo modelo em uma situação semelhante. Para isso, são necessários que os dados observados sejam satisfatórios. Os dados são

adequados, se forem coletados com precisão e cobrirem uma ampla gama de condições ambientais (OLIVEIRA, 2007).

Os modelos são classificados como empíricos ou mecanísticos. Modelos mecanísticos requerem que os processos simulados tenham uma base física ou fisiológica, enquanto modelos empíricos consistem em funções que são escolhidas (frequentemente arbitrariamente) para ajustar medidas de campo ou laboratório (MONTEITH, 1996). O determinismo da resposta é uma característica dos modelos mecanísticos, ou seja, as respostas, ou os resultados obtidos, são fornecidos sem nenhum grau de probabilidade. Normalmente, modelos empíricos (ou estocásticos) são aqueles que apresentam algum grau de probabilidade associado à sua resposta.

Modelos mecanísticos, devido ao seu princípio, podem ser transferíveis e podem ser usados para explorar uma gama extensiva de tratamentos em locais diferentes que seria impossível com experimentação de campo, devido ao custo e o tempo requerido (MONTEITH, 1996).

Os principais aspectos da modelagem de crescimento das culturas foram definidos e iniciados por intermédio dos estudos de De Wit (1965). Como esse autor foi um dos principais precursores dessa técnica, muitas relações e equações por ele apresentadas são empíricas. Devido a isso, outros autores estudam relações que contribuem para o aperfeiçoamento de modelos existentes de modo a torná-los mais utilizáveis.

Consequentemente, a validade do modelo nunca pode ser verificada, convincentemente, pois os modelos são uma representação da realidade. Assim, modelos de crescimento e desenvolvimento tornam-se um exercício interminável, pois os parâmetros e a estrutura do mesmo podem ser modificados e ajustados, continuamente, para acomodar novos resultados (CHAN, 1992).

Quando bem elaborados os modelos agrometeorológicos têm sido utilizado para as diferentes aplicações, que incluem o requerimento de água pelas culturas (HEINEMANN et al., 2002); previsão de safras (YUN, 2007); avaliação de estratégias de aplicação de água e nutrientes (RINALDI et al., 2007); a definição das melhores datas de plantios de culturas sob condições

irrigadas e de sequeiro (SOLER et al., 2007); a influência da seca na produtividade (SANTOS, 2008); determinação da produtividade potencial e os riscos climáticos associados à produção da cana-de-açúcar (GOUVÊA, 2008). Todas essas informações são de fundamental importância aos produtores e ao governo com o objetivo de auxiliar no planejamento das atividades agrícolas (HOOGENBOOM, 2000).

### **2.5.2. Modelagem de crescimento para a cultura da cana-de-açúcar**

Para a cana-de-açúcar, o desempenho de modelos de simulação depende fortemente da precisão de estimativa do conteúdo de açúcar nos colmos e do rendimento de colmos e açúcar por unidade de área, em particular a sua variabilidade ano a ano e de local para local de plantio, como respostas das diferenças de manejo, solo e clima (SINGELS e BEZUIDENOUT, 2002; O'LEARY, 2000). Devido a complexidade do sistema de produção dessa cultura e a falta de resultados consistentes para várias regiões do mundo, muitos autores têm proposto modificações em diferentes processos de modelos para a cana-de-açúcar (SINGELS et al., 2005b; THORBURN et al., 2005; SINGELS e BEZUIDENOUT, 2002; O'LEARY, 2000).

Entre os principais modelos de simulação de produtividade para a cultura da cana-de-açúcar, destacam-se os modelos Canegro, Q-CANE e APSIM Sugarcane.

O Canegro é um modelo de crescimento para a cultura da cana-de-açúcar incluso no pacote do DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) desenvolvido por Inman-Bamber (1991) para determinar a idade ideal para colheita da cana-de-açúcar na África do Sul (O'LEARY, 2000).

O modelo permite simular o rendimento dos colmos, sacarose, biomassa da cultura, nitrogênio e uso da água considerando processos baseados na influência da temperatura do ar, água e nitrogênio. É composto por quatro compartimentos que incluem o balanço de nitrogênio e carbono, desenvolvimento da cultura, balanço de energia e balanço de água no solo.

Segundo O'Leary (2000) o modelo de crescimento Q-CANE é o resultado de um projeto iniciado na Austrália, para estudo dos processos ecofisiológicos da cana-de-açúcar em base diária, os quais estão relacionados com o desenvolvimento fenológico e as condições ambientais do local de cultivo. Esses processos são representados por módulos que consideram o desenvolvimento do dossel, fotossíntese, respiração e partição de carboidratos para os órgãos das partes de crescimento e respiração (LIU, 2001).

O modelo APSIM Sugarcane está inserido no pacote APSIM e foi apresentado por Keating et al (1999), que descreveram os processos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar em relação ao clima, água e nutrientes. (O'Leary, 2000). O modelo simula o crescimento, uso da água, acúmulo de nitrogênio, peso seco de açúcar e peso fresco de colmos para a cana-de-açúcar durante o ciclo de cana-planta e cana-soca em função de informações de clima, solo, manejo e fatores genótipos.

### **2.5.3. O método da Zona Agroecológica**

O método da Zona Agroecológica (ZAE) foi desenvolvido por Kassam (1977) para o projeto Zona Agroecológica (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Ela utiliza o conceito de cultura-padrão de De Wit (1965) e da taxa de produção de matéria seca, empregando detalhes agrônômicos baseados no conhecimento para simular o uso e a disponibilidade dos recursos da terra, as opções de manejo e a produtividade potencial das culturas em função do clima (TUBIELLO et al., 2007).

A cultura-padrão é definida como uma variedade de alto rendimento, bem adaptada ao ambiente, crescendo ativamente e com disponibilidade de tempo para atingir a maturidade, em condições onde água, nutrientes, pragas e doenças não limitam o crescimento e rendimento. Os fatores climáticos que determinam o máximo rendimento de uma cultura-padrão são temperatura, radiação e duração do ciclo de crescimento, além do fotoperíodo (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Este modelo permite estimar a produtividade potencial de uma cultura numa região, em função da radiação solar e da temperatura do ar. Além disso, essa produtividade potencial pode ser penalizada pelo déficit hídrico, expressa em função do déficit de evapotranspiração relativa, e de um coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico. É um dos mais empregados quando a finalidade é estimar a redução do rendimento de culturas em função das condições hídricas.

Segundo Argenta et al., (2003), o rendimento potencial das culturas pode ser definido como o rendimento apresentado pelas mesmas quando cultivadas em ambiente ao qual estão adaptadas, sem limitações no suprimento de água e nutrientes, com o controle efetivo de insetos, doenças, plantas daninhas, excessos hídricos e de outros estresses bióticos e abióticos.

Nas condições reais de cultivo, ocorrerão perdas de rendimento devido a diversos fatores, entre eles: as condições climáticas adversas, problemas ou falta de manejo do solo, ervas daninhas etc. As limitações são em geral muito complexas e seus efeitos são difíceis de serem quantificados, mas o rendimento potencial quando comparado com o rendimento real obtido em campo, pode proporcionar uma boa indicação da eficiência da produção agrícola (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A investigação dos limites da produtividade contribui para identificar as variáveis do ambiente responsáveis pelo desempenho final da cultura e ressaltar em que nível cada uma delas representa estrangulamento à expressão máxima da produtividade (ARGENTA et al., 2003), Neste sentido, a determinação do rendimento potencial da cana-de-açúcar em ambientes diferentes torna-se uma ferramenta importante para a tomada de decisões no manejo e também no melhoramento desta cultura, por possibilitar a identificação dos fatores limitantes. Dimensionando-se o impacto dos fatores restritivos ao rendimento, poder-se-á definir estratégias de como superá-los ou minimizá-los através do manejo adequado das condições ambientais ou mediante seleção e melhoramento genético.

O método ZAE apresenta robustez, é de fácil aplicação em termos operacionais. Além disso, esse método é de fácil entendimento e os

resultados se aproximam da realidade, apresentando resultados bastante consistentes, com a possibilidade de estimar a queda de produtividade com relativa facilidade (SANTOS, 2008). Segundo Gouvêa (2008) esse método proporciona resultados rápidos e a um baixo custo, além de poder auxiliar eficientemente os agricultores e pesquisadores em programas de melhoramento de variedades, bem como na adequação das culturas. Entretanto, o modelo apresenta algumas limitações, pois não são consideradas a ocorrência de pragas e doenças e a fertilidade do solo.

Apesar de suas limitações, pela sua simplicidade e bom desempenho, o método ZAE tem sido bastante utilizado. Este método a princípio, teve como objetivo calcular o rendimento da cultura em base continental, mas o método também pode ser aplicado em menores escalas em nível de detalhe necessário para ajustar a localidades específicas (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Araujo (1993) aplicou a metodologia de De Wit (1965) para estimar a produtividade potencial da cana-de-açúcar, com a finalidade de elaborar um zoneamento da produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar no Estado do Rio de Janeiro, tendo verificado que os valores estimados pelo modelo foram bem próximos aos valores de produtividade de cana irrigada.

Leal (2000) utilizou o método ZAE para estimar a produtividade das culturas do milho, soja, sorgo e trigo nos municípios de Capinópolis e Montes Claros em Minas Gerais.

Bonnecarrère et al.(2007) aplicou o método da zona agroecológica para estimar a produtividade potencial e deplecionada para a cultura de milho, utilizando procedimento estocástico, no Rio Grande do Sul.

Santos (2008), utilizando o método ZAE, estimou a influência da seca na produtividade do milho em Minas Gerais, com as séries de dados climáticos projetada pelo cenário A1B do IPCC para analisar o desempenho do índice de seca Z na produtividade estimada sob as condições climáticas projetadas para o futuro.

Gouvêa (2009) utilizou o método ZAE para determinar a produtividade potencial e os riscos climáticos associados à produção da cana-de-açúcar diante do cenário de mudanças climáticas na região de Piracicaba, SP,

obtendo como resultados da análise um aumento na produtividade real, basicamente, devido ao acréscimo de temperatura, de CO<sub>2</sub> e ao avanço tecnológico. O aumento da produtividade da cana-de-açúcar observado na ocorrência de mudanças climáticas globais poderá ter impactos importantes no setor canavieiro, como a possibilidade de a cultura ser expandida para regiões que estão atualmente inviabilizadas de produzir.

Carvalho (2009) adotou do método da zona agroecológica para determinar a produtividade da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras de 1990/1991 a 2005/2006, ajustando-a em função do estresse hídrico pelo método de Jensen e do tipo de solo em função do conceito de ambiente de produção proposto por Prado. Os dados do IBGE foram tomados como produtividade observada, para avaliar a eficiência da produção de cana-de-açúcar, analisando a sua correlação com alguns fatores do meio físico (CARVALHO, 2009).

### 3.MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de Estudo e Base de Dados

A área de estudo foi o estado de Minas Gerais, sendo a região do Triângulo Mineiro usada para validar o método ZAE. O Estado de Minas Gerais está situado na Região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 14° 13' 57" e 22° 55' 22" S e os meridianos de 39° 51' 23" e 51° 02' 45" W, localizado, portanto, na zona intertropical e sujeito a uma grande diversidade climática.

O Triângulo Mineiro é uma das dez regiões de planejamento de Minas Gerais, estando situado entre os rios Grande e Paranaíba, formadores do rio Paraná. Faz parte da Região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba.

Nas simulações foram usados como parâmetros de entrada do modelo dados meteorológicos diários de temperatura máxima do ar, temperatura mínima do ar, umidade relativa média do ar, velocidade média do vento e precipitação obtidos das estações climatológicas de superfície convencional do 5º Distrito de Meteorologia, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Identificação das estações meteorológicas do INMET utilizadas

Código da estação	Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
		Graus decimais		
83579	Araxá	19,60° S	46,93° O	1024
83514	Capinópolis	18,72° S	49,55° O	621
83521	Ituiutaba	18,97° S	49,52° O	560
83481	João Pinheiro	17,70° S	46,17° O	760
83570	Pompeu	19,22° S	45,00° O	691
83577	Uberaba	19,73° S	47,95° O	737
83642	Viçosa	20,75° S	42,85° O	690

Com o intuito de melhor representar a precipitação, também foram utilizados dados de precipitação da rede de estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) (Tabela 3), localizadas próximas as empresas produtoras de cana-de-açúcar em substituição aos dados do INMET.

Os dados diários, do INMET e da ANA, foram submetidos a um controle de qualidade com o objetivo de identificar períodos sem medição, outliers (dados espúrios) e falhas.

Tabela 3 – Identificação das estações pluviométricas da ANA utilizadas

<b>Código da estação</b>	<b>Estação</b>	<b>Latitude Graus decimais</b>	<b>Longitude</b>
2045011	Lagoa da Prata	20,04° S	45,54° O
2042011	Rio Casca	20,23° S	42,65° O
1849006	Avantiguara	18,77° S	49,07° O
1948007	Campo Florido	19,77° S	48,57° O
1948010	Pirajuba	19,91° S	48,69° O
1950012	União (Vila Uniao)	19,53° S	50,33° O
2046011	Usina Santana	20,81° S	46,81° O

Para calibração e parametrização do método da Zona Agroecológica (ZAE) foram utilizados dados de produtividade em toneladas de colmos por hectare ( $t\ ha^{-1}$ ) obtidos junto ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, provenientes do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar (PMGCA-UFV), que tem por objetivo principal desenvolver variedades de cana-de-açúcar por meio da cooperação técnica firmada com usinas e destilarias produtoras de açúcar, etanol e energia no estado de Minas Gerais. A Tabela 4 apresenta as usinas e destilarias, e as respectivas estações do INMET e da ANA utilizadas em cada caso.

Tabela 4 – Usinas e destilarias, estações do INMET e código das estações da ANA utilizadas

<b>Nome</b>	<b>Cidade</b>	<b>Estação INMET</b>	<b>Estação ANA</b>
Destilaria Agropeu	Pompéu	Pompéu	
Canacampo	Campo Florido	Uberaba	1948007
Destilaria Rio do Cachimbo	João Pinheiro	João Pinheiro	
Destilaria WD	João Pinheiro	João Pinheiro	
Usina Passos	Passos	Uberaba	2046011
Usina Alvorada	Araporã	Capinópolis	1849006
Usina Iturama	Iturama	Ituiutaba	1950012
Usina Jatiboca	Urucânia	Viçosa	2042011
Usina Luciania	Lagoa da Prata	Pompéu	2045011
Usina Santo Angelo	Pirajuba	Uberaba	1948010
Usina Trialcool	Canápolis	Ituiutaba	
Usina Volta Grande	Conceição das Alagoas	Uberaba	

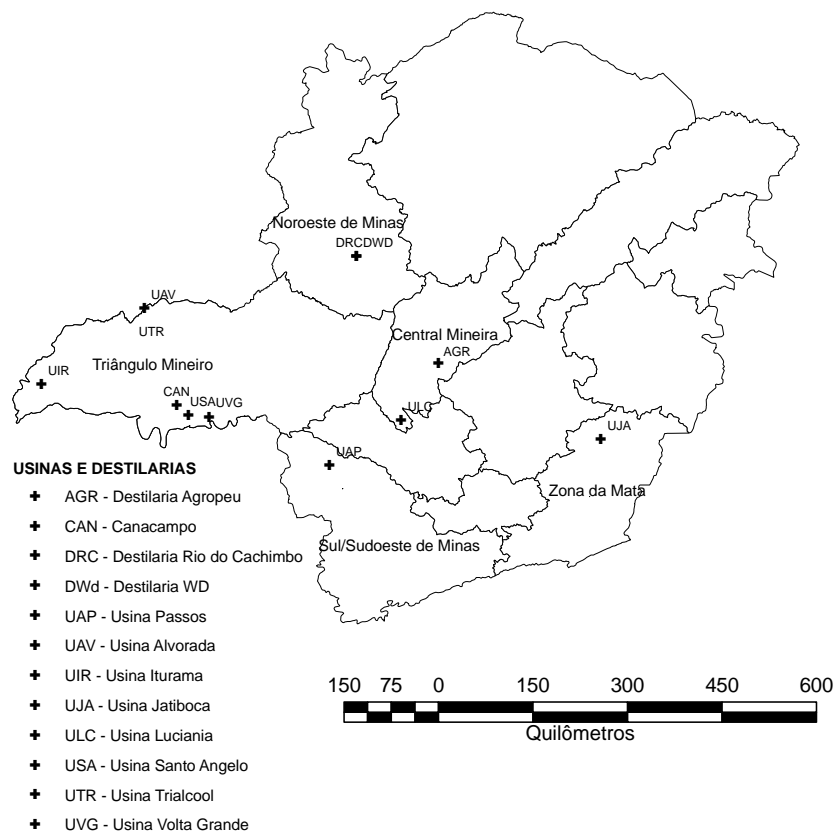


Figura 4 – Mapa do Estado de Minas Gerais com a localização das Usinas e Destilarias do PMGCA utilizadas neste estudo.

Os clones são introduzidos nas usinas e destilarias para avaliação e comparação com os variedades padrões ou testemunhas, que são as variedades RB83546 (padrão maturação) e, ou, a RB867515 (padrão produtividade). A colheita dos experimentos é feita com despalha prévia a fogo e pesagem das parcelas com o auxílio de uma carregadora de cana acoplado-se a garra desta a uma célula de carga ou dinamômetro.

Para a escolha dos experimentos neste estudo foi feito um controle de qualidade com o objetivo de identificar valores anômalos. Também foram excluídos das análises experimentos com valores muito altos e muito baixos de produtividade. Foram utilizados os 30 experimentos que melhor representaram a produtividade média da variedade RB835486, sendo 15 experimentos para o ciclo da cana-planta e 15 para o primeiro ciclo de cana-soca, listados nas Tabelas 5 e 6. A variedade RB835486 foi escolhida por ter apresentado uso generalizado nos experimentos utilizados, permitindo comparações.

Tabela 5 – Experimentos utilizados para o ciclo da cana-planta, com as respectivas datas de plantio e corte e a duração do ciclo

<b>Empresa</b>	<b>Experimento</b>	<b>Data Plantio</b>	<b>Data 1º corte</b>	<b>Ciclo*</b>
AGR	1	9/3/2005	9/8/2006	518
AGR	2	6/4/2004	27/7/2005	477
CAN	3	6/4/2004	29/6/2005	449
DRC	4	23/4/2003	11/5/2004	384
DWD	5	15/3/2006	17/7/2007	489
UAP	6	10/3/2004	13/7/2005	490
UAP	7	29/8/2006	29/8/2007	365
UAV	8	7/4/2004	19/7/2005	468
UJA	9	30/9/2004	4/10/2005	369
USA	10	29/3/2004	30/6/2005	458
USA	11	3/5/2007	20/8/2008	475
UTR	12	25/3/2004	15/7/2005	477
UTR	13	18/2/2006	11/4/2007	417
UTR	14	3/3/2006	16/4/2007	409
UTR	15	13/4/2006	8/8/2007	482

\* Ciclo em dias

Tabela 6 – Experimentos utilizados para o ciclo da primeira cana-soca, com as respectivas datas dos cortes e a duração do ciclo

<b>Empresa</b>	<b>Experimento</b>	<b>1º corte</b>	<b>2º corte</b>	<b>Ciclo*</b>	<b>Maturação**</b>
AGR	16	9/8/2006	18/7/2007	343	média
AGR	17	27/7/2005	26/6/2006	334	precoce
CAN	18	29/6/2005	1/8/2006	398	média
DRC	19	08/08/01	07/08/2002	364	média
DWD	20	15/8/2005	22/8/2006	372	média
DWD	21	22/8/2006	17/7/2007	329	média
DWD	22	17/7/2007	16/7/2008	365	média
UIR	23	22/8/2003	16/7/2004	329	média
UIR	24	18/7/2004	9/8/2005	387	média
ULC	25	13/7/2004	2/8/2005	385	média
USA	26	30/6/2005	27/7/2006	392	média
UTR	27	15/7/2005	7/7/2006	357	média
UTR	28	13/4/2007	29/5/2008	412	precoce
UTR	29	11/4/2007	18/3/2008	342	precoce
UVG	30	30/4/2004	20/4/2005	355	precoce

\* Ciclo em dias

\*\* Maturação: precoce, média e tardia

A validação do método ZAE foi feita para a região do Triângulo Mineiro, utilizando-se uma série temporal de dados de produtividade observada obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

(IBGE), disponíveis no Sistema de Recuperação Automática ([www.sidra.ibge.gov.br](http://www.sidra.ibge.gov.br)), para as safras 1989/90 a 2007/08.

Foram simuladas três diferentes condições de manejo para a cana-soca em cada safra, todas com duração de 365 dias, utilizando dados meteorológicos das estações meteorológicas de superfície convencional do INMET localizadas em Uberaba, Capinópolis e Ituiutaba.

A primeira simulação, compreendida entre maio e abril do ano seguinte, buscou representar uma soqueira de corte precoce; a segunda entre agosto de um ano até julho do ano seguinte, representando as soqueiras de corte no meio da safra; e a terceira, entre novembro e outubro, representando as áreas de colheita tardia. Para cada safra, o valor final de produtividade foi considerado como a média aritmética dessas três simulações das três estações utilizadas.

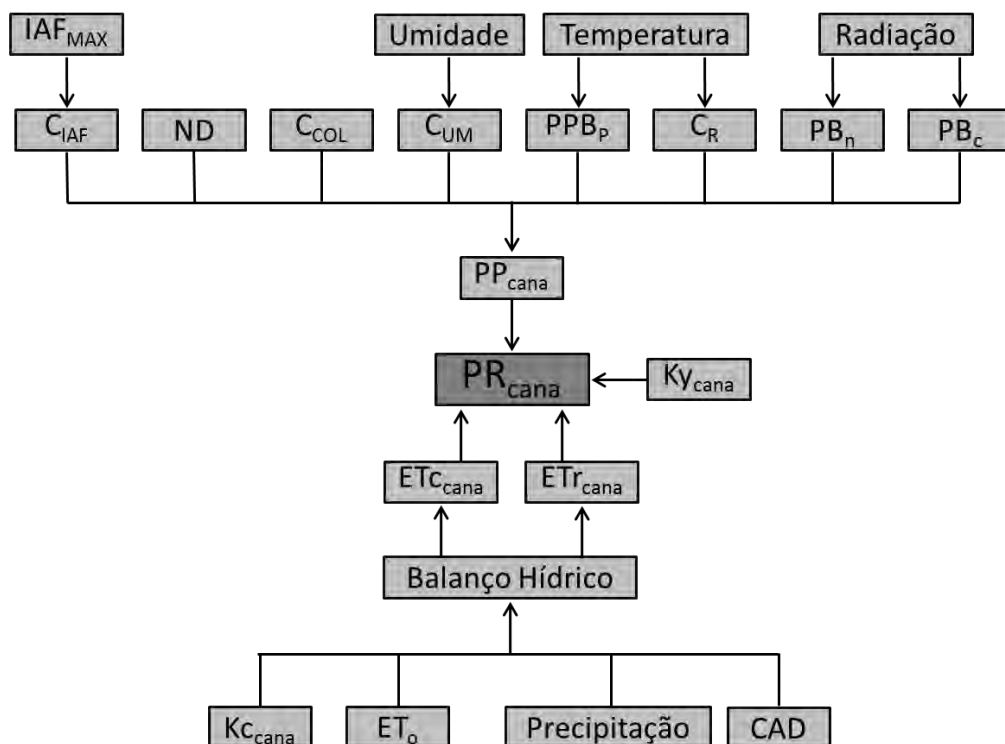
### **3.2. Método da Zona Agroecológica (ZAE)**

O método ZAE é um modelo relativamente simples proposto por Doorenbos e Kassam (1979) e que tem sido largamente utilizado para estimativa em escala regional (inicialmente a proposta deste modelo era para escala continental, com o tempo, acabou sendo adaptado a escalas menores) com base no trabalho de De Wit (1965).

A produtividade potencial da cultura calculada por meio do modelo ZAE de biomassa reflete o regime de temperatura do ar e radiação do local em estudo. Este modelo basicamente eco-fisiológico (KASSAM, 1977; FISCHER et al., 2002) necessita das seguintes características da cultura:

- a) Duração do ciclo de crescimento (dias após a emergência até a maturidade completa);
- b) Índice de área foliar (IAF) associado à taxa de crescimento máxima;
- c) Índice de colheita;
- d) Grupo de adaptabilidade da cultura e;
- e) Sensibilidade da duração do ciclo de crescimento da cultura para a soma térmica dos graus dias.

Em seguida, a produtividade potencial é penalizada utilizando o coeficiente de sensibilidade da produtividade ao déficit de umidade no solo.



#### LEGENDA

- Balanço Hídrico** = Metodologia de Thornthwaite e Mather (1955)  
**CAD** = capacidade de água disponível no solo [mm]  
**C<sub>COL</sub>** = Índice de colheita [adimensional]  
**C<sub>IAF</sub>** = Coeficiente de correção do índice de área foliar [adimensional]  
**C<sub>R</sub>** = Coeficiente de correção da respiração [adimensional]  
**C<sub>UM</sub>** = Coeficiente de correção da umidade da parte colhida [adimensional]  
**ET<sub>C<sub>cana</sub></sub>** = Evapotranspiração máxima da cultura [mm ciclo<sup>-1</sup>]  
**ET<sub>o</sub>** = Evapotranspiração de referencia [mm dia<sup>-1</sup>]  
**ET<sub>r<sub>cana</sub></sub>** = Evapotranspiração da cana-de-açúcar [mm ciclo<sup>-1</sup>]  
**IAF<sub>Max</sub>** = Índice de área foliar máximo [adimensional]  
**K<sub>C<sub>cana</sub></sub>** = Coeficiente de cultivo. [adimensional]  
**K<sub>y<sub>cana</sub></sub>** = Coeficiente de sensibilidade da cultura [adimensional]  
**ND** = Duração do ciclo de crescimento [dias]  
**PB<sub>c</sub>** = Taxa de produção de matéria para período de céu claro [kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>]  
**PB<sub>n</sub>** = Taxa de produção de matéria para período nublado [kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>]  
**PPB<sub>p</sub>** = taxa de produção bruta de matéria seca [kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>]  
**PP<sub>cana</sub>** = Produtividade potencial da cana-de-açúcar [kg ha<sup>-1</sup>]  
**PR<sub>cana</sub>** = Produtividade limitada pela disponibilidade hídrica [kg ha<sup>-1</sup>]  
**Precipitação** [mm dia<sup>-1</sup>]  
**Radiação** = Irradiância solar na superfície para dias claros [MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>]  
**Temperatura** = Temperatura do ar [°C]  
**Umidade** = Umidade da cana-de-açúcar no momento da colheita [%]

Figura 5 – Esquema do Método da Zona Agroecológica.

### 3.2.1. Produtividade potencial da cana-de-açúcar ( $PP_{cana}$ )

A produtividade potencial ( $PP_{cana}$ ,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) da cultura da cana-de-açúcar representa o nível de referência de produtividade atingível com alto padrão de manejo da cultura e água, em que não há limitações de clima, água e nutrientes e sem ataque de pragas e doenças (DOORENBOS e KASSAM, 1979). O modelo da ZAE determina a produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar a partir da produtividade bruta de matéria seca de uma cultura padrão ( $PPB_p$ ), corrigida por fatores adimensionais, por meio da Equação 1:

$$PP_{cana} = C_{IAF} \times C_R \times C_{COL} \times C_{UM} \times ND \times [\bar{F} \times (a + b \times PPB_p) \times \overline{PB}_n + (1 - F) \times (c + d \times PPB_p) \times \overline{PB}_c] \quad (1)$$

em que,

$PP_{cana}$  = Produtividade potencial da cana-de-açúcar [ $\text{kg ha}^{-1}$ ];

$C_{IAF}$  = Coeficiente de correção do índice de área foliar [adimensional];

$C_R$  = Coeficiente de correção da respiração [adimensional];

$C_{COL}$  = Índice de colheita [adimensional];

$C_{UM}$  = Coeficiente de umidade [adimensional]

$ND$  = Duração do ciclo de crescimento [dias];

$\bar{F}$  = Fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens [adimensional];

$\overline{PB}_n$  = Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para período nublado [ $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ];

$\overline{PB}_c$  = Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para período de céu claro [ $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ];

$\overline{PPB}_p$  = Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão [ $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ].

Os valores de a, b, c, d são iguais a 0,8; 0,01; 0,5 e 0,025 respectivamente, para  $\overline{PPB}_p \geq 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ; e iguais a 0,5; 0,025; 0 e 0,05;

respectivamente, para  $\overline{PPB_p} < 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (FISCHER et al., 2002; DOORENBOS e KASSAM, 1979).

### 3.2.2. Fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens ( $\bar{F}$ )

A fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens ( $F$ ) é calculada diariamente durante todo o ciclo da cultura pela Equação 2, sendo utilizado um valor médio ( $\bar{F}$ , Equação 3) como variável de entrada na Equação 1.

$$F = \left( \frac{R_{so} \times 0,5 \times R_s}{0,8 \times R_{so}} \right) \quad (2)$$

em que,

$F$  = Fração do dia em que o sol fica encoberto por nuvens [adimensional];

$R_{so}$  = Irradiância solar na superfície para dias claros [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ];

$R_s$  = Irradiância solar global à superfície [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ];

$$\bar{F} = \frac{1}{ND} \sum_{i=1}^{ND} F_i \quad (3)$$

em que,

$ND$  = Duração do ciclo de crescimento [dias];

Devido às falhas nos dados de insolação e a indisponibilidade de dados medidos de irradiância solar global incidente na superfície terrestre ( $R_s$ ) nas estações meteorológicas de superfície convencional do INMET, adotou-se a metodologia proposta por Bristow e Campbell (1984), para estimativa da irradiância solar global conforme a Equação 4:

$$R_s = R_o \times A \times \left[ 1 - e^{(-B \times \Delta T^C)} \right] \quad (4)$$

em que,

$R_o$  = Irradiância solar no topo da atmosfera [ $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ];

$\Delta T$  = Variação diária das temperaturas máxima e mínima do ar [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$A = 0,7$  [adimensional];

$B = 0,007$  (valor médio entre 0,004 e 0,010) [adimensional];

$C = 2,4$  [adimensional].

A, B e C são constantes empíricas. O parâmetro “A” representa a irradiância máxima em um dia de céu claro e os parâmetros “B” e “C” são os controladores da variação de “A”, caso ocorra aumento na diferença de temperatura.

A irradiância solar no topo da atmosfera ( $R_o$ ) e a irradiância solar na superfície para dias claros ( $R_{so}$ ) foram obtidas conforme a metodologia apresentada no documento FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

A variação da temperatura ( $\Delta T$ ) foi calculada pela Equação 5:

$$\Delta T = t_x - \left( \frac{t_n + t_{n+1}}{2} \right) \quad (5)$$

em que,

$t_x$  = Temperatura máxima do dia [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t_n$  = Temperatura mínima do dia [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t_{n+1}$  = Temperatura mínima do dia posterior [ $^{\circ}\text{C}$ ].

### 3.2.3. Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para período de céu nublado ( $\overline{PB_n}$ ) e claro ( $\overline{PB_c}$ )

A produtividade potencial da cana-de-açúcar ( $PP_{cana}$ ) refere-se à produtividade, levando-se em consideração a presença ou ausência de nuvens, pois elas alteram a quantidade de radiação solar incidente e fazem com que a eficiência de aproveitamento da energia radiante pelas folhas seja diferente nessas duas situações. Como durante um dia quase sempre ocorrem períodos de nebulosidade, a  $PP_{cana}$  é composta por um componente

relativo ao período nublado  $PB_n$  [kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>] e outro ao período de céu claro  $PB_c$  [kg MS ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>]. Desse modo, a  $PB_c$  e a  $PB_n$  são calculadas diariamente durante todo o ciclo da cultura pelas equações:

$$PB_n = 31,653 + 0,5477 \times R_{so} \quad (6)$$

$$PB_c = 104,66 + 0,9061 \times R_{so} \quad (7)$$

em que,

$PB_n$  = Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para período nublado [kg MS ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>];

$PB_c$  = Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para período de céu claro [kg MS ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>];

$R_{so}$  = Irradiância solar na superfície para dias claros [MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>].

As equações 6 e 7 foram desenvolvidas por Leal (2000).

São utilizados valores médios da taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão para período nublado ( $\overline{PB_n}$ ) e de céu claro ( $\overline{PB_c}$ ) como variáveis de entrada na Equação 1, obtidos pelas Equações 8 e 9.

$$\overline{PB_n} = \frac{1}{ND} \sum_{i=1}^{ND} PB_{n_i} \quad (8)$$

$$\overline{PB_c} = \frac{1}{ND} \sum_{i=1}^{ND} PB_{c_i} \quad (9)$$

em que,

$ND$  = Duração do ciclo de crescimento [dias];

#### 3.2.4. Taxa de produção bruta de matéria da cultura padrão (PPB<sub>p</sub>)

A taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão (PPB<sub>p</sub>) é considerada como tendo o valor de 20 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (FISCHER et al., 2002;

DOORENBOS e KASSAM, 1979). Entretanto, a produção da matéria seca depende da cultura e da temperatura do ar. Os valores da  $PPB_p$  para a cultura da cana-de-açúcar em função da temperatura do ar estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de  $PPB_p$  ( $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) para a cultura da cana-de-açúcar em função da temperatura média do ar durante o ciclo da cultura

Temperatura média (°C)								
5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C
0	0	5	45	65	65	65	45	5

Fonte: Fischer et al. (2002); Doorenbos e Kassam (1979).

Com base na Tabela 7 equacionou-se a  $PPB_p$  em função da temperatura do ar para o intervalo 5° a 45°C como demonstrado nas equações abaixo:

$$\text{Para } 5^{\circ} \leq t \leq 10^{\circ} \rightarrow PPB_p = 0 \quad (10)$$

$$\text{Para } 10^{\circ} < t \leq 15^{\circ} \rightarrow PPB_p = t - 10 \quad (11)$$

$$\text{Para } 15^{\circ} < t < 25^{\circ} \rightarrow PPB_p = -0,3963 \times t^2 + 21,916 \times t - 236,52 \quad (12)$$

$$R^2 = 0,9978$$

$$\text{Para } 25^{\circ} \leq t \leq 35^{\circ} \rightarrow PPB_p = 65 \quad (13)$$

$$\text{Para } 35^{\circ} < t \leq 45^{\circ} \rightarrow PPB_p = -0,3497 \times t^2 + 21,972 \times t - 276,4 \quad (14)$$

$$R^2 = 0,9981$$

em que,

$PPB_p$  = Taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão [ $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ].

$t$  = Temperatura média do dia [ $^{\circ}\text{C}$ ];

Foi utilizado um valor médio da taxa de produção bruta de matéria seca da cultura-padrão ( $\overline{PPB_p}$ ) como variável de entrada na Equação 1, obtida pela Equação 15.

$$\overline{PPB_p} = \frac{1}{ND} \sum_{i=1}^{ND} PPB_{p_i} \quad (15)$$

em que,

$ND$  = Duração do ciclo de crescimento [dias];

### 3.2.5. Determinação do coeficiente de índice de área foliar ( $C_{IAF}$ )

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

$$\text{Quando } IAF < 5: C_{IAF} = 0,0093 + 0,185 \times IAF_{max} - 0,0175 \times IAF_{max}^2 \quad (16)$$

$$\text{Quando } IAF \geq 5: C_{IAF} = 0,50 \quad (17)$$

em que,

$C_{IAF}$  = Coeficiente de correção do índice de área foliar [adimensional];

$IAF_{max}$  = Índice de área foliar máximo.

Para a cana-planta adotou-se um valor de  $IAF_{max} = 5,3$  conforme recomendação proposta por Fischer et al. (2002) para níveis intermediários de produtividade. Para a cana-soca adotou-se um valor de  $IAF_{max} = 4,5$  encontrado por Almeida et al. (2008). Assim, foram obtidos os valores de  $C_{IAF} = 0,5$  para cana-planta e  $C_{IAF} = 0,49$  para a cana-soca.

### 3.2.6. Determinação da correção para a respiração ( $C_R$ )

Durante a fotossíntese e o crescimento, uma parte dos carboidratos é utilizada no processo de fotorrespiração e outra parte na manutenção dos tecidos (respiração de manutenção) (TERAMOTO, 2003). Esse consumo depende da temperatura ambiente, havendo relação direta entre a temperatura e a respiração. Portanto, é necessário considerar um coeficiente de correção para a respiração na estimativa do rendimento máximo, o qual é dado por Doorenbos e Kassam (1979):

$$\text{Quando } t < 20^\circ\text{C: } C_R = 0,6 \quad (18)$$

$$\text{Quando } t \geq 20^\circ\text{C: } C_R = 0,5 \quad (19)$$

em que,

$C_R$  = Coeficiente de correção da respiração [adimensional];

$t$  = Temperatura média do ar do período considerado [ $^\circ\text{C}$ ].

### 3.2.7. Determinação do índice de colheita ( $C_{COL}$ )

Normalmente, apenas parte da matéria seca total produzida pela cultura é colhida, seja na forma de grão, fibra, fruto ou colmos. O índice de colheita é a relação entre a matéria seca economicamente rentável e a massa seca total produzida. De acordo com Doorenbos e Kassam (1979) o valor 0,80 pode ser adotado para a cultura da cana-de-açúcar.

### 3.2.8. Determinação do coeficiente de umidade ( $C_{UM}$ )

O coeficiente  $C_{UM}$  é utilizado para inserir a umidade residual na matéria seca da parte rentável que normalmente fica retida. Nessa correção, para a cultura da cana-de-açúcar, considera-se o valor da umidade residual de 80% e a seguinte Equação (PEREIRA *et al.*, 2002):

$$C_{UM} = \frac{1}{(1 - 0,01 \times U)} \quad (20)$$

em que,

$C_{UM}$  = Coeficiente de umidade [adimensional];

U = Umidade residual [%].

### 3.2.9. Evapotranspiração da cultura ( $ET_{C_{cana}}$ )

No cálculo da produtividade limitada pela disponibilidade hídrica a evapotranspiração máxima da cultura ( $ET_{C_{cana}}$ ) é relacionada com a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) como mostrado na Equação abaixo:

$$ET_{C_{cana}} = K_c \times ET_o \quad (21)$$

em que,

$ET_{C_{cana}}$  = Evapotranspiração máxima da cultura da cana-de-açúcar [ $\text{mm d}^{-1}$ ];

$ET_o$  = Evapotranspiração de referência [ $\text{mm d}^{-1}$ ];

$K_c$  = Coeficiente de cultura [adimensional].

A evapotranspiração de referência foi calculada de acordo com a Equação de Penman-Moneith/FAO-56 (ALLEN et al., 1998). A Tabela 8 apresenta os coeficientes de cultura para os estádios inicial ( $k1^c$ ), fase reprodutiva ( $k2^c$ ), estágio final e de maturação ( $k3^c$ ).

Tabela 8 – Coeficientes de cultura para a cana-de-açúcar

Coeficiente de cultura		
$k1^c$	$k2^c$	$k3^c$
0,4,	1,25	0,75

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979).

A duração (em dias) do primeiro estágio de desenvolvimento da cultura (d1- estágio inicial) foi definida como sendo 35 dias para a cana planta e 25 dias para a cana-soca. Os demais estádios (d2 - estágio

vegetativo, d3 - estágio reprodutivo e d4 - estágio de maturação) (Figura 6) foram definidos com base no método dos graus-dia acumulados, que baseia-se na premissa de que a planta necessita de certa quantidade de energia, representada pela soma de graus térmicos acima de uma temperatura-base, para completar determinada fase fenológica (LIU et al. 1998).

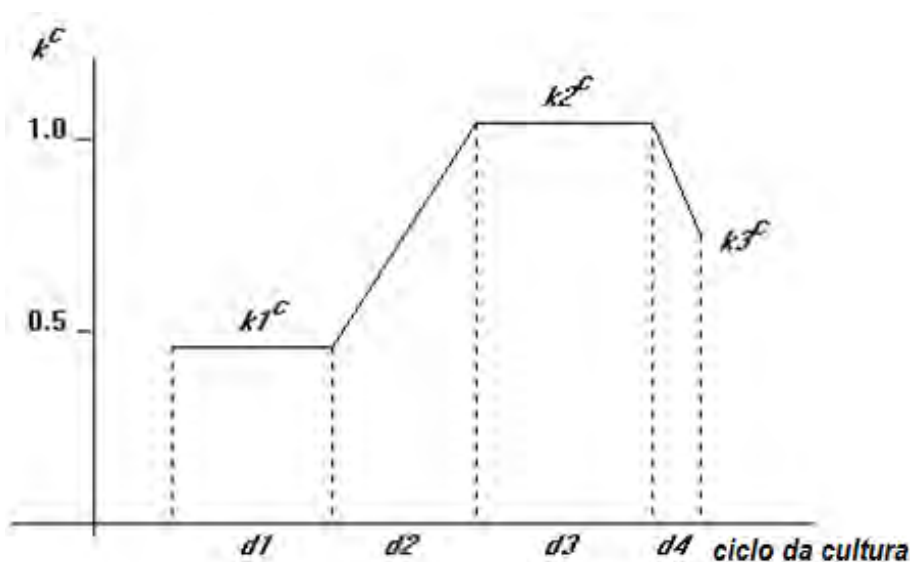


Figura 6 – Descrição dos estádios de crescimento.

Fonte: (FISCHER et al., 2002).

A soma térmica dos graus dias foi calculada de acordo com a Equação 18 (VILLA NOVA et al., 1972):

$$GDA = \sum_{i=1}^{ND} (t_m - t_b) \quad (22)$$

em que,

GDA = Graus-dia Acumulados [ $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ];

$t_m$ : Temperatura média do dia [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t_b$ : Temperatura base da cultura [ $16^{\circ}\text{C}$ ];

ND = Duração do ciclo de crescimento [dias];

Para definir a duração dos estádios d2, d3 e d4 de desenvolvimento foram utilizados os valores encontrados por Almeida (2008). O autor avaliou os padrões de crescimento e de produção da variedade RB92579 com os

graus-dias, durante os cultivos de cana-planta e cana-soca, na região dos Tabuleiros Costeiros Alagoanos. A fase de estabelecimento da cultura (estádio inicial e estágio vegetativo) ocorreu com 750GDA desde o plantio do cultivo da cana-planta, e com 600GDA desde o corte na cana-soca. O estágio reprodutivo ocorreu entre os 750 e 1500GDA na cana-planta e entre 600 e 950 GDA na cana-soca. A fase final (maturação) ocorreu entre 1500 e 2015 GDA na cana-planta e 950 e 1800 GDA na cana-soca.

### 3.2.10. Balanço hídrico

Sendo o fator hídrico um dos que mais atuam na produtividade das culturas, faz-se necessário incluir esta variável nos modelos de estimativa da produtividade, associando assim os elementos chuva e evapotranspiração sobre a produtividade, para fases fenológicas da cultura (DELGADO-ROJAS e BARBIERI, 1998).

Para isso, elaborou-se um balanço hídrico sequencial diário, adotando o procedimento proposto por Thornthwaite & Mather (1955). Neste balanço, determina-se o suprimento natural de água ao solo pela chuva (P), e da demanda atmosférica, expressa pela evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), e o nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD). Ele fornece estimativas da evapotranspiração real ( $ET_r$ ), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM), tendo melhores resultados na escala diária.

Pelo balanço hídrico é possível determinar a deficiência hídrica de cada tipo de cultura ( $1 - \frac{ET_r}{ET_c}$ ) e a quebra de rendimento ( $1 - \frac{PR}{PP}$ ) (PEREIRA *et al.*, 2002). A diferença na resposta ao déficit hídrico levou à introdução do conceito de coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico ( $K_y$ ), sendo expresso pela seguinte equação:

$$K_y = \frac{\left(1 - \frac{PR_{cana}}{PP_{cana}}\right)}{\left(1 - \frac{ETr_{cana}}{ETC_{cana}}\right)} \quad (23)$$

em que,

$K_y$  = Coeficiente que expressa a sensibilidade da cultura da cana-de-açúcar ao déficit hídrico.

$PR_{cana}$  = Produtividade limitada pela disponibilidade hídrica ao longo do ciclo da cana-de-açúcar [ $kg\ ha^{-1}$ ];

$PP_{cana}$  = Produtividade potencial da cana-de-açúcar [ $kg\ ha^{-1}$ ];

$ETr_{cana}$  = Evapotranspiração real da cana-de-açúcar [ $mm\ ciclo^{-1}$ ];

$ETC_{cana}$  = Evapotranspiração máxima da cultura da cana-de-açúcar [ $mm\ ciclo^{-1}$ ].

O valor de CAD para cana-de-açúcar utilizado neste estudo foi 78 mm, conforme citado na literatura, e o valor de  $k_y$  foi igual a 1,20 (DOORENBOS e KASSAM 1979).

### **3.2.11. Produtividade da cana-de-açúcar limitada pela disponibilidade hídrica ao longo do ciclo ( $PR_{cana}$ )**

Quando as necessidades hídricas da cultura são atendidas plenamente, a evapotranspiração real ( $ET_r$ ) é igual a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), não ocorrendo perdas de produtividade. Todavia, quando o suprimento é insuficiente, tem-se que  $ET_r < ET_c$ , ocasionando perda de produtividade, proporcional ao estresse hídrico sofrido pela cultura (TERAMOTO, 2003).

A  $PR_{cana}$  pelo método ZAE é resultante da produtividade potencial  $PP_{cana}$  e da penalização por estresse hídrico obtida pelo déficit hídrico relativo ( $1 - ETr/ETc$ ), que ocorre em cada fase fenológica da cultura em função da sua sensibilidade ao déficit hídrico ( $K_y$ ). No cálculo da  $PR_{cana}$ , utiliza-se a seguinte Equação:

$$PR_{cana} = PP_{cana} \times \left[ 1 - k_y \times \left( 1 - \frac{ETr_{cana}}{ETC_{cana}} \right) \right] \quad (24)$$

em que,

$PR_{cana}$  = Produtividade limitada pela disponibilidade hídrica [ $\text{kg ha}^{-1}$ ];

$PP_{cana}$  = Produtividade potencial da cana-de-açúcar [ $\text{kg ha}^{-1}$ ];

$ETr_{cana}$  = Evapotranspiração real da cana-de-açúcar [ $\text{mm ciclo}^{-1}$ ];

$ETC_{cana}$  = Evapotranspiração da cana-de-açúcar [ $\text{mm ciclo}^{-1}$ ];

$K_y$  = Coeficiente que expressa a sensibilidade da cultura da cana-de-açúcar ao déficit hídrico.

### 3.2.12. Quebra relativa de produtividade (QP)

A quebra relativa da produtividade da cana-de-açúcar foi calculada utilizando a Equação:

$$QP = \left( 1 - \frac{PR_{cana}}{PP_{cana}} \right) \quad (25)$$

em que,

$QP$  = Quebra relativa da produtividade [%];

$PR_{cana}$  = produtividade limitada pela disponibilidade hídrica [ $\text{Kg ha}^{-1}$ ];

$PP_{cana}$  = Produtividade potencial da cana-de-açúcar [ $\text{Kg ha}^{-1}$ ].

### 3.3. Desempenho estatístico do modelo

O desempenho do método ZAE foi verificado por meio das seguintes medidas estatísticas: coeficiente de determinação ( $r^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE, sigla em inglês), o erro absoluto médio (MAE, sigla em inglês), o viés médio (MBE, sigla em inglês) e o índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT, 1982).

O coeficiente de determinação ( $r^2$ ) descreve a proporção da variância total dos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. Os valores de  $r^2$  variam de zero a um, sendo que quanto mais próximo de um melhor o ajuste. Porém, essa estatística não é muito adequada para medir desempenho de modelos, pois ela é altamente sensível a valores espúrios

(outliers). Entretanto, o  $r^2$  foi incluído nas análises realizadas no presente estudo para permitir comparações com resultados encontrados na literatura que utilizam esse coeficiente. O coeficiente de determinação é calculado por:

$$r^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (26)$$

em que,

$P_i$  = Valores estimados pelo modelo;

$O_i$  = Valores observados.

O RMSE, MAE e MBE são medidas de erros usados para representar as diferenças médias entre os valores preditos pelo modelo (P) e os valores observados (O). O RMSE fornece uma informação em relação à dispersão dos dados, ou seja, o grau de espalhamento obtido na correção entre os valores preditos e observados. O MAE é menos sensível a valores extremos. O MBE informa o quanto os valores preditos superestimam ou subestimam os valores observados.

O RMSE, o MAE e o MBE são calculados, respectivamente, por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (27)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (28)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (29)$$

em que,

$n$  = Número de observações.

O índice de concordância de Willmott (d) mede o grau em que os valores preditos (P) se aproximam dos observados (O). Este índice varia de zero a um, sendo que, zero nenhuma concordância e um, concordância perfeita. O índice (d) é dado por:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (30)$$

## 4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Parametrização e calibração do método ZAE

Para parametrização e calibração do método ZAE, foram utilizados dados de 15 experimentos que melhor representaram a produtividade média da variedade RB835486 para o ciclo da cana-planta e 15 para o primeiro ciclo de cana-soca. A variedade RB835486 foi escolhida por ter apresentado uso generalizado nos experimentos utilizados, permitindo comparações.

A produtividade média observada em condições de campo nos experimentos realizados pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar (PMGCA-UFV) para o ciclo da cana-planta para a variedade RB835486 foi de 107,4 t ha<sup>-1</sup> e a produtividade média estimada (produtividade limitada pela disponibilidade hídrica ao longo do ciclo) pelo método ZAE foi de 108,3 t ha<sup>-1</sup>.

A relação entre a produtividade limitada pela disponibilidade hídrica estimada pelo método ZAE para o ciclo da cana-planta e os dados de cana-planta observados é apresentada na Figura 7. Na análise de todo o conjunto de dados observados e estimados, observa-se que o método ZAE apresentou um bom ajuste aos dados observados, não evidenciando tendência de superestimativa ou subestimativa, com boa exatidão ( $\beta_1 = 0,80$ ) e boa precisão ( $r^2 = 0,77$ ), explicando 77% da variabilidade dos dados observados em experimentos de campo. Nesta análise, o coeficiente linear da equação foi desprezado por não ser estatisticamente significativo ao nível de 5%.

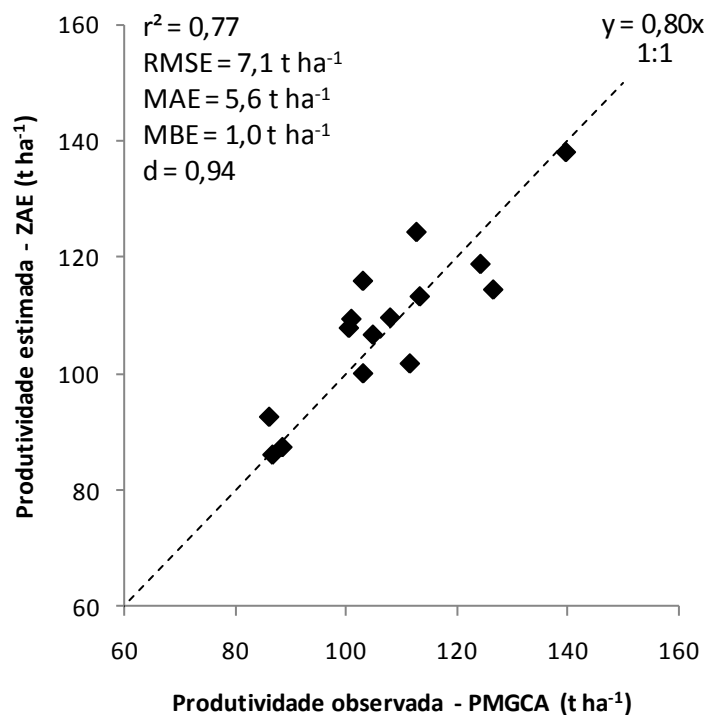


Figura 7 – Relação entre a produtividade limitada pela disponibilidade hídrica estimada pelo método ZAE e a produtividade observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV para o ciclo da cana-planta.

Analisando-se o desempenho estatístico do método ZAE para estimativa da produtividade limitada pela disponibilidade hídrica ao longo do ciclo de cana-planta observam-se baixos valores dos erros RMSE e MAE ( $7,1 \text{ t ha}^{-1}$  e  $5,6 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente), indicando que o método não apresenta grande variabilidade e nem tendência expressiva. Isso pode ser confirmado com o valor do MBE =  $1,0 \text{ t ha}^{-1}$ , ou seja, em média o método é bem coerente com os dados experimentais para o ciclo da cana-planta, apresentando apenas uma pequena superestimação de  $1,0 \text{ t ha}^{-1}$ . Além disso, o alto valor do índice de concordância de Willmott ( $d = 0,94$ ) indica uma boa concordância dos dados estimados e observados, corroborando a eficácia do método (Figura 7).

A Figura 8 apresenta a distribuição da produtividade observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV e a produtividade limitada pela disponibilidade hídrica, ao qual foi estimada pelo método ZAE para o ciclo da cana-planta. Verifica-se um comportamento similar entre a produtividade observada e estimada nos diversos experimentos, com a produtividade

estimada ligeiramente superior a observada, com exceção dos experimentos 1, 2, 3, 7, 8, 9 e 13 em que a produtividade observada se mostrou um pouco superior a estimada. De maneira geral, espera-se maiores valores de produtividade para o método ZAE, pois este considera somente o déficit hídrico ao longo do ciclo como fator limitante para a produtividade potencial, mas, os experimentos citados acima estão sendo também limitados por outros fatores ambientais e bióticos que ocasionaram as diferenças.

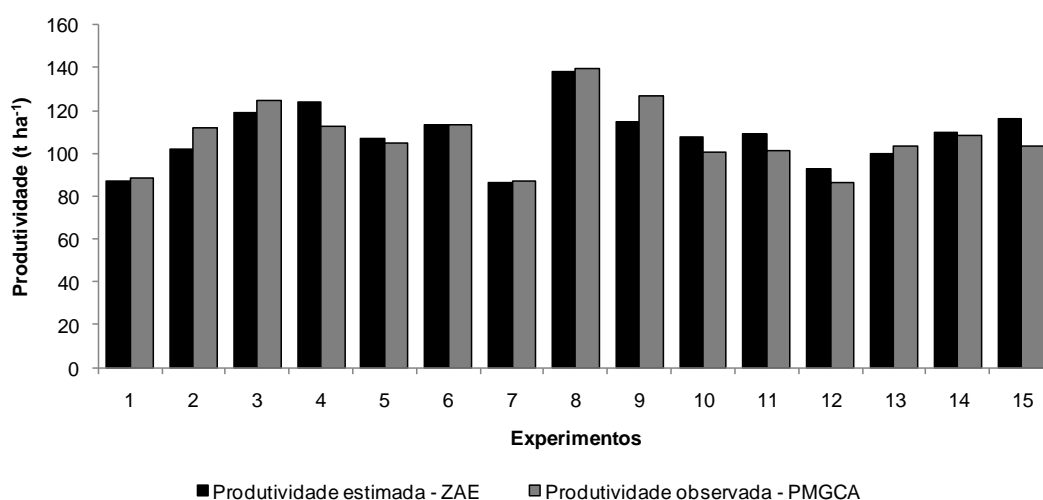


Figura 8 – Distribuição da produtividade observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV e estimada pelo método ZAE para o ciclo da cana-planta.

A produtividade média observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV para o primeiro ciclo da cana-soca foi de 101,5 t ha<sup>-1</sup> e a produtividade média estimada pelo método ZAE foi de 104,4 t ha<sup>-1</sup>.

A relação entre a produtividade observada com a produtividade limitada pela disponibilidade hídrica estimada pelo método ZAE para o primeiro ciclo da cana-soca é apresentada na Figura 9.

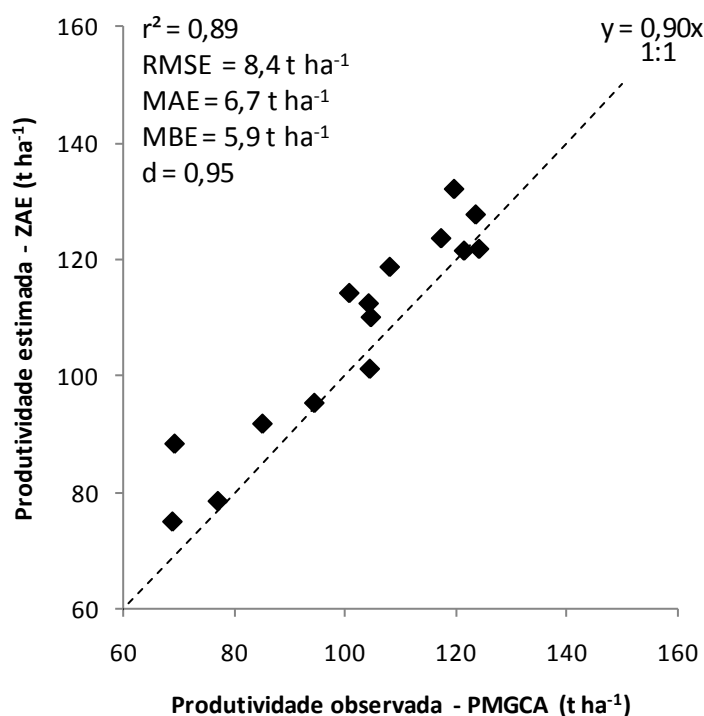


Figura 9 – Relação entre a produtividade limitada pela disponibilidade hídrica estimada pelo método ZAE e a produtividade observada em condições de campo nos experimentos do PMGCA-UFV para o primeiro ciclo da cana-soca.

Observa-se que o método ZAE apresentou um ajuste satisfatório para o primeiro ciclo de cana-soca, explicando 89% da variabilidade dos dados observados em campo. A exatidão do método para a cana-soca ( $\beta_1 = 0,90$ ) e a precisão ( $r^2 = 0,89$ ) foram superiores as obtidas para a cana-planta. Novamente, o coeficiente linear da equação foi desprezado por não ser estatisticamente significativo ao nível de 5%.

Semelhante aos resultados encontrados para o ciclo da cana-planta obteve-se baixos valores dos erros RMSE e MAE ( $8,4 \text{ t ha}^{-1}$  e  $6,7 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente), para o primeiro ciclo de cana-soca. Contudo, o MBE =  $5,9 \text{ t ha}^{-1}$  foi um pouco elevado, indicando uma superestimativa. (Figura 9). Essa tendência de superestimativa era esperada para ambos os casos, e pode ser associada ao fato de que, apenas a água é o fator limitante da produtividade, desconsiderando outros fatores importantes na definição da produtividade da cultura, como doenças, pragas, carências nutricionais e o manejo inadequado (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Entretanto, mesmo com essa pequena tendência do método ZAE em superestimar a produtividade

limitada pela disponibilidade hídrica, o alto valor do índice de concordância de Willmott ( $d = 0,95$ ) para o primeiro ciclo de cana-soca indica um bom ajuste dos valores estimados em relação aos valores observados.

A distribuição da produtividade observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV e estimada pelo método ZAE para o primeiro ciclo da cana-soca pode ser verificada na Figura 10. Apenas nos experimentos 28 e 30 não foi observado o padrão de superestimativa.

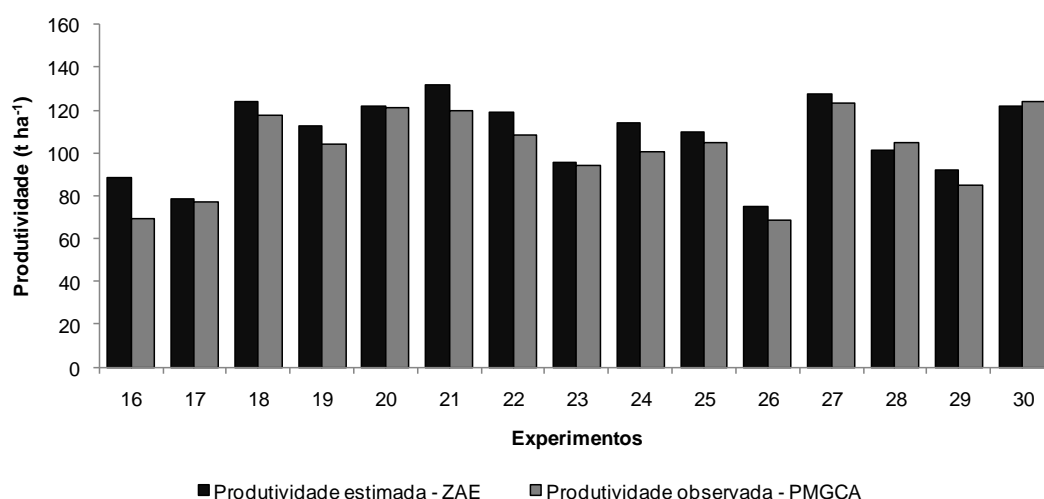


Figura 10 – Distribuição da produtividade observada em campo nos experimentos do PMGCA-UFV e estimada pelo método ZAE para o primeiro ciclo de cana-soca.

Os resultados obtidos neste trabalho são similares aos encontrados por Santos et al. (2006) que calibraram o método ZAE para a estimativa das produtividades potencial e real da cultura da cana-de-açúcar, em função de dados meteorológicos e da disponibilidade de água nos solos do município de Jaú – SP, no período que compreendeu as safras de 1998/1999 a 2001/2002, no qual obtiveram um valor de  $\beta_1=0,97$  e  $r^2=0,59$ .

Esse padrão de desempenho também foi observado por Carvalho (2009) que utilizou o método da zona agroecológica para determinar a produtividade potencial e limitada pela disponibilidade hídrica para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras de 1990/1991 a 2005/2006 obtendo um valor de  $\beta_1=1,04$  e  $r^2=0,60$ .

O método da zona agroecológica também tem apresentado resultados satisfatórios para outras culturas. Andrioli et al. (2006) encontrou

resultados satisfatórios ( $\beta_1=0,99$  e  $r^2=0,80$ ) pelo método da zona agroecológica para estimar a produtividade do milho safrinha em Piracicaba – SP. Gelcer et al. (2006) calibraram o método ZAE para a estimativa das produtividades potencial e real do algodoeiro, em função da variação da temperatura do ar, fotoperíodo, insolação e precipitação, no qual obtiveram um valor de  $\beta_1=1,00$  e  $r^2=0,91$ .

As Figuras 11 e 12 apresentam a quebra de produtividade por limitação hídrica estimada pelo método ZAE para os ciclos das canas-planta e primeira cana-soca, respectivamente.

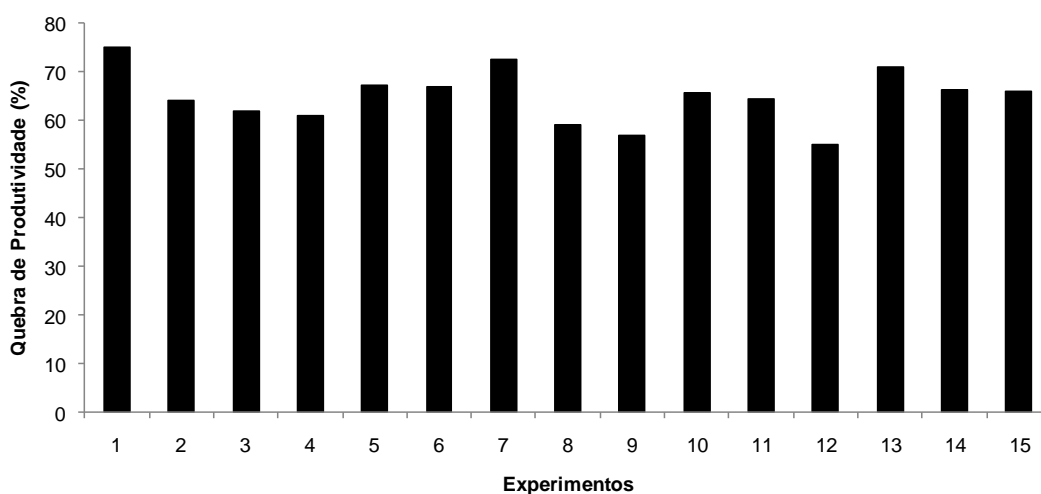


Figura 11 – Perdas estimadas pelo método ZAE na produtividade da cana-planta devido ao déficit hídrico ao longo do ciclo.

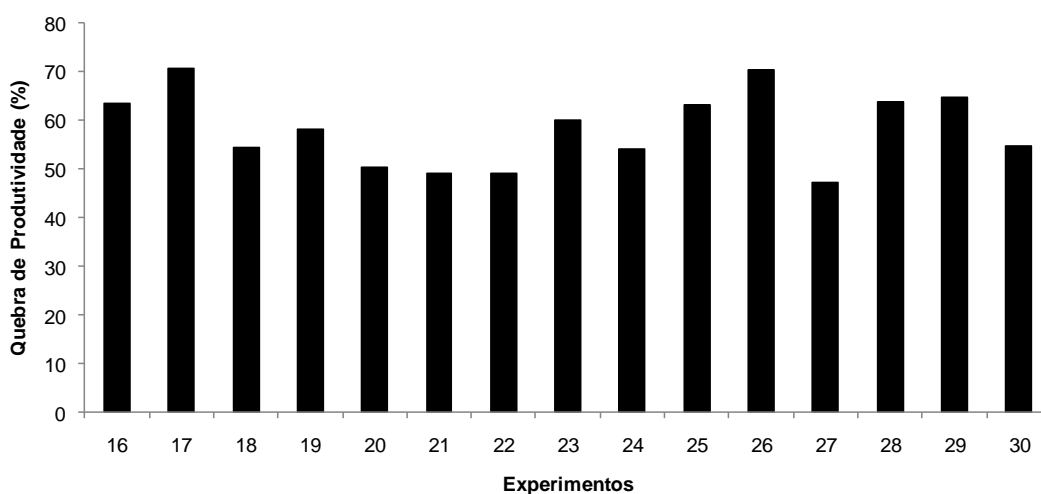


Figura 12 – Perdas estimadas pelo método ZAE na produtividade da primeira cana-soca devido ao déficit hídrico ao longo do ciclo.

Para o ciclo da cana-planta o método ZAE simula altas perdas devido ao déficit hídrico nos experimentos 1, 7 e 13, sendo estas perdas de 74,9 %; 72,5%: e 70,9%, respectivamente. As menores perdas são estimadas para os experimentos 12, 9, 8, sendo respectivamente de 55,1%; 56,8%; e 59,3%. Para os demais experimentos as perdas concentram-se entre 60 e 70%. Para o ciclo da cana-soca as maiores perdas são estimadas para os experimentos 17 (70,8%) e 26 (70,3%). As menores perdas são estimadas para os experimentos 27, 22 e 21, sendo de 47,3%; 49,2% e 49,2%, respectivamente, permanecendo entre 50% a 70% para os demais experimentos.

A Figura 13 apresenta a precipitação total observada por experimentos para o ciclo da cana-planta.

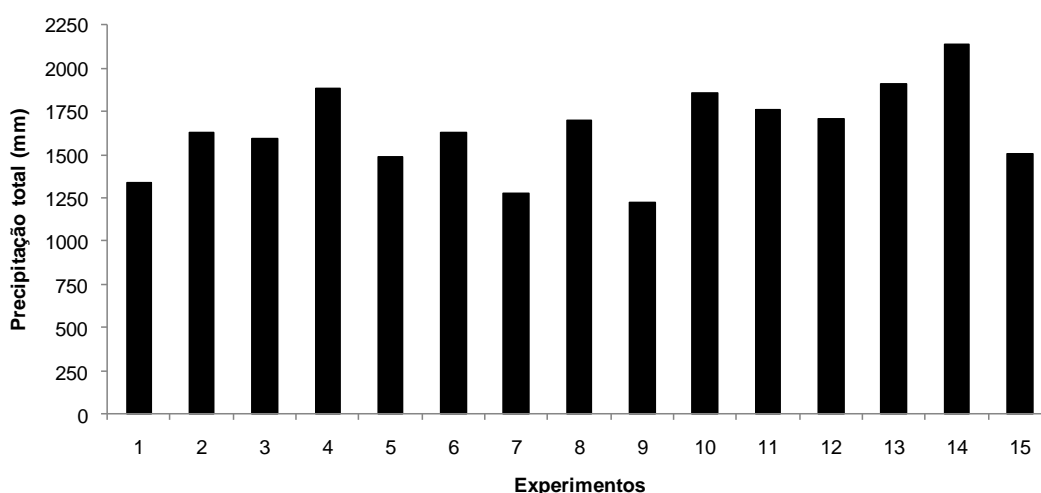


Figura 13 – Precipitação total observada por experimentos para o ciclo da cana-planta.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Agência Nacional de Águas (ANA).

Verifica-se que a precipitação total incidente é inferior a 1500 mm apenas nos experimentos 1, 5, 7 e 9, valor teórico mínimo necessário para o desenvolvimento da cultura, para que esta não apresente perda de produtividade por deficiência hídrica (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A Figura 14 apresenta a precipitação total observada por experimento para o ciclo de primeira cana-soca. Observa-se que os experimentos 20, 22, 24, 25, 26 e 28 foram os únicos que apresentaram precipitação superior a

1500 mm, sendo a precipitação inferior a esse valor para os demais experimentos.

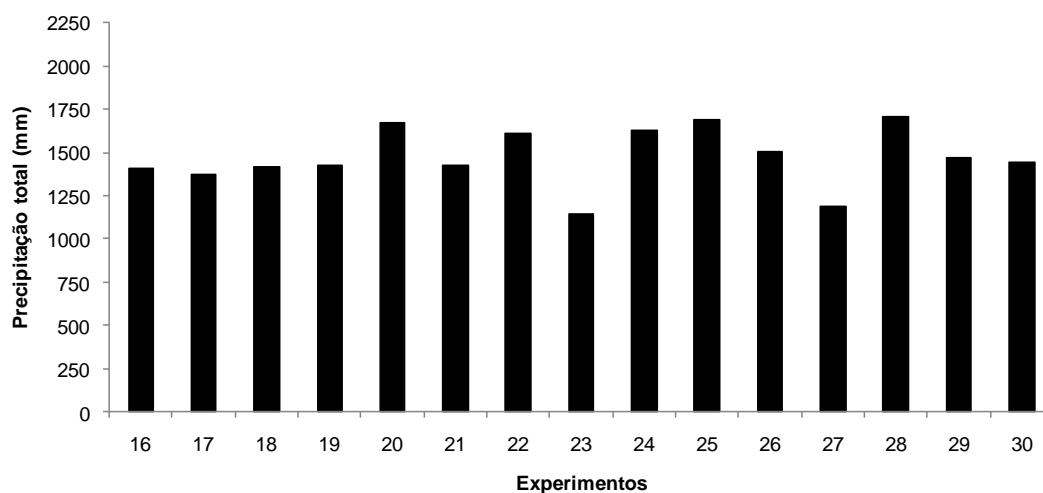


Figura 14 – Precipitação total observada por experimento para o ciclo de primeira cana-soca.

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Agência Nacional de Águas (ANA).

Pela análise dos gráficos dos balanços hídricos apresentados nos apêndices A para cana-planta, e B para cana-soca, observa-se a ocorrência de déficit hídrico nos decêndios iniciais dos experimentos, entretanto, os valores de produtividade observados nos experimentos não indicam que esses déficits hídricos tenham ocasionado perdas. O efeito do estresse hídrico sobre a planta depende do período em que ocorre, da sua duração e intensidade. Carvalho (2009) ressalta que isso pode ocorrer porque, dependendo da fase fenológica e da intensidade do estresse hídrico, a cultura pode recuperar-se após um período de deficiência hídrica, produzindo tanto quanto em áreas que não exprimem essa deficiência hídrica.

Marin et al. (2008), destacam que resultados como estes encontrados nesse tipo de estudo, podem estar associados ao fato dos experimentos analisados serem de uma região do Brasil onde a deficiência hídrica não representa um fator limitante de grande magnitude. Carvalho (2009) encontrou localidades a noroeste do Estado de São Paulo, nas quais a deficiência hídrica é normalmente mais elevada que nas demais partes do Estado, mas não inviabiliza a obtenção de níveis economicamente viáveis de

produtividade da cana-de-açúcar. Além disso, conforme Carvalho (2009), o método ZAE pode, em alguns casos, reduzir exageradamente a produtividade em função do déficit hídrico, o que nem sempre é adequado para a cana-de-açúcar.

#### **4.2. Validação do método ZAE**

Uma vez que a calibração e a parametrização mostraram bons resultados, buscou-se validar o método ZAE para a região do Triângulo Mineiro, utilizando-se uma série temporal de dados de produtividade observada obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

O comportamento da curva de produtividade média estimada pelo método ZAE e da produtividade média observada, segundo dados do IBGE para a região do Triângulo Mineiro é apresentada na Figura 15.

Pode-se observar que estimativas de produtividade da cana-de-açúcar pelo método ZAE para a região do Triângulo Mineiro, estimadas em função das três épocas de corte, seguiram o comportamento temporal da série histórica de dados médios de produtividade da cana-de-açúcar do IBGE. O método ZAE capturou as variações observadas ao longo da série do IBGE, contudo, foi constatado um erro sistemático de superestimativa da produtividade por parte do método ZAE.

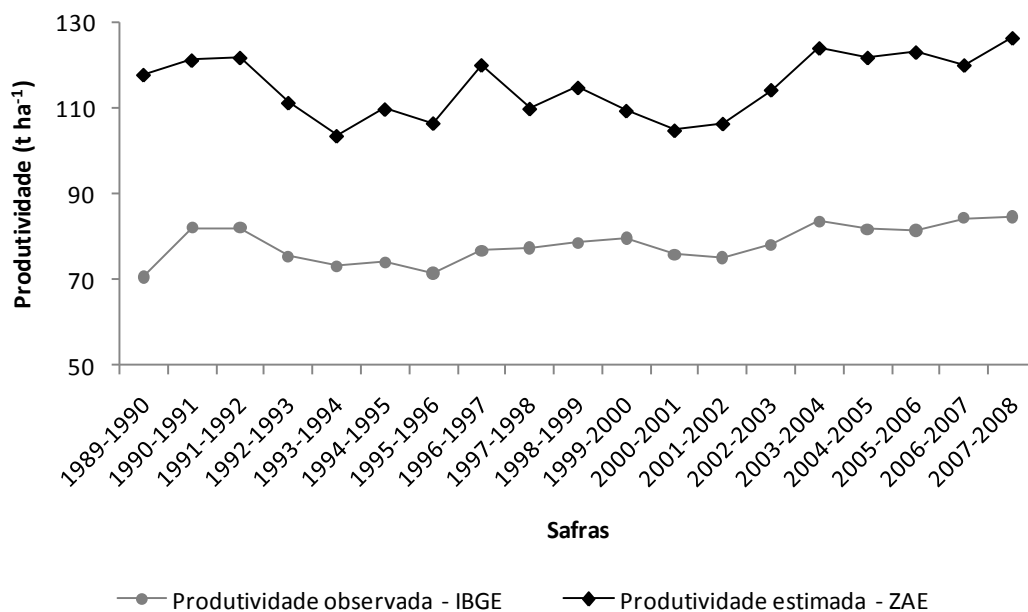


Figura 15 – Distribuição temporal da produtividade média estimada pelo método ZAE e da produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE).

A Figura 16 apresenta a relação entre a produtividade limitada pela disponibilidade hídrica, a qual foi estimada pelo método ZAE, com a produtividade observada da cana-de-açúcar, segundo dados do IBGE e o desempenho estatístico dos erros RMSE, MAE, MBE e índice concordância de Willmott (d) para estimativa da produtividade média para a região do Triângulo Mineiro.

Observa-se que o método ZAE explica 55% da variabilidade dos dados médios do IBGE. Nesta análise, o coeficiente linear da Equação foi desprezado por não ser estatisticamente significativo ao nível de 5%.

A análise da Figura 16 indica um erro sistemático por parte do método ZAE (MBE = 37,0 t ha<sup>-1</sup>) com tendência de superestimativa da produtividade de colmos. A produtividade média estimada pelo método ZAE também apresenta uma variabilidade maior quando comparada aos dados de produtividade do IBGE (RMSE=37,3 t ha<sup>-1</sup>). O baixo valor do índice de Willmott (d) indica pouca concordância entre a produtividade média estimada pelo método ZAE e a produtividade observada segundo dados do IBGE para a região Triângulo Mineiro.

Contudo, ressalta-se que essa tendência de superestimativa deve estar associada ao fato do modelo considerar que apenas a água é fator

limitante, não sendo considerados outros fatores também importantes (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Além disso, deve-se destacar os dados de produtividade do IBGE, que correspondem a uma grande média da produtividade dos municípios que compõem a região do Triângulo Mineiro, incluindo municípios com alta produtividade (compreendendo fazendas com altíssimo nível de tecnologia, manejo e genética) e baixa produtividade (produtores com o cultivo exposto a todos os tipos de adversidades). Com isso, a variabilidade dos dados diminui, ocorrendo uma suavização da variância.

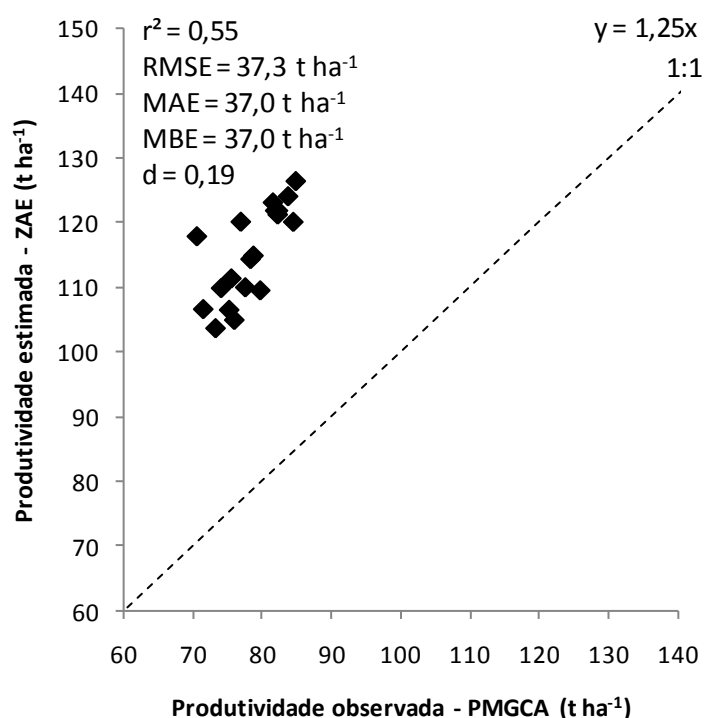


Figura 16 – Relação entre a produtividade média estimada pelo método ZAE e a produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE).

Removendo a tendência média de superestimativa apresentada pelo método ZAE de 37 t ha<sup>-1</sup>, obtém-se uma nova distribuição da produtividade média estimada pelo método ZAE com a produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE) apresentada na Figura 17.

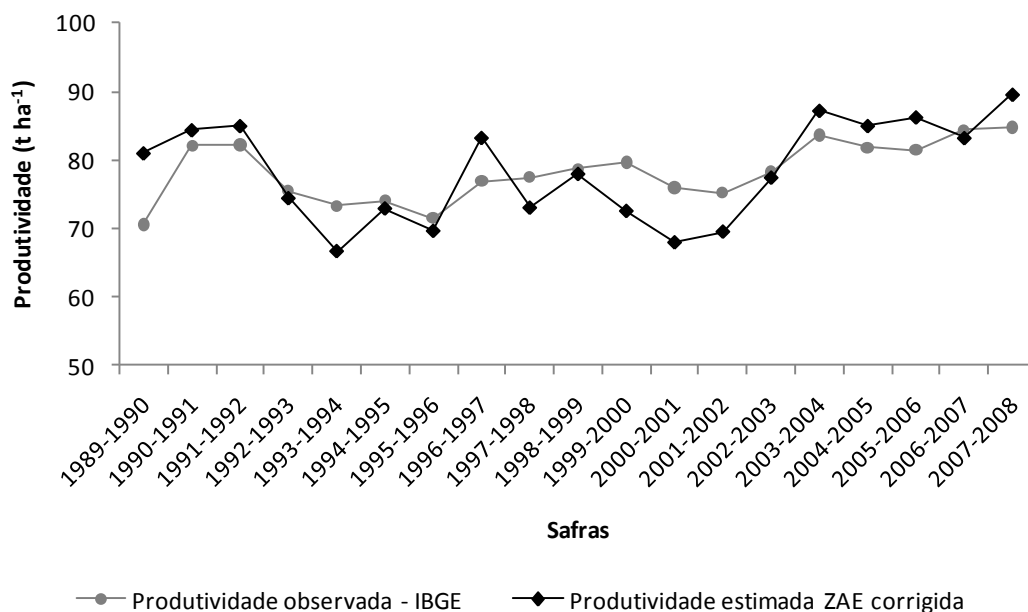


Figura 17 – Distribuição temporal das médias corrigidas de produtividade estimadas pelo método ZAE e da produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE).

A produtividade média corrigida estimada pelo método ZAE para região do Triângulo Mineiro acompanha o comportamento temporal da série histórica de dados de produtividade média da cana-de-açúcar segundo dados do IBGE, sendo que, em algumas safras ocorreu uma pequena subestimação pelo método ZAE. Porém, como os dados representam a média de toda a região, e essas subestimativas seguem um padrão de queda também observado na série histórica do IBGE, as estimativas de produtividade estão satisfatórias.

A Tabela 9 apresenta a produtividade média observada dos dados do IBGE, a média estimada pelo modelo ZAE sem ajuste e a média estimada ajustada.

Tabela 9 – Valores médios de produtividade para os dados observados em condições de campo, estimados após o ajuste estatístico

Média observada	78,3 t ha <sup>-1</sup>
Média estimada sem ajuste	115,3 t ha <sup>-1</sup>
Média estimada ajustada	78,3 t ha <sup>-1</sup>

A Figura 18 apresenta a relação entre a produtividade estimada corrigida e a produtividade observada segundo os dados do IBGE e o

desempenho estatístico dos erros RMSE, MAE, MBE e índice concordância de Willmott (d) para estimativa corrigida de produtividade média para a região do Triângulo Mineiro.

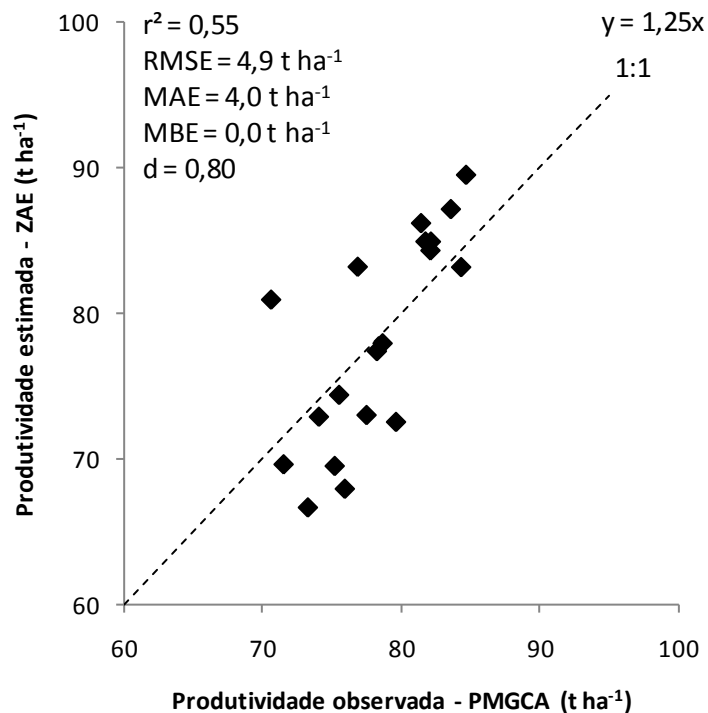


Figura 18 – Relação entre produtividade média estimada pelo método ZAE corrigida e a produtividade média da região do Triângulo Mineiro (IBGE).

Observa-se a melhora no desempenho estatístico do método ZAE para estimativa de dados médios de produtividade na região do Triângulo Mineiro. Os baixos valores de RMSE e MAE indicam que a variabilidade detectada, antes do ajuste, diminuiu consideravelmente, o valor do MBE =  $0,0 \text{ t ha}^{-1}$  indica que na média, após a correção, o método apresentou-se bem coerente com os dados do IBGE. Similarmente o índice de concordância de Willmott (d), que antes do ajuste era 0,19, subiu para 0,80, indicando uma boa concordância dos dados estimados e observados.

Esse padrão de desempenho também foi observado por Carvalho (2009) que validou o método ZAE para determinar a produtividade potencial e limitada pela disponibilidade hídrica para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo obtendo um valor de  $\beta_1=0,94$  e  $r^2=0,68$ .

## 5. CONCLUSÕES

Em função dos resultados obtidos e em comparação com aqueles encontrados na literatura, conclui-se que a adaptação realizada ao método da Zona Agroecológica permite estimar adequadamente os valores de produtividade penalizada em função do déficit hídrico relativo para a cultura da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Estado de Minas Gerais, de modo que seja possível verificar os efeitos do clima (época e locais) sobre os valores observados de produtividade. Assim, este modelo se apresentou como uma importante ferramenta para estimar a produtividade da cana-de-açúcar em macroescala, podendo auxiliar no planejamento da expansão otimizada da atividade no estado.

A validação do método ZAE para a região do Triângulo Mineiro mostrou, após a correção da tendência de superestimativa da produtividade em  $37,3 \text{ t ha}^{-1}$ , um bom ajuste em relação aos dados do IGBE, corroborando a eficácia do método ZAE e mostrando que, desde que sejam feitos os ajustes necessários, o método pode ser aplicado para previsão de produtividade, obtendo resultados satisfatórios.

O método ZAE mostrou-se ser uma ferramenta que pode ser aplicada para diferenciação da produtividade em macroescala, útil para planejamento de implantação da atividade canavieira. Entretanto, existem outros fatores que também influenciam a produtividade das culturas, combinando-se com os elementos climáticos. Assim, para a obtenção de uma melhor distinção da produtividade a nível regional, é necessário um estudo de modelagem mais elaborado, aplicando-se modelos mecanísticos mais complexos, que analisem todas as interações climáticas, bem como, práticas de manejo, influências do solo, entre outras, de modo que a modelagem possa ser aplicada em escala reduzida, em nível de propriedade, como ferramenta de manejo na condução dos plantios, de auxílio a tomada de decisão e gerenciamento estratégico.

## 6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**. FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, FAO, 300 p. 1998.
- ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; FILHO, G. M.; JÚNIOR, R. A. F. **Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas**. Ciência e Agrotecnologia, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.
- ANDRIOLI, K. G.; SENTELHAS, P. C.; SOLER, C. M. T.; MARIN, F. R. Calibração do modelo da FAO para simulação da produtividade potencial e real do milho safrinha. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 14, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006.
- ARAUJO, M. I. M. **Zoneamento da produtividade potencial climática da cana-de-açúcar no Estado do Rio de Janeiro**. 1993. 84 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.
- ARGENTA, G.; SANGOI, L.; SILVA, P. R. F.; RAMPAZZO, C.; GRACIETTI, L. C.; STRIEDER, M. L.; FORSTHOFER, E. L.; SUHRE, E. Potencial de rendimento de grãos de milho em dois ambientes e cinco sistemas de produção. **Scientia Agraria**, v.4, n.1-2, p.27-34, 2003.
- ARGENTON, P.E. **Influência das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (Saccharum sp), na região de Piracicaba**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- BARBIERI, V.; TUON, R. L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 17 p, 1992.
- BARBOSA, M. H. P.; SILVEIRA, L. C. I. **Melhoramento genético e Recomendação de cultivares**. 1. Ed. 2009. Cap. 11. p. 313-331.
- BELL, M. J.; GARSIDE, A.L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, v.92, p.231–248, 2005.

BEZUIDENHOUT, C. N. **A model review and proposed mechanistic tiller model for the CANEGRO sugarcane crop model**. 2000. 79 f.. M. Tech thesis - Technikon Natal, Durban, South Africa, 2000.

BONNECARRÈRE, R. A. G.; NETO, D. D.; MARTIN, T. N.; PEREIRA, A. R.; MANFRON, P. A. Estimativa das produtividades potencial e deplecionada da cultura de milho no Estado do Rio Grande do Sul em função das condições climáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.15, n.3, p. 280-288, 2007.

BONNETT, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 57, p. 1087-1095, 2006.

BRISTOW, K., CAMPBELL, G.S On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.31, 159-166, 1984.

CARVALHO, G. L. **Eficiência da produção agrícola de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006**. 2009. 120p. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CHAN, A. K. **Simulation of growth and development of faba bean (*Vicia Faba L.*)** 1992. 217 f. Thesis (Doctor of Philosophy ) – Department of Meteorology and Department of Agricultural Botany, University of Reading, Reading, 1992.

COLIN, E. C. Mathematical programming accelerates implementation of agro-industrial sugarcane complex. **European Journal of Operational Research**, v 199, p. 232–235, 2009

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

DE WIT, C.T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; LAAR, H.H.van (Ed.) Simulation of plant growth and crops production. Wageningen: Pudoc, p.3-8. 1982.

DELGADO-ROJAS, J. S.; BARBIERI, V. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 67-73, 1999.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO: Irrigation and Drainage Paper, 33, Rome, FAO, 172 p. 1979.

EVERINGHAM, Y. L.; SMYTH, C. W.; INMAN-BAMBER, N. G. Ensemble data mining approaches to forecast regional sugarcane crop production. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p 689–696, 2009.

FAO/STAT. **Food and Agricultural commodities production**. Disponível em: < <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em 27 de junho de 2010.

FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. **La canne à sucre**. Barcelona: Editions Maisonneuve et Larose, 1970. 57 p. (Collection "Techniques Agricoles et Productions Tropicales").

FISCHER, G.; VELTHUIZEN, H. V.; SHAH, M.; NACHTERGAELE, F. O. **Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: Methodology and results**. IIASA RR-02-02, IIASA, Laxenburg, 2002.

GELCER, E. M.; SENDELHAS, P. C.; CHIAVEGATO, E. J. Calibração do Modelo Agrometeorológico da FAO para Estimativa da Produtividade Potencial e Real do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 14, 2006, Piracicaba. SIICUSP. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006. v. 1.

GILBERT, R.A.; SHINE JR., J.M.; MILLER, J.D.; RAINBOLT, C.R. The effect genotype, environmental and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.95, p.156-170, 2006.

GOUVÊA, J. R. F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba, SP**. 2008. 100p. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

GOUVÊA, J. R. F.; SENDELHAS, P. C.; GAZZOLA, S. T.; SANTOS, M. C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, v.66, n.5, p.593-605, 2009.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R. T. de. Determination of spatial water requirements at country and regional levels using crop models and GIS. An example for the state of Parana, Brazil. **Agricultural Water Management**, v.52, p.177-196, 2002.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.137–157, 2000.

IBGE - Sistema de Recuperação Automática – SIDRA. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/default.asp?t=5&z=t&o=11&u1=1&u2=1&u3=1&u4=1&u5=1&u6=1>>. Acesso em 27 de junho de 2010.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v. 36, n. 1, p.41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N. G.; MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v. 83, p. 125–138, 2003.

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the Ceres Maize water balance. **S. Afr. J. Plant Soil**, v.8, n.2, p.93– 99, 1991.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, p.107-122, 2004.

IOMG – Imprensa Oficial de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.iof.mg.gov.br/index.php/?Acao-do-Governo-Arquivo/Producao-de-cana-de-acucar-bate-novo-recorde.html>>. Acesso em 10 de junho de 2010.

KASSAM, A. H. **Net biomass production and yield of crops**, FAO, Rome, 1977.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems. I. development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, v. 61, p. 253-271, 1999.

LEAL, B. G. **Sistema computacional para a avaliação e estimativa das produtividades potencial e real de culturas agrícolas**. 2000. 97p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

LIU, D. L.; BULL, T. A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, v. 144, p.181-211, 2001.

LIU, D. L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 90, p 119–139, 1998.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. **Respostas biométricas fisiológicas ao deficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D. ; VIAN, C.E.; SANTOS, M.C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1449-1455, 2008.

MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; JUNIOR, J. Z. **Cana-de-açúcar**. 1. Ed. Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. 2009. p. 111-130.

MONTANS NETO, L. H. M. Censo varietal quantitativo das variedades de cana-de-açúcar cultivadas no Estado de São Paulo em 2007. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16, 2008, São Carlos. **Anais de Eventos da UFSCar**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2008. v. 4, p. 393.

MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modelling. **Agronomy Journal**, v.88, p.695-697, 1996.

O'LEARY, G. J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, v.68, p.97-111, 2000.

OLIVEIRA, L. J. C. **Mudanças climáticas e seus impactos nas produtividades das culturas do feijão e do milho no Estado de Minas Gerais**. 2007. 86p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

PARK, S. E.; ROBERTSON, M.; INMAN-BAMBER, N. G. Decline in the growth of a sugarcane crop with age under high input conditions. **Field Crops Research**, v.92, p.305–320, 2005.

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

PEREIRA, L. S.; OEWIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, v. 57, p. 175-206, 2002.

PMGCA – UFV – **Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar** – Universidade Federal de Viçosa. Disponível em :<<http://www.pmgca.com.br/>>. Acesso em 27 de junho de 2010.

REYNOLDS, J.F. Some misconceptions of mathematical modeling. **What's New Plant Physiology**, Boston, v.10, n.11, p.41-44, 1979.

RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; GAGLIANO, C. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. **Agricultural Water Management**, v.87, p.91-105, 2007.

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

SANTOS, R. S. **Avaliação da relação seca/produtividade agrícola considerando cenários de mudanças climáticas**. 2008. 119p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008

SCARPARI, M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 94p. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SCARPARI, M. S. **PREDPOL: Um modelo de previsão da maturação da cana-de-açúcar visando planejamento otimizado**. 2007. 122p. Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SCARPARI, M. S.; BEACLAIR, E. G. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, v.61, n.5, p. 486-491, 2004.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F.; Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. **Scientia Agricola**, v.66, n.5, p.622-628, 2009.

SEAPA \_ MG - Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. Disponível em: <[http://www.agricultura.mg.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1366&Itemid=34](http://www.agricultura.mg.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1366&Itemid=34)>. Acesso em 10 de junho de 2010.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. **Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar**. 1. Ed. Divisão de Biblioteca e Documentação – ESALQ/USP. 2006. Cap 2. p. 19-36.

SILVA, T. G. F. **Análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no submédio do**

**vale do São Francisco**. 2009. 194p. Tese. (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C. N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, v.78, p.151–164, 2002.

SINGELS, A.; DONALDSON, R. A.; SMIT, M. A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, v.92, p.291–303, 2005a.

SINGELS, A.; SMIT, M.A.; REDSHAW, K.A.; DONALDSON, R.A. The effect of crop start date, crop class and cultivar on sugarcane canopy development and radiation interception. **Field Crops Research**, v.92, p. 249–260, 2005b.

SOLER, C. M. T; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the CSMCERES- Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. **European Journal Agronomy**, v.27, p.165–177, 2007.

TERAMOTO, E. R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) baseados em parâmetros do solo e do clima**. 2003. 96p. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia –Universidade de São Paulo. Escola Superior De Agricultura “Luiz De Queiroz”, Piracicaba, 2003.

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

THORBURN, P. J.; MEIER, E.A.; PROBERT, M. E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: Recent advances and applications. **Field Crops Research**, V.92, P.337–351, 2005.

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

TUBIELLO, F. N.; FISCHER, G. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000 – 2080. **Technological Forecasting & Social Change**, v .74, p. 1030 – 1056, 2007.

VILLA NOVA, N. A.; PEDRO Jr, M. J.; PEREIRA, A. R.; OMETTO, J. C. Estimativa de Graus-dia, acumulados acima de qualquer temperatura base,

em função das temperaturas máxima e mínima. **Caderno de Ciências da Terra, Instituto Geográfico-USP**, n.30,1972.

WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilizer. **Agricultural Water Management**, v. 43, p.173–182, 2000.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Lancaster, v. 63, n.11, p. 1309 – 1313, 1982.

YUN, J.I. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. **Agricultural System**. V.77, p.23–38, 2007.

ZANZARINI, R. M.;SANTOS, R. J.;ALBINO, K. G. A expansão da cana-de-açúcar no Triângulo mineiro – uma análise das alterações de cultivo no município de Araguari/MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13, 2009, Viçosa. SBGFA. **Anais...**Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2009

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

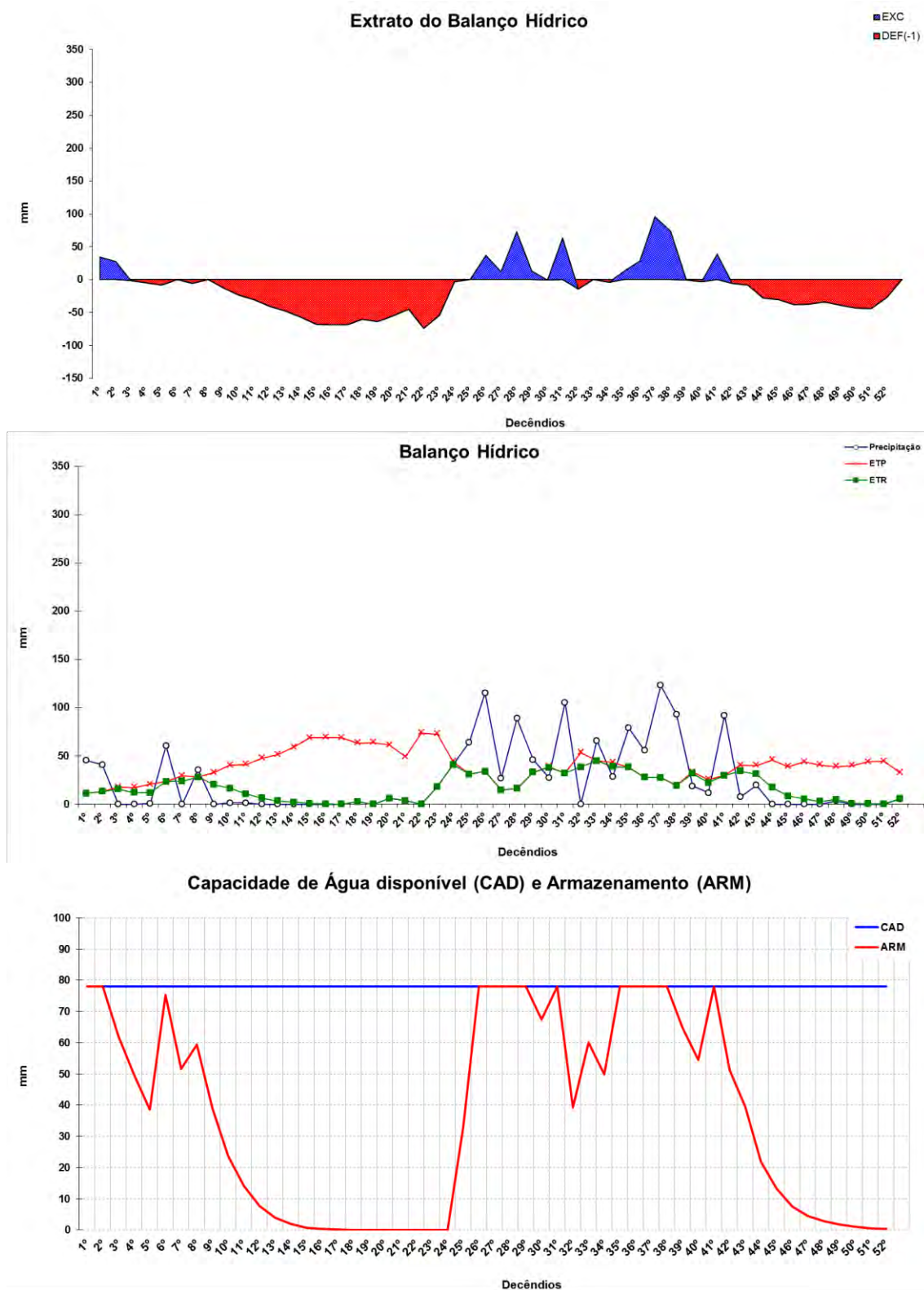


Figura 1 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 1 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

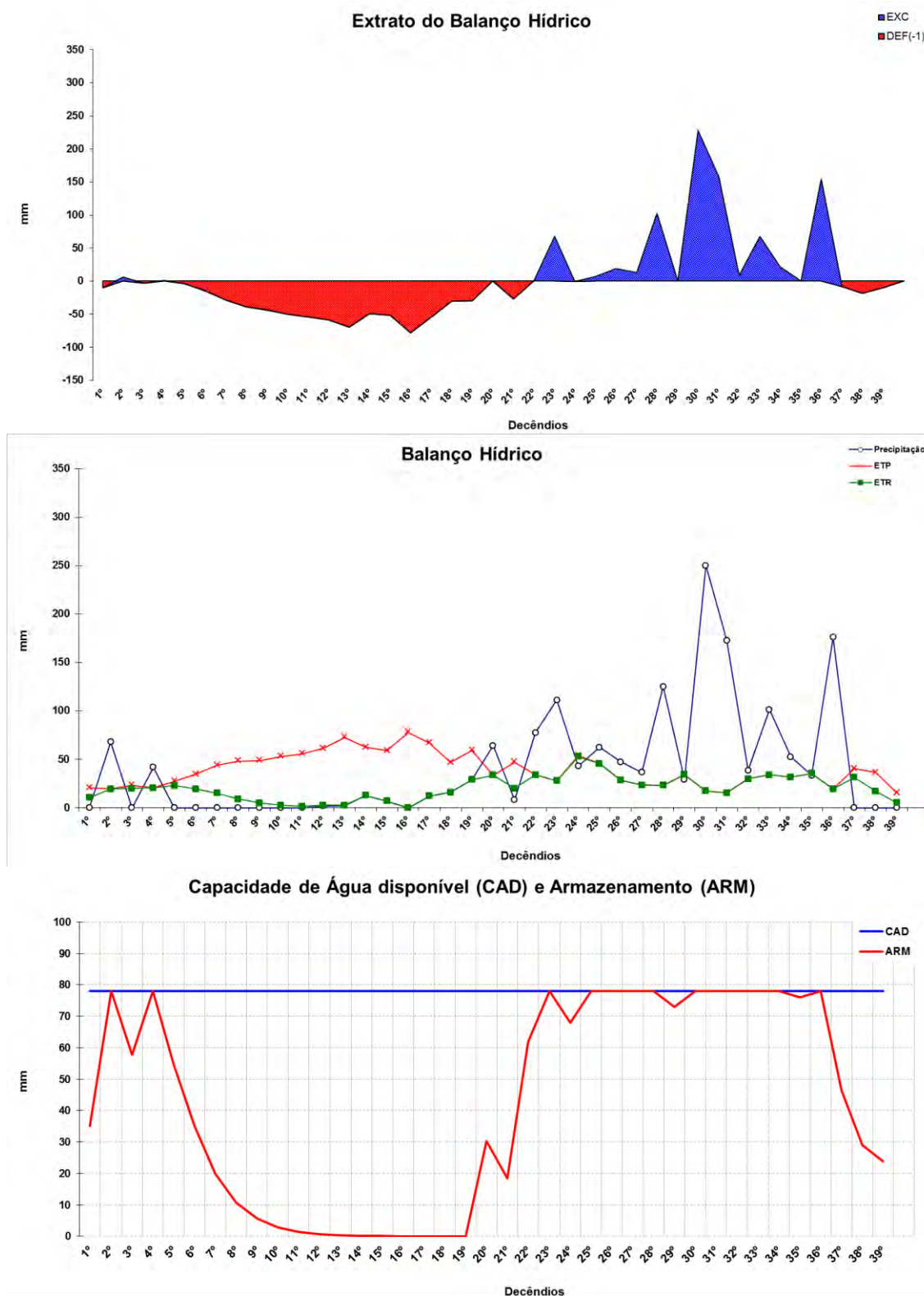


Figura 2 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 2 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

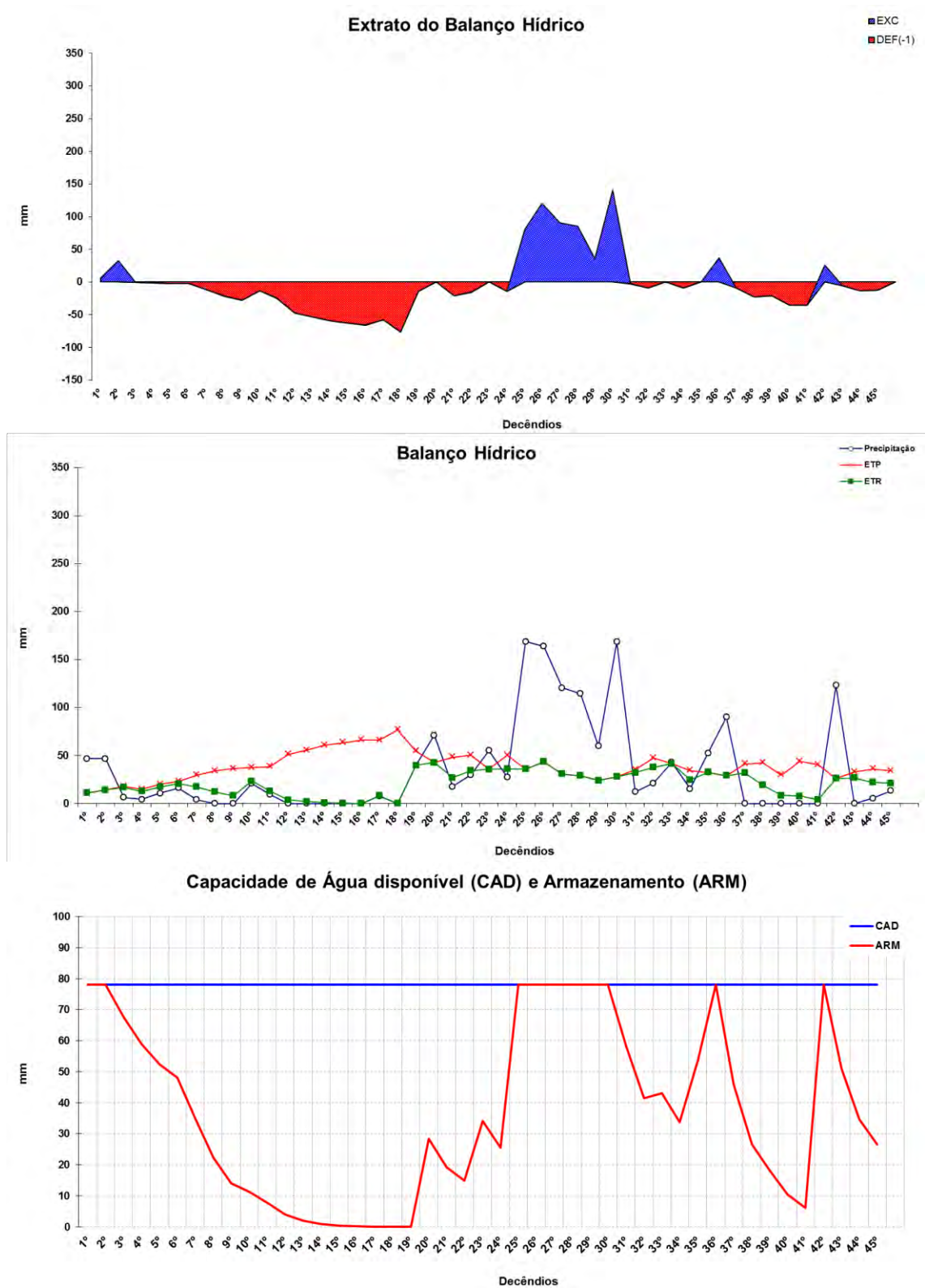


Figura 3 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 3 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

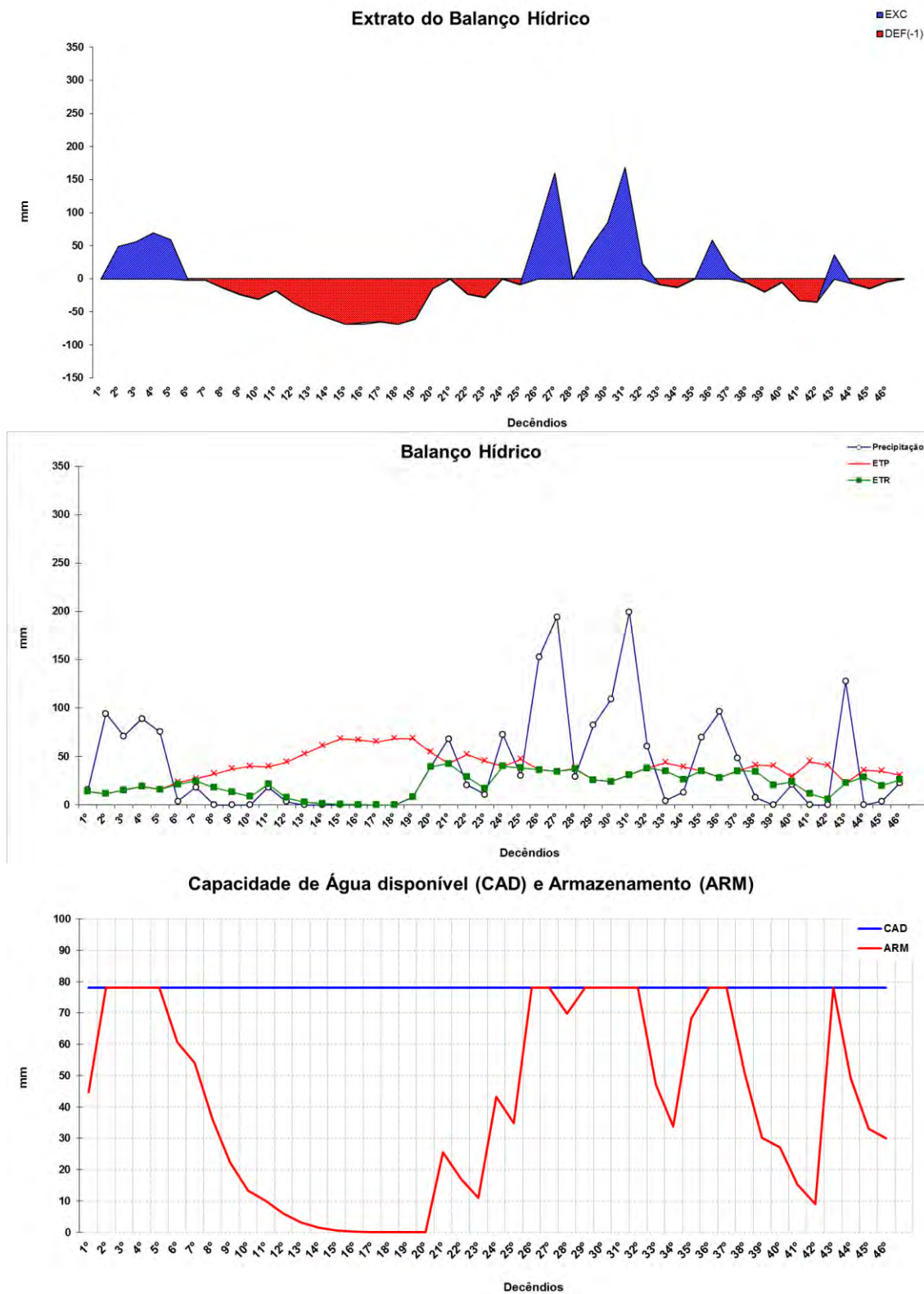


Figura 4 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 4 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

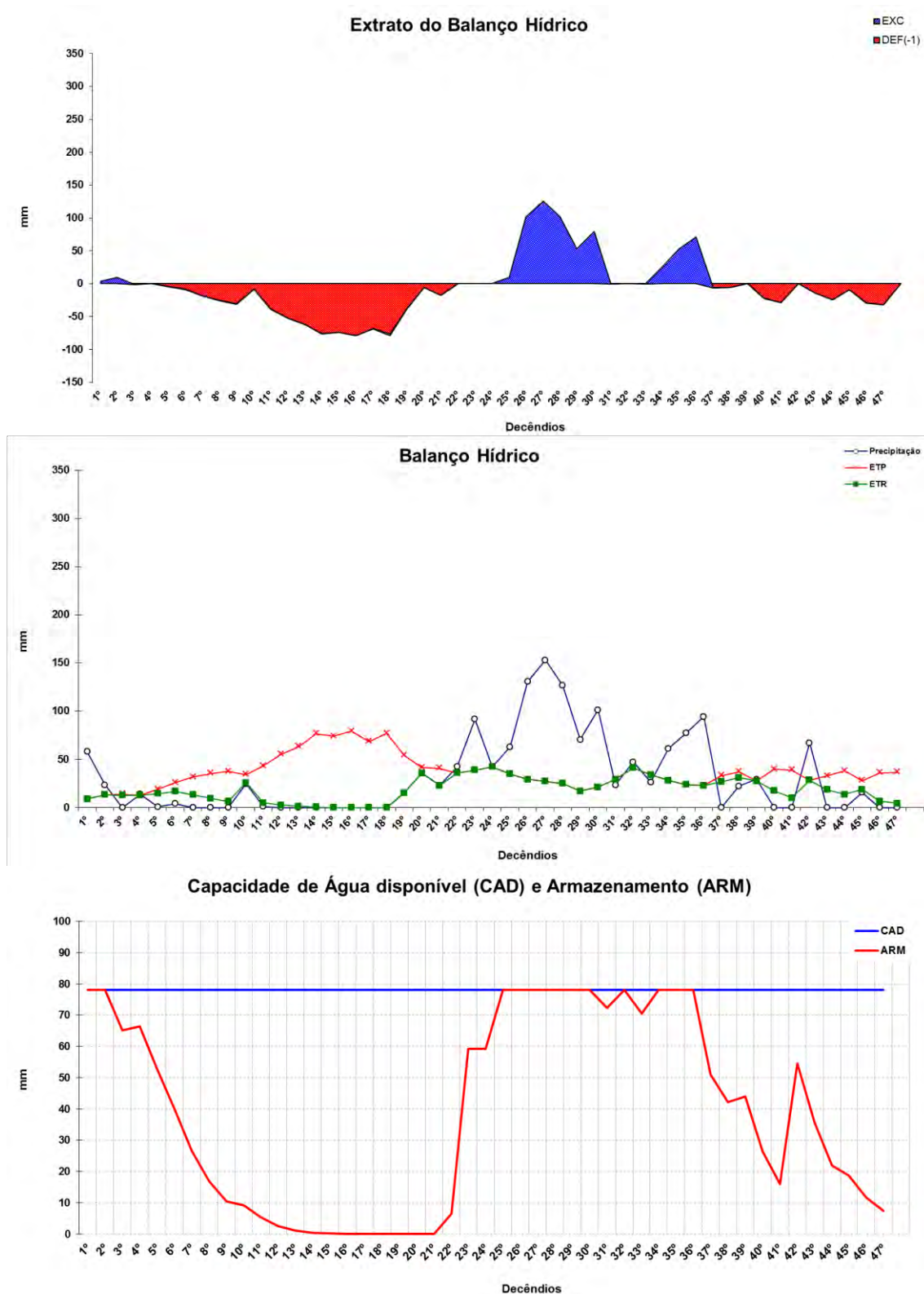


Figura 5 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 5 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

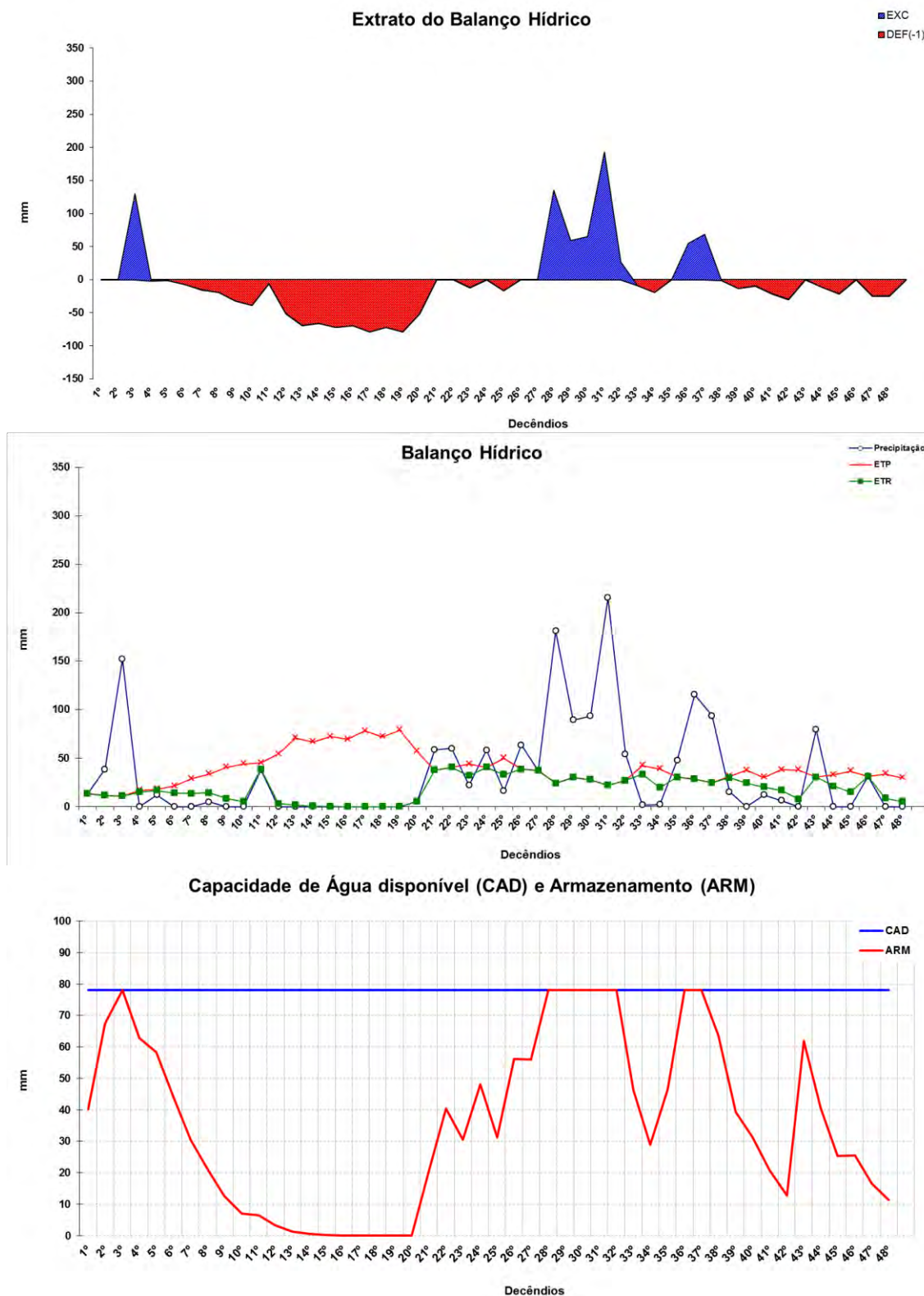


Figura 6 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 6 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

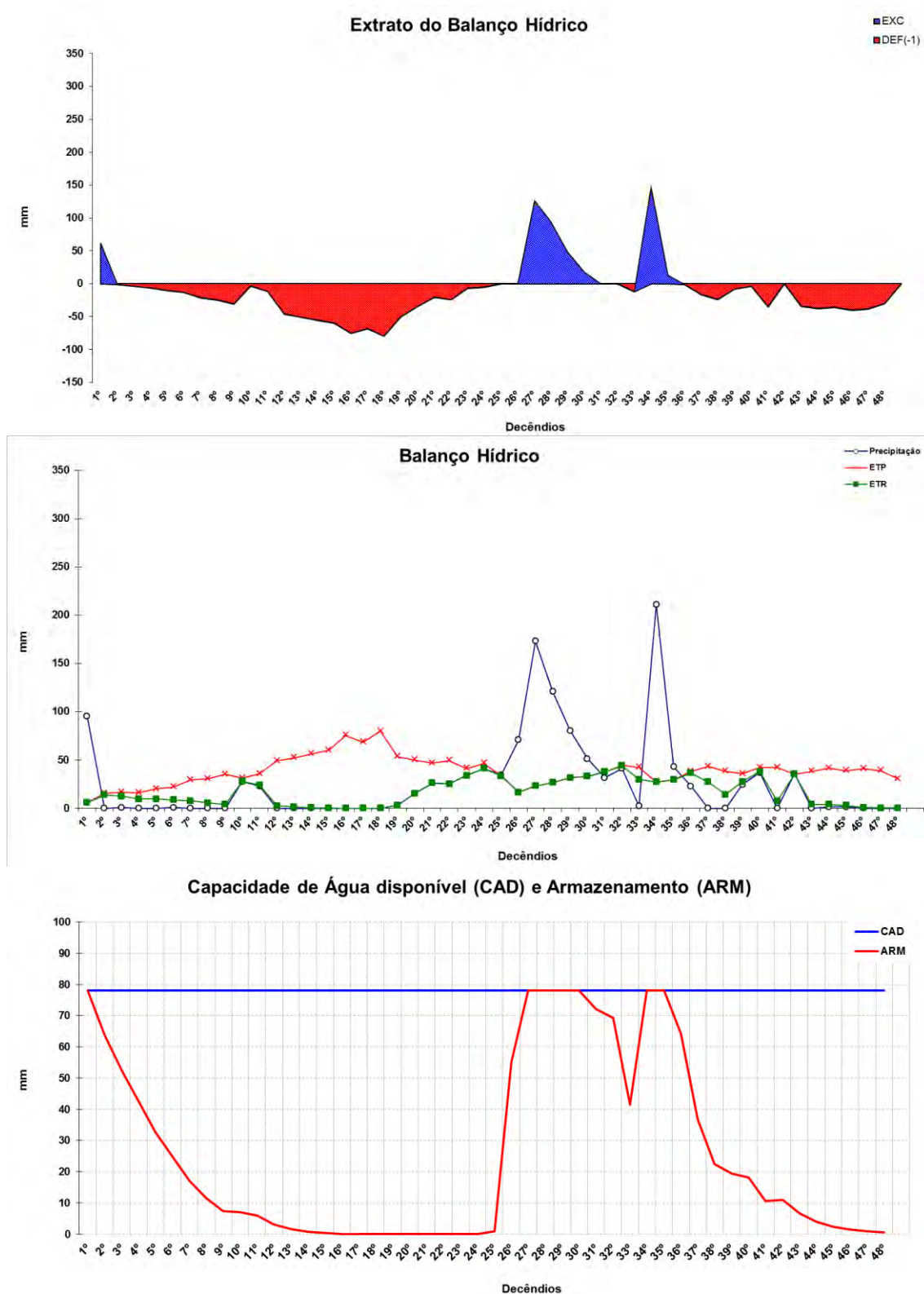


Figura 7 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 7 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

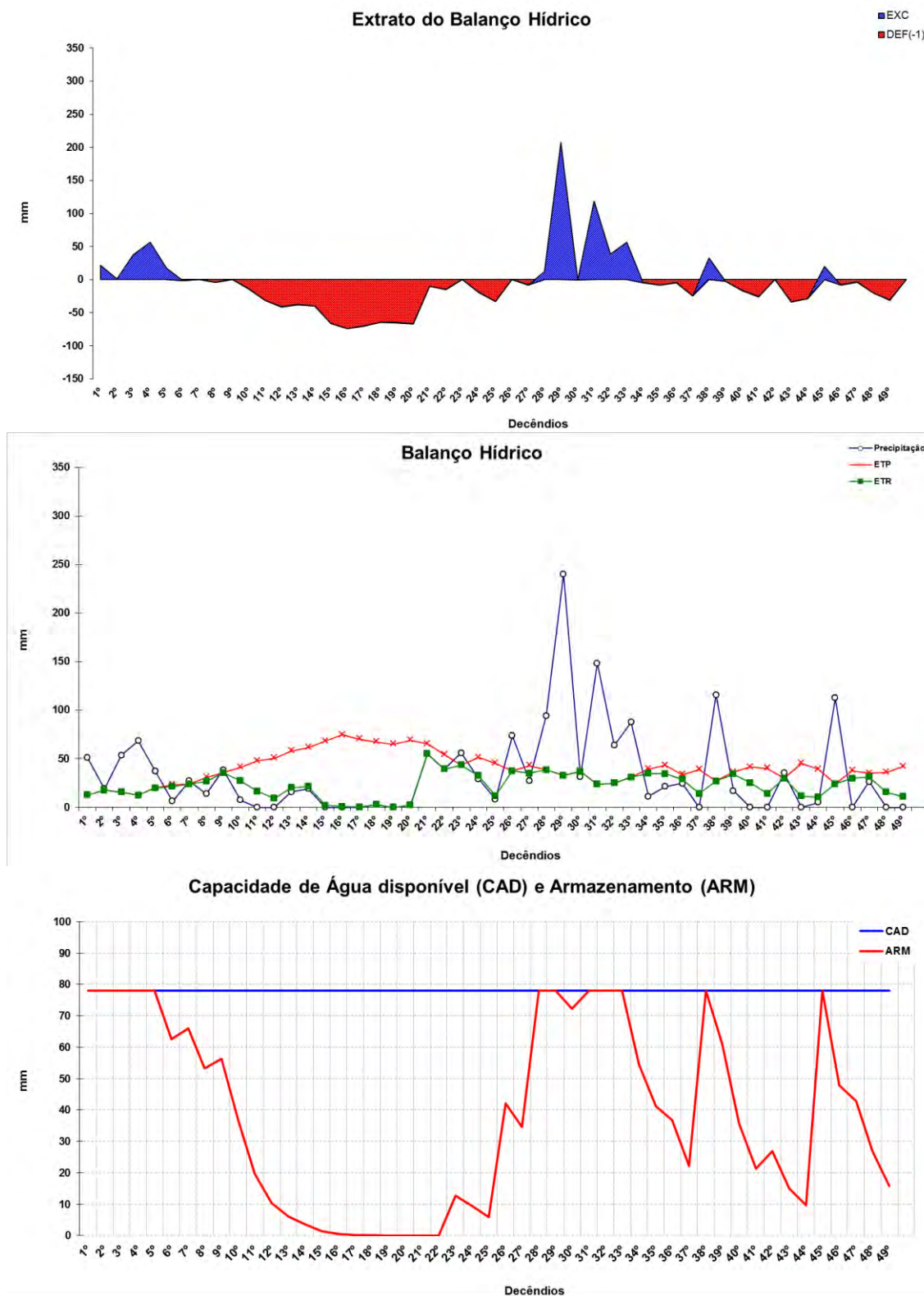


Figura 8 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 8 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

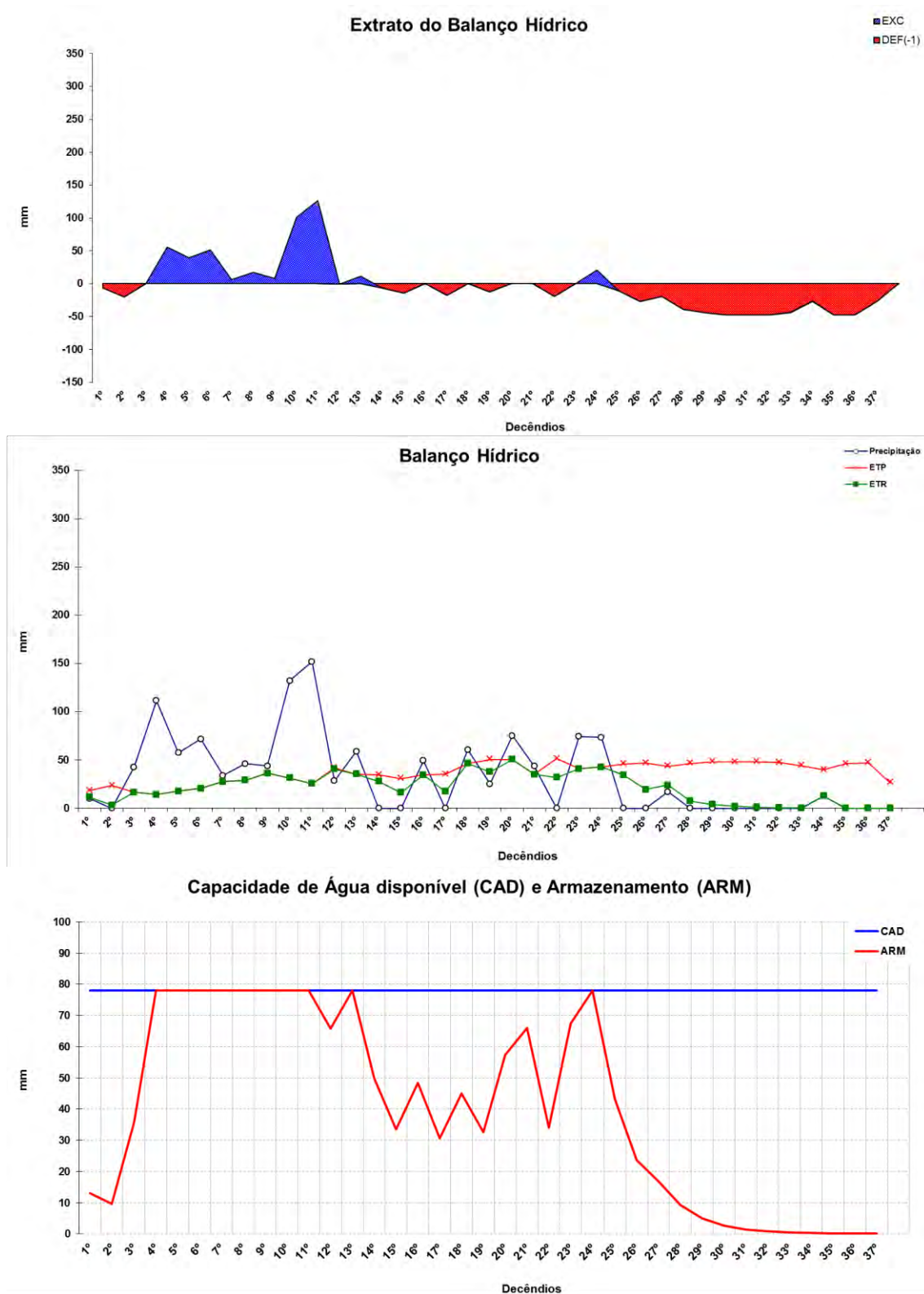


Figura 9 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 9 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

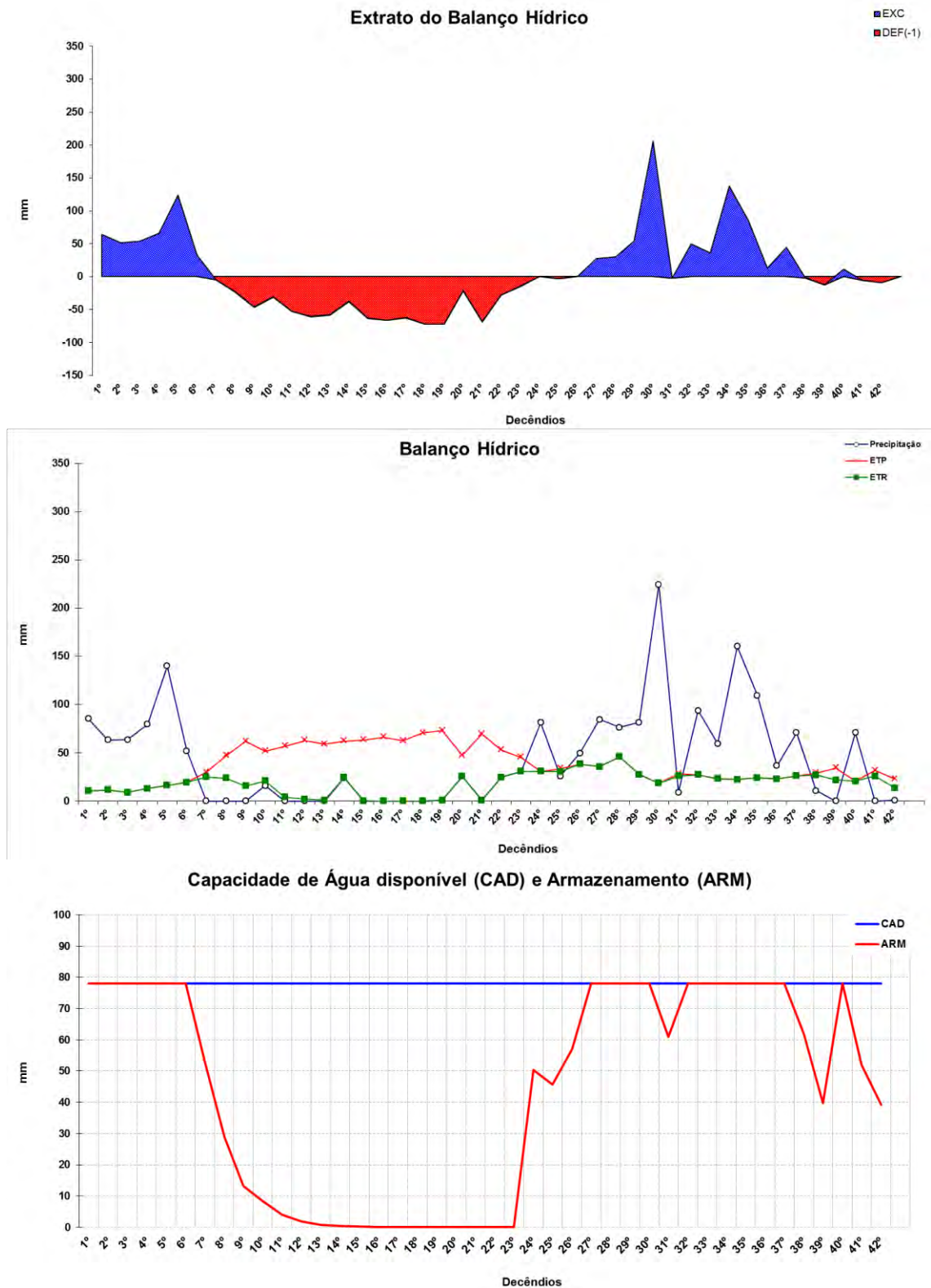


Figura 10 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 10 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

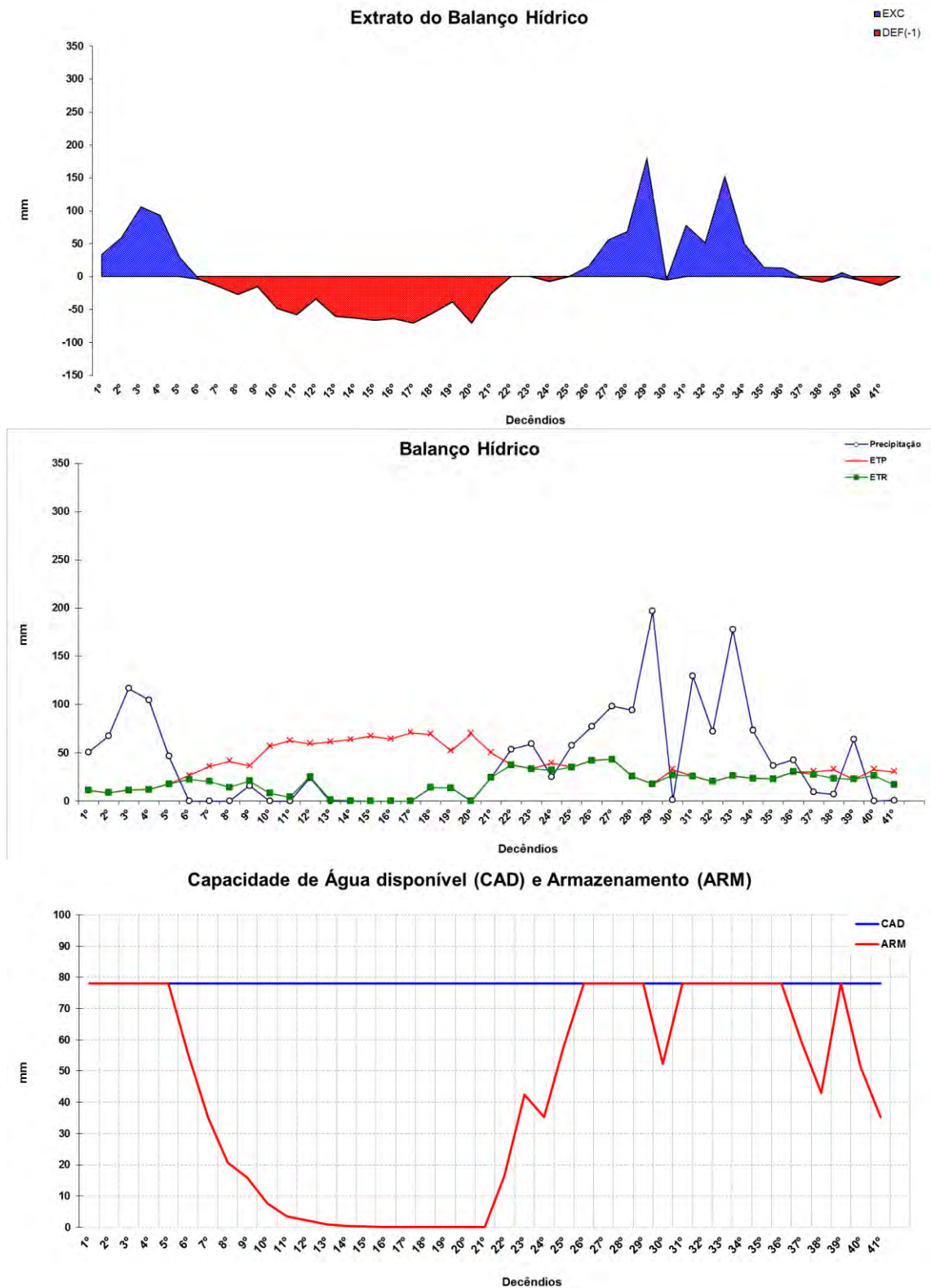


Figura 11 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 11 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

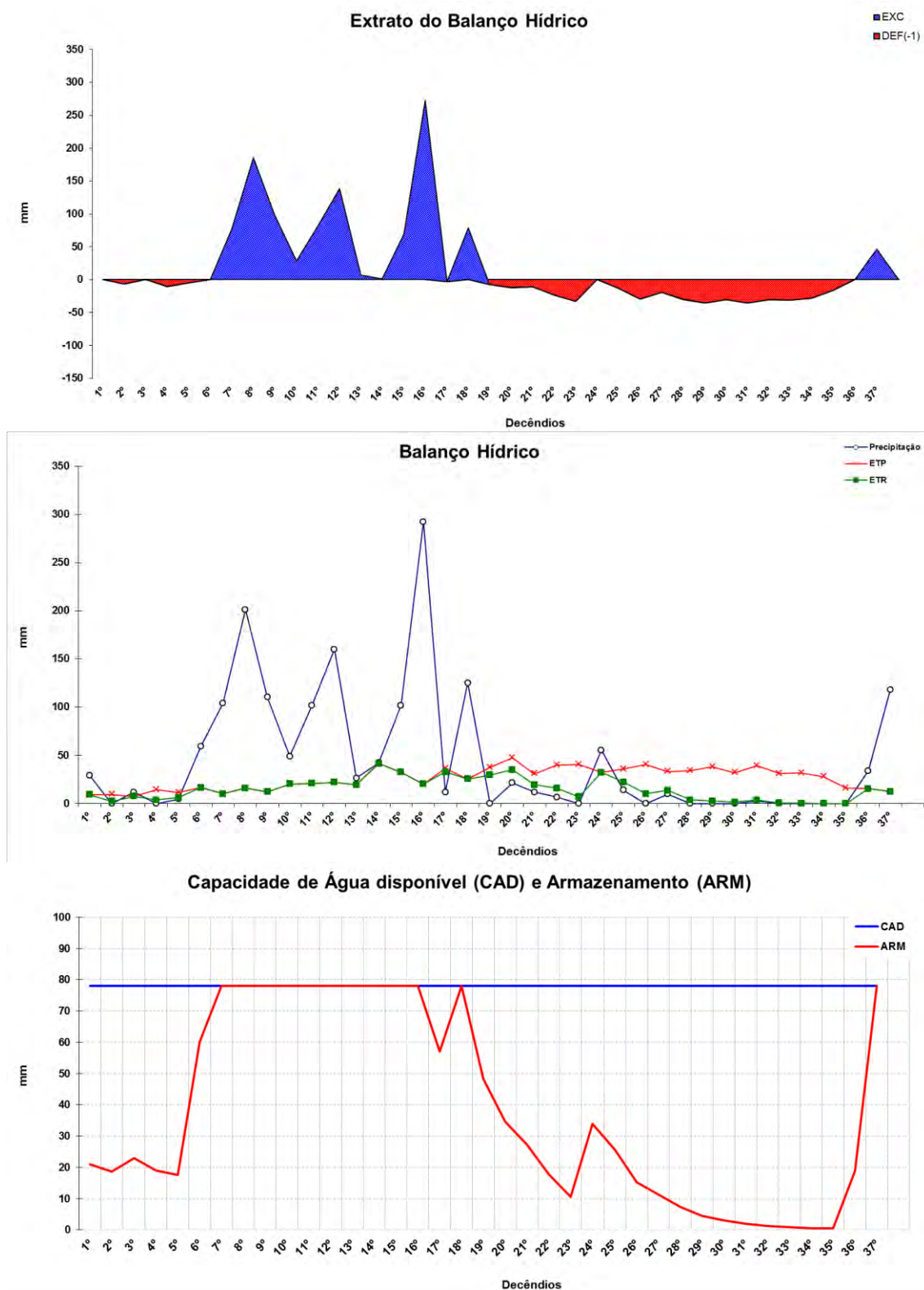


Figura 12 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 12 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

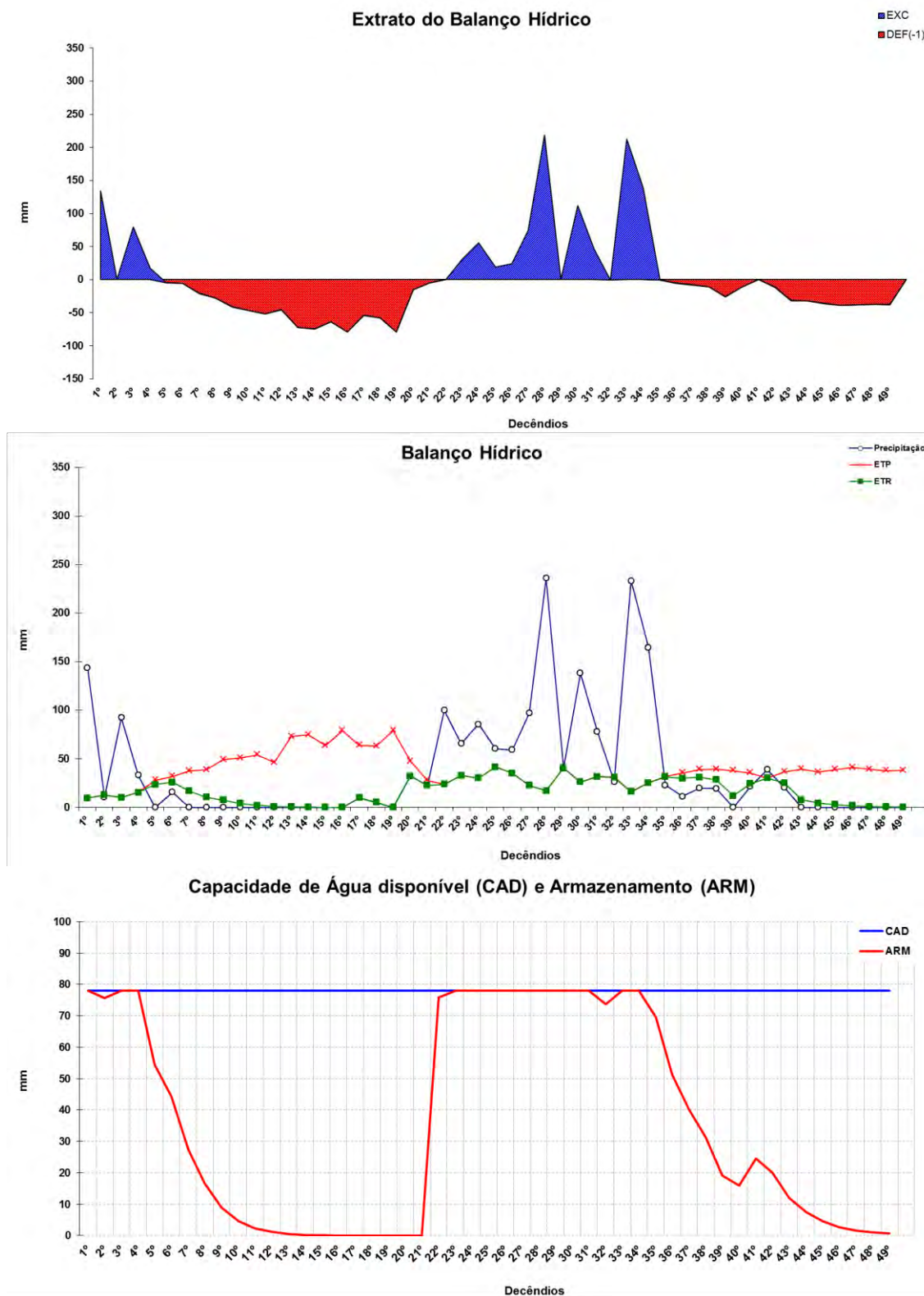


Figura 13 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 13 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE A

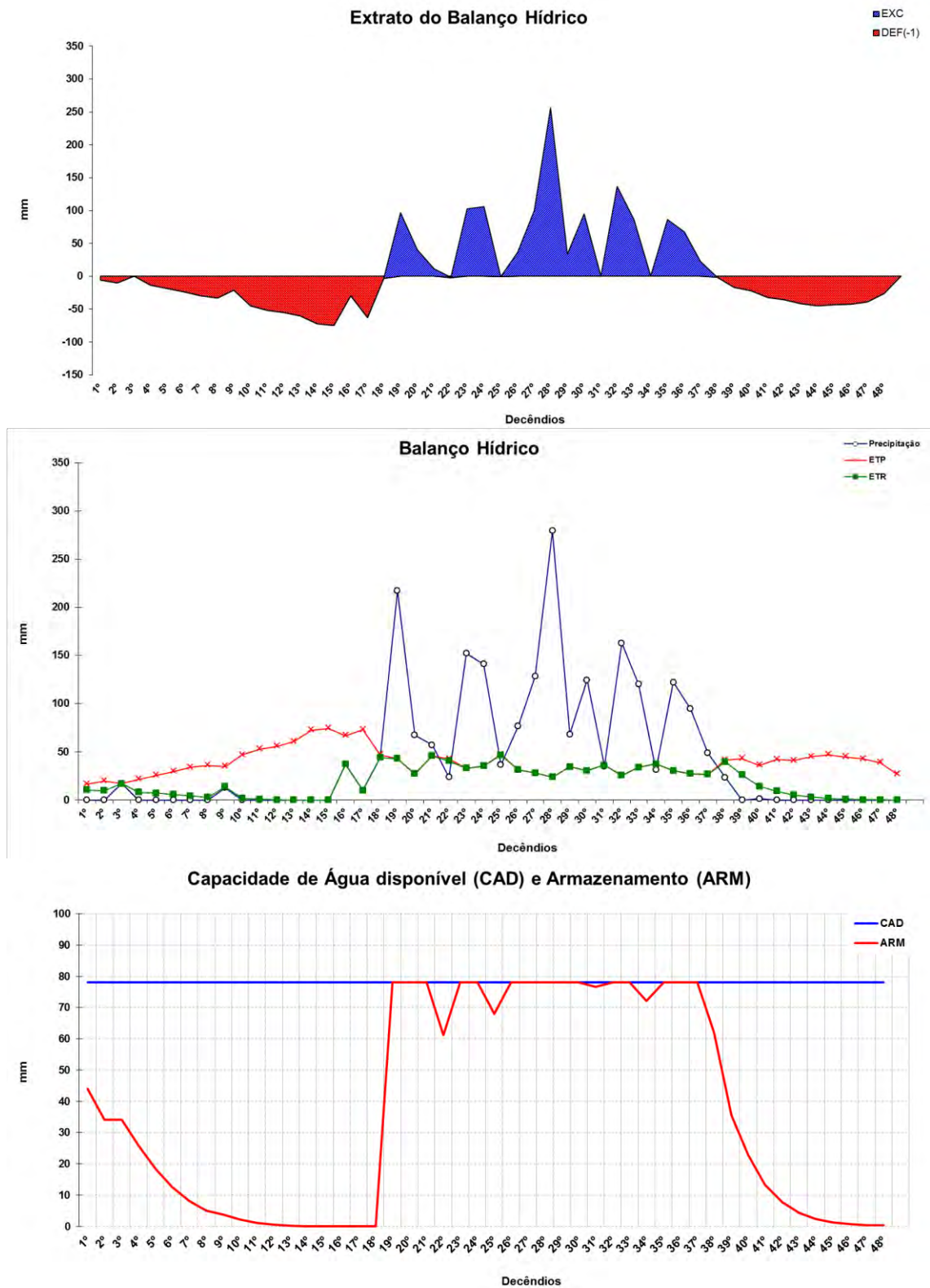


Figura 14 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 14 para o ciclo da cana-planta.

# APÊNDICE A

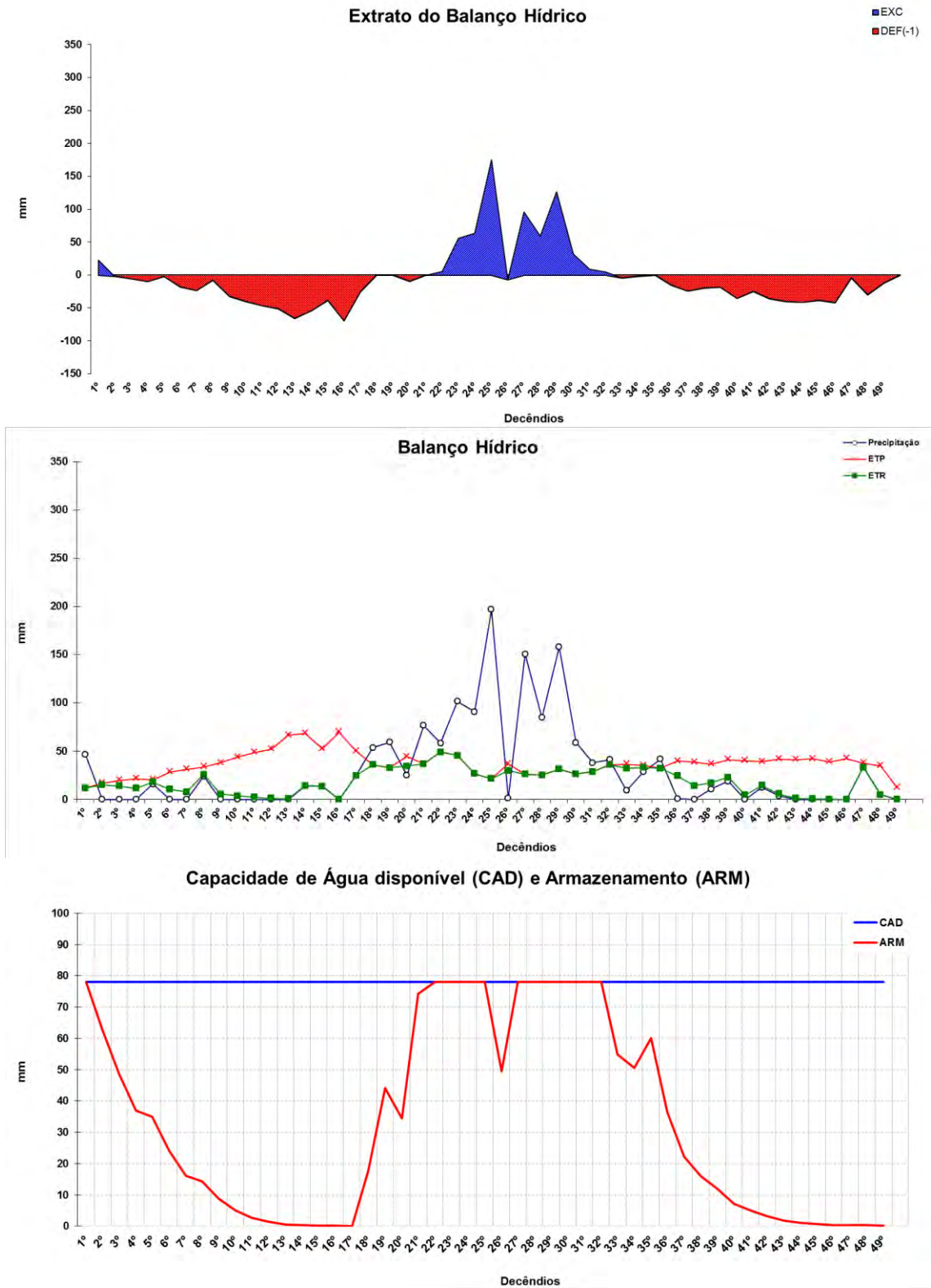


Figura 15 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 15 para o ciclo da cana-planta.

## APÊNDICE B

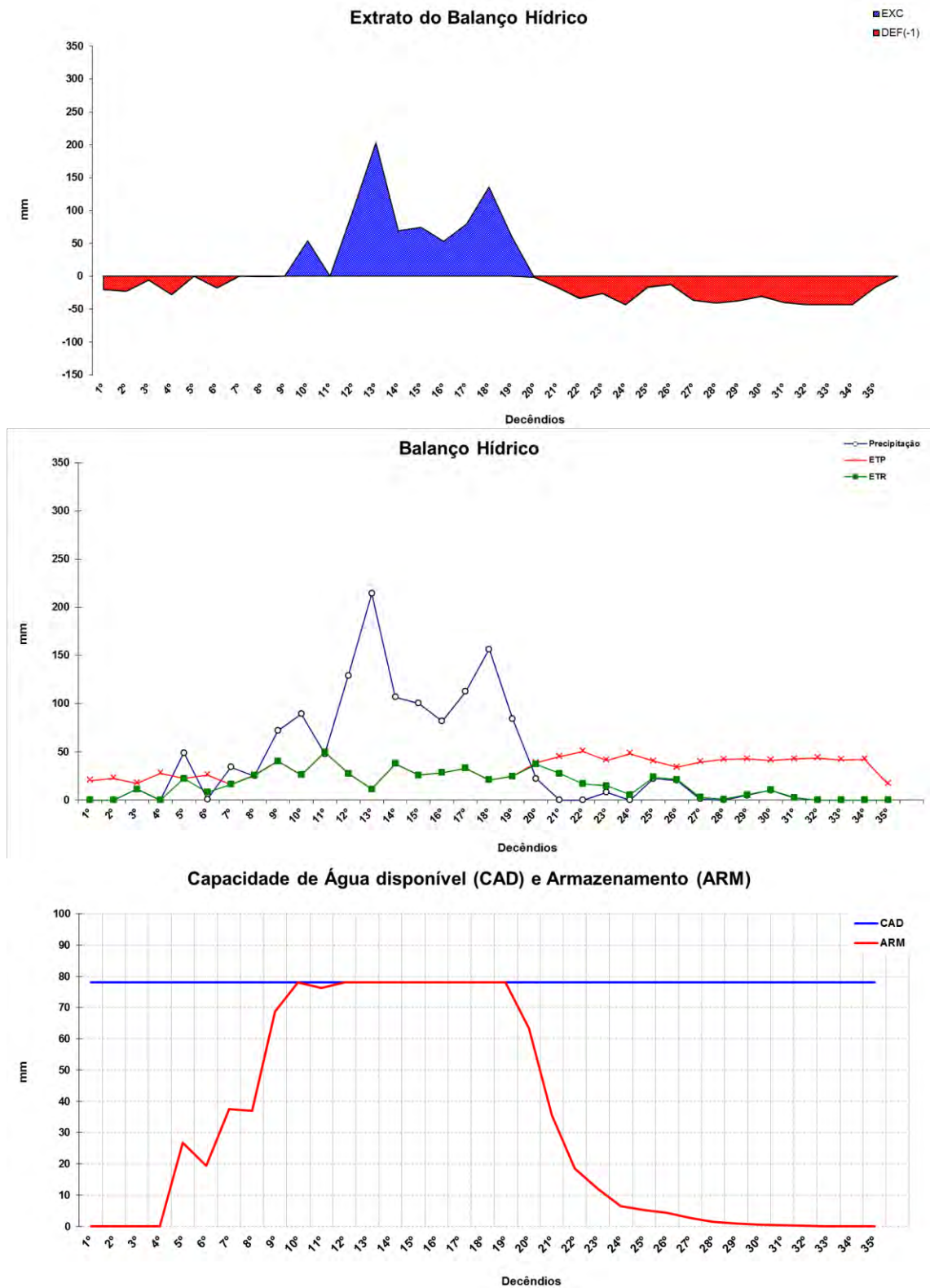


Figura 1 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 16 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

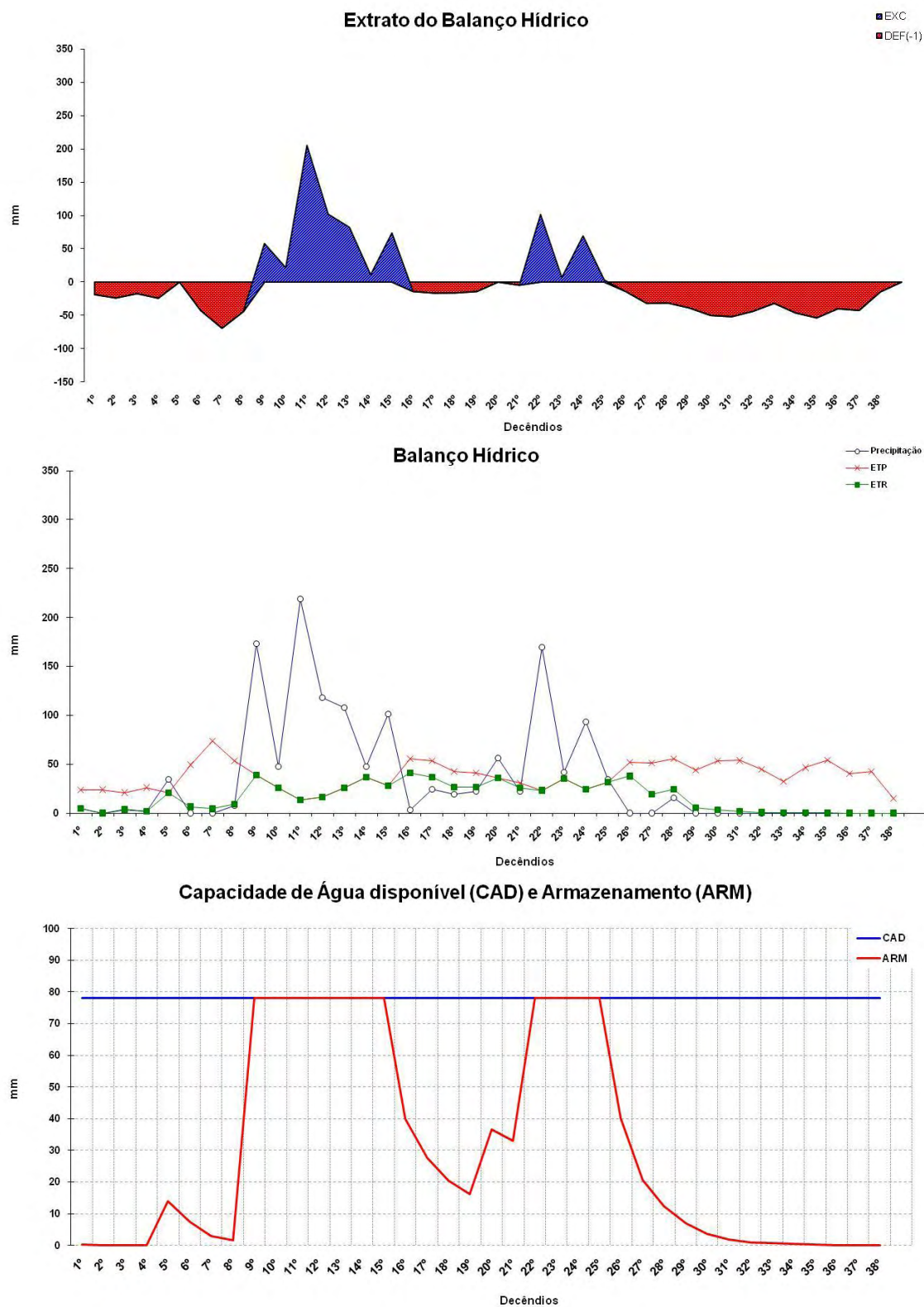


Figura 2 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 17 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

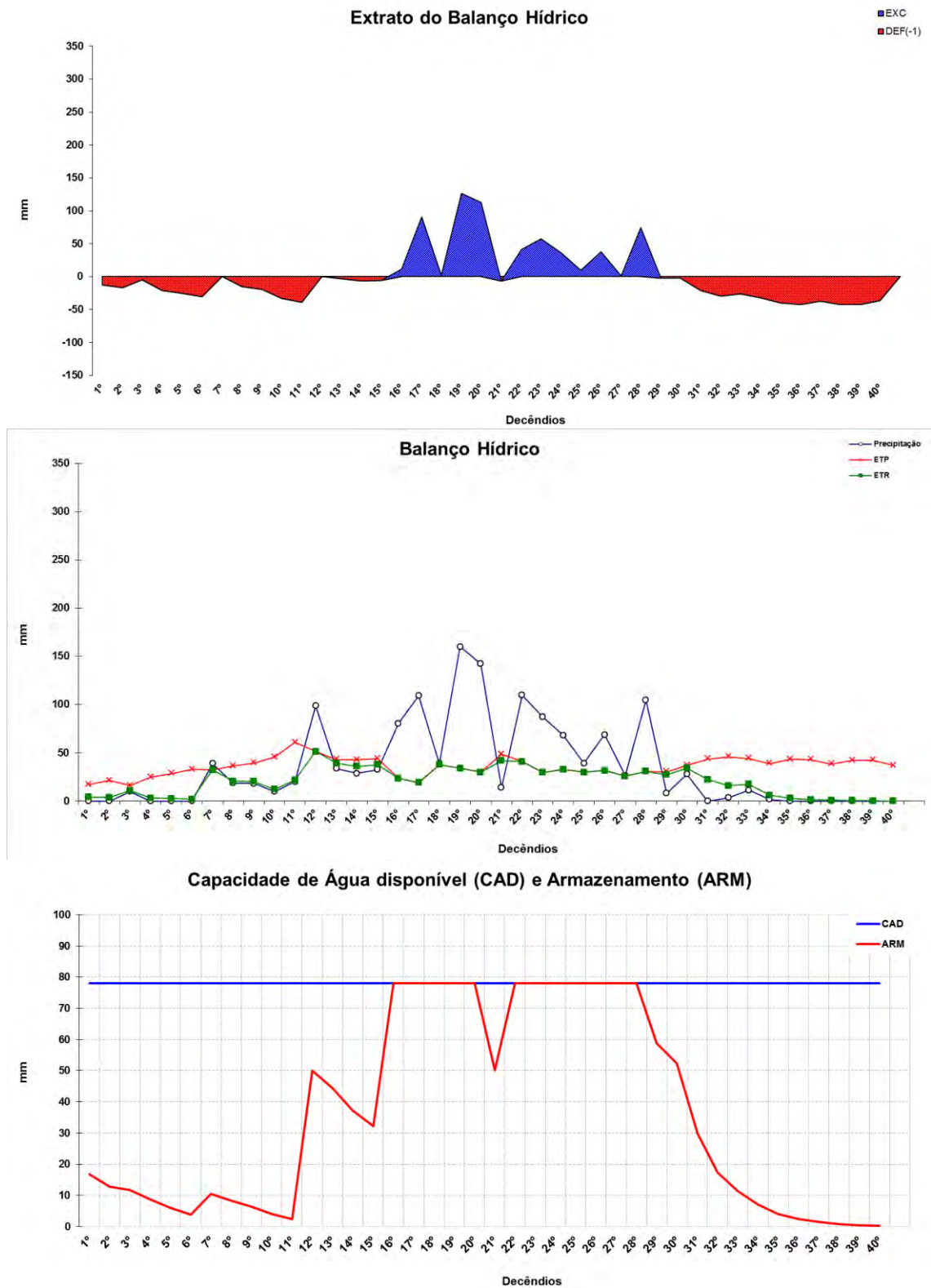


Figura 3 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 18 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

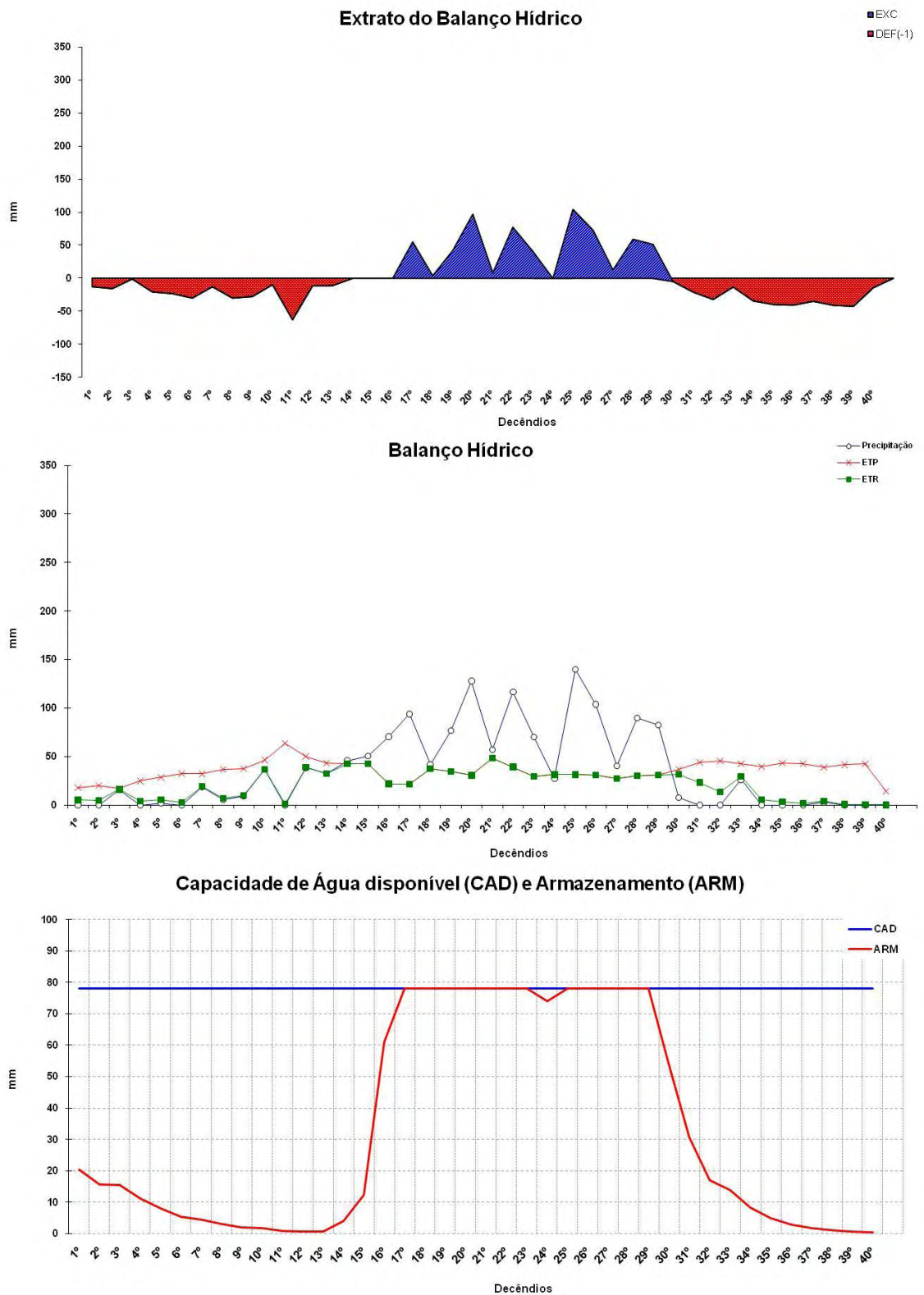


Figura 4 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 19 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

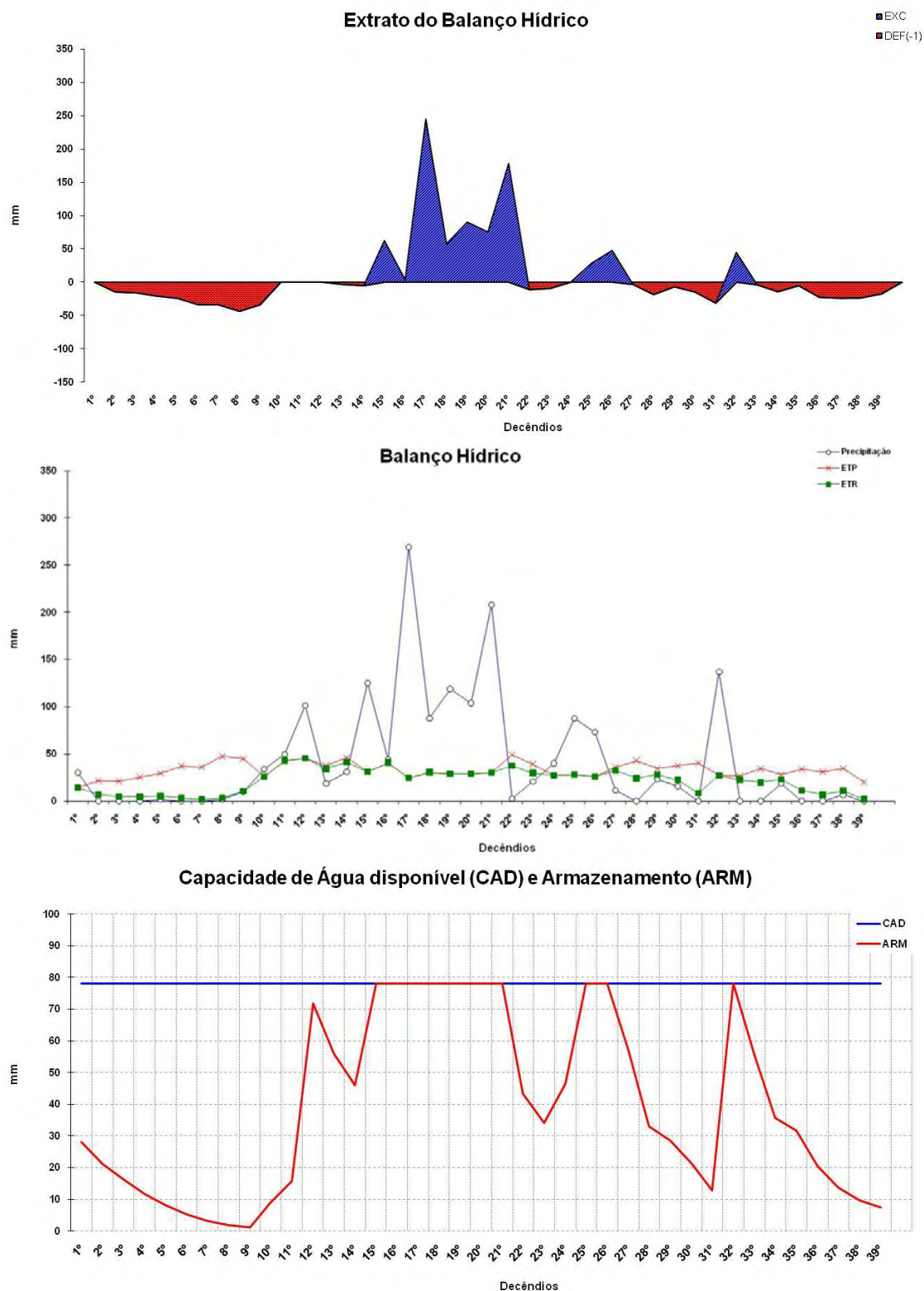


Figura 5 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 20 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

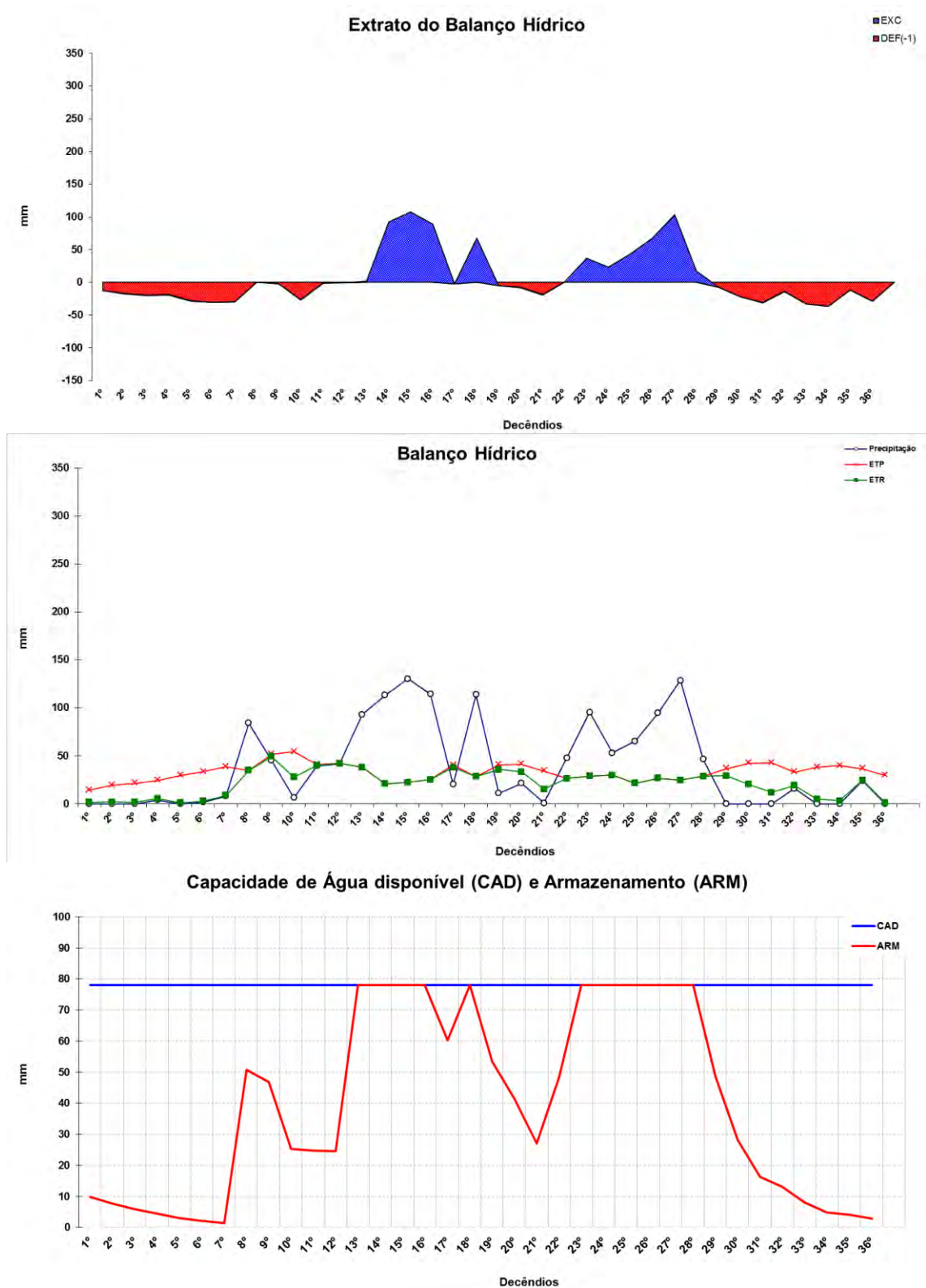


Figura 6 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 21 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

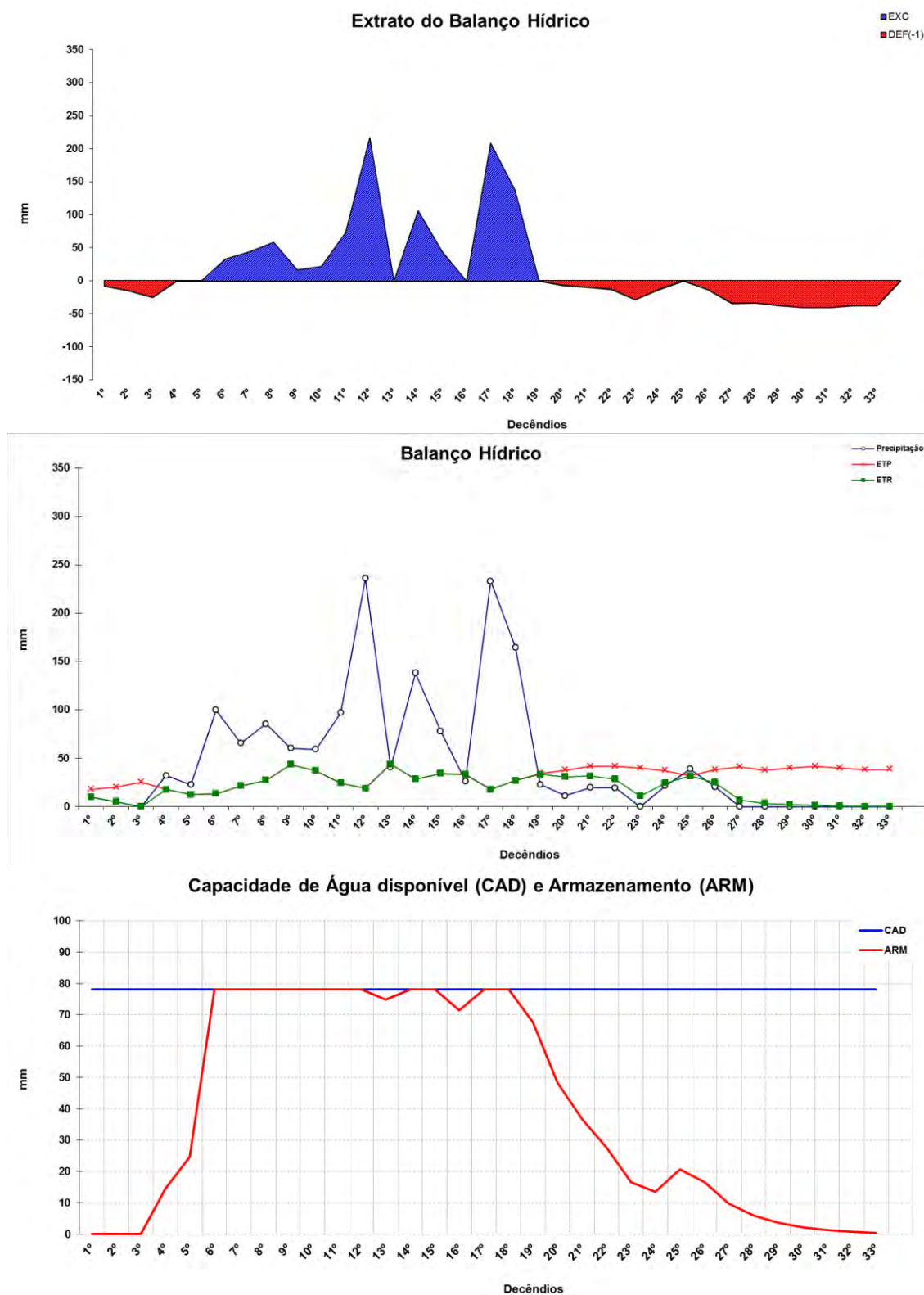


Figura 7 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 22 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

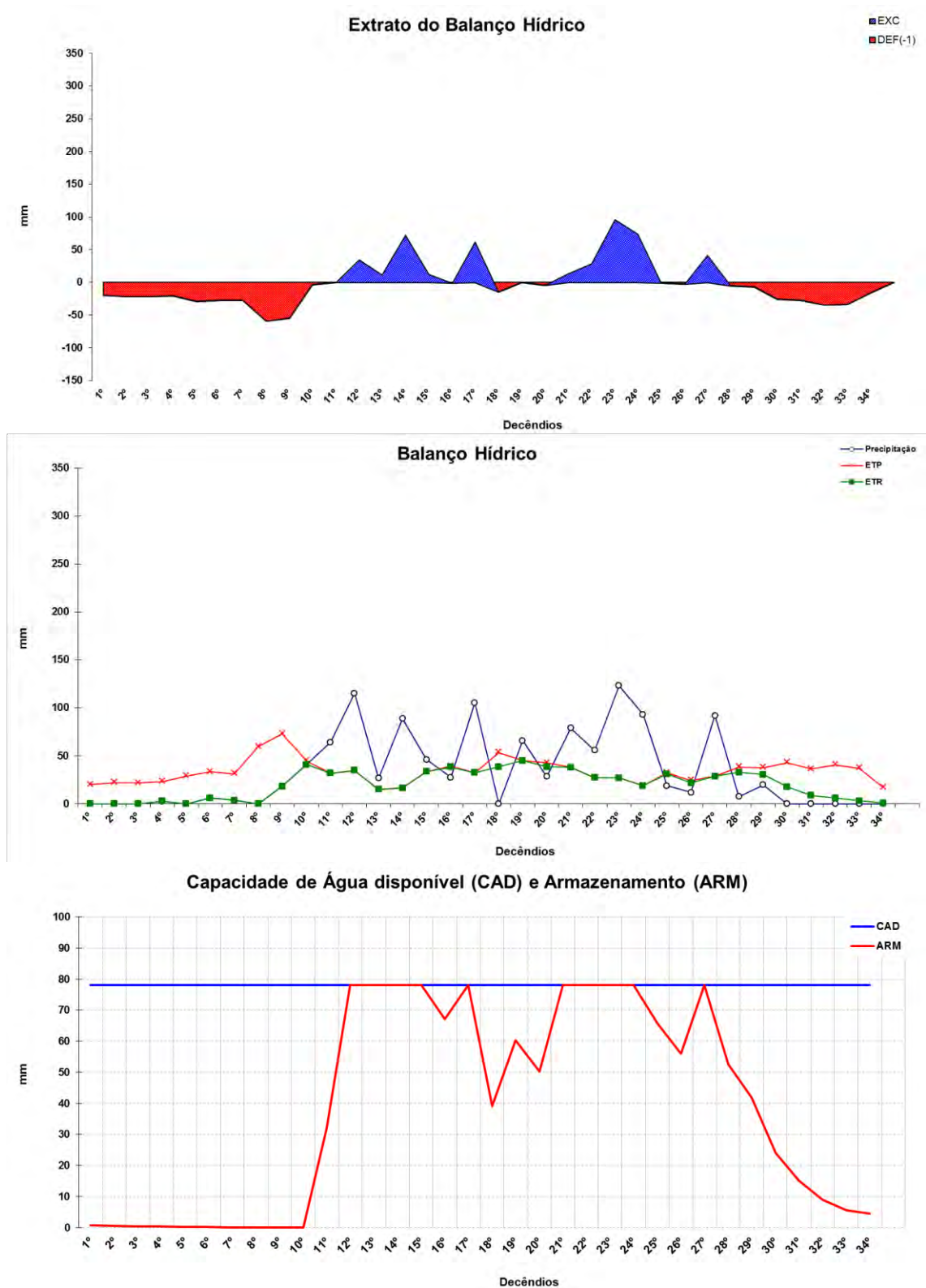


Figura 8 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 23 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

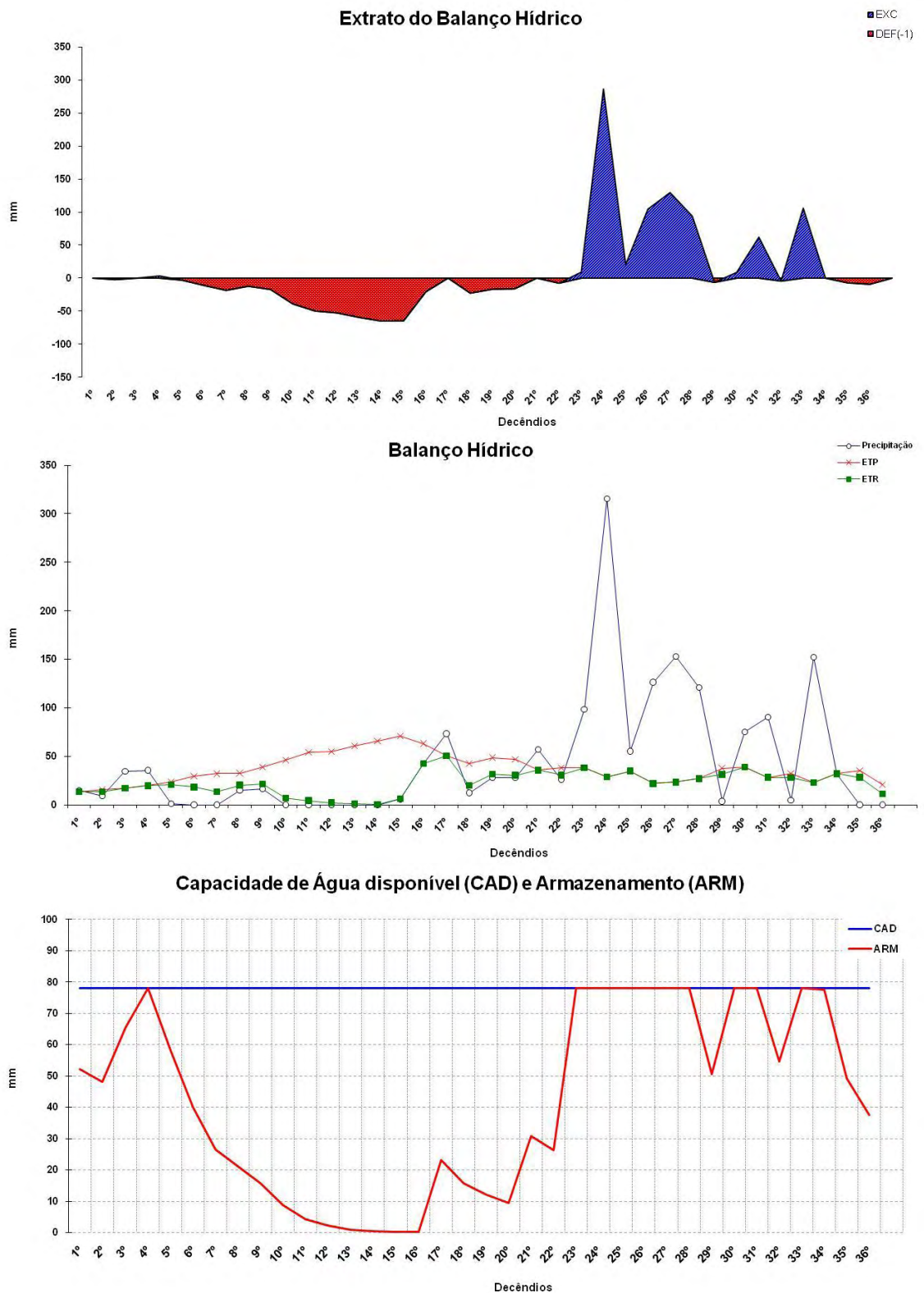


Figura 9 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 24 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

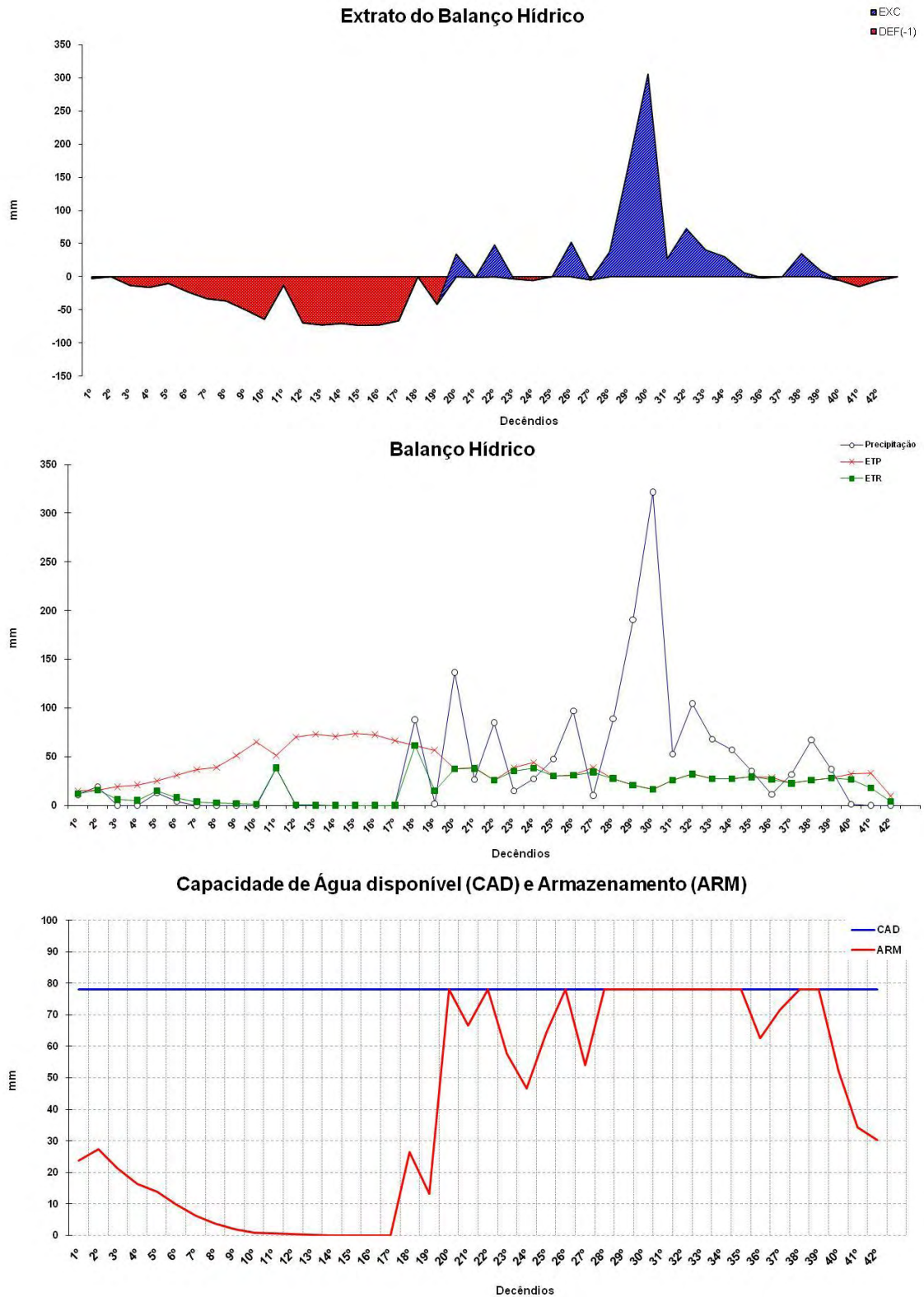


Figura 10 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 25 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

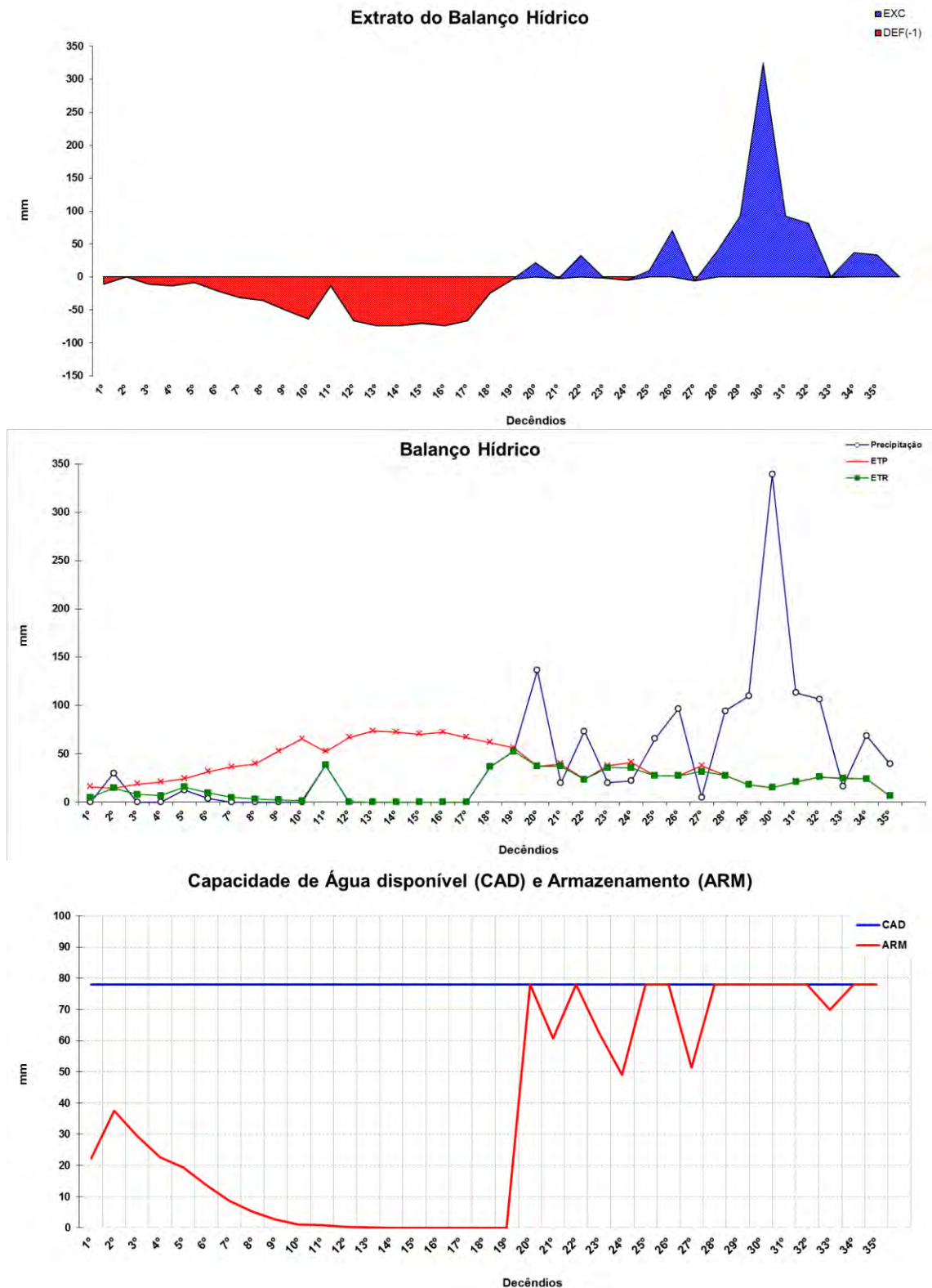


Figura 11 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 26 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

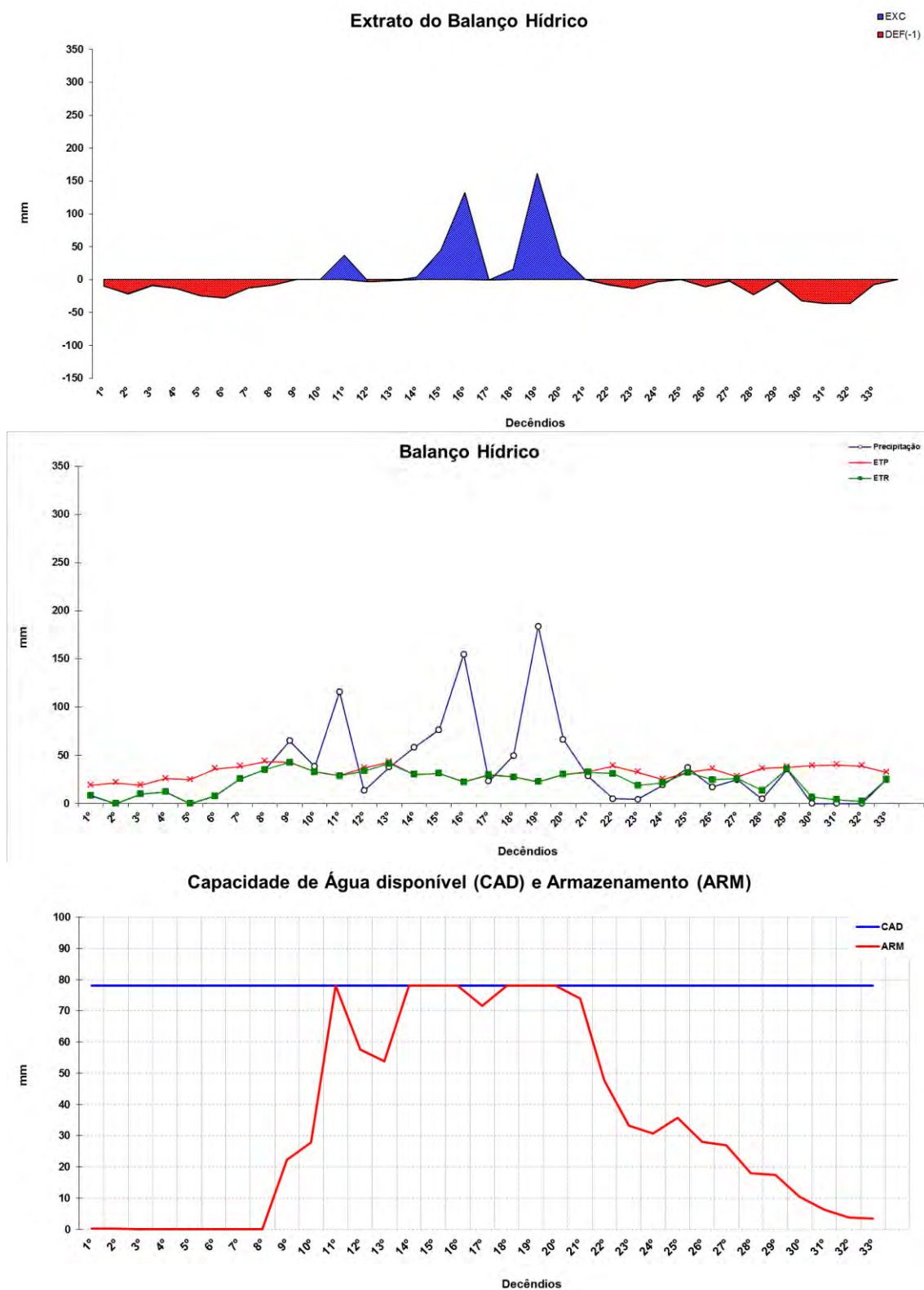


Figura 12 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 27 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

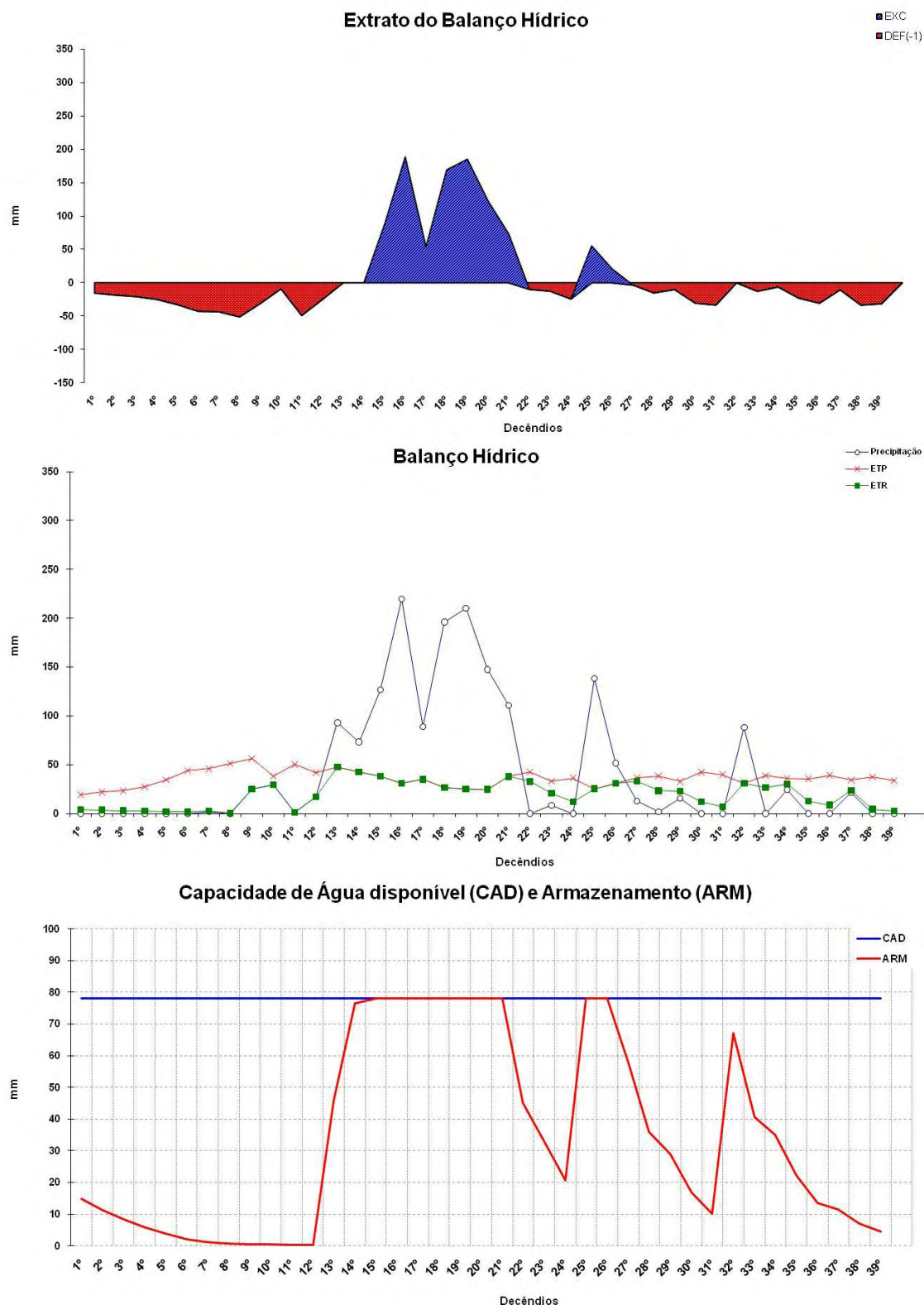


Figura 13 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 28 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

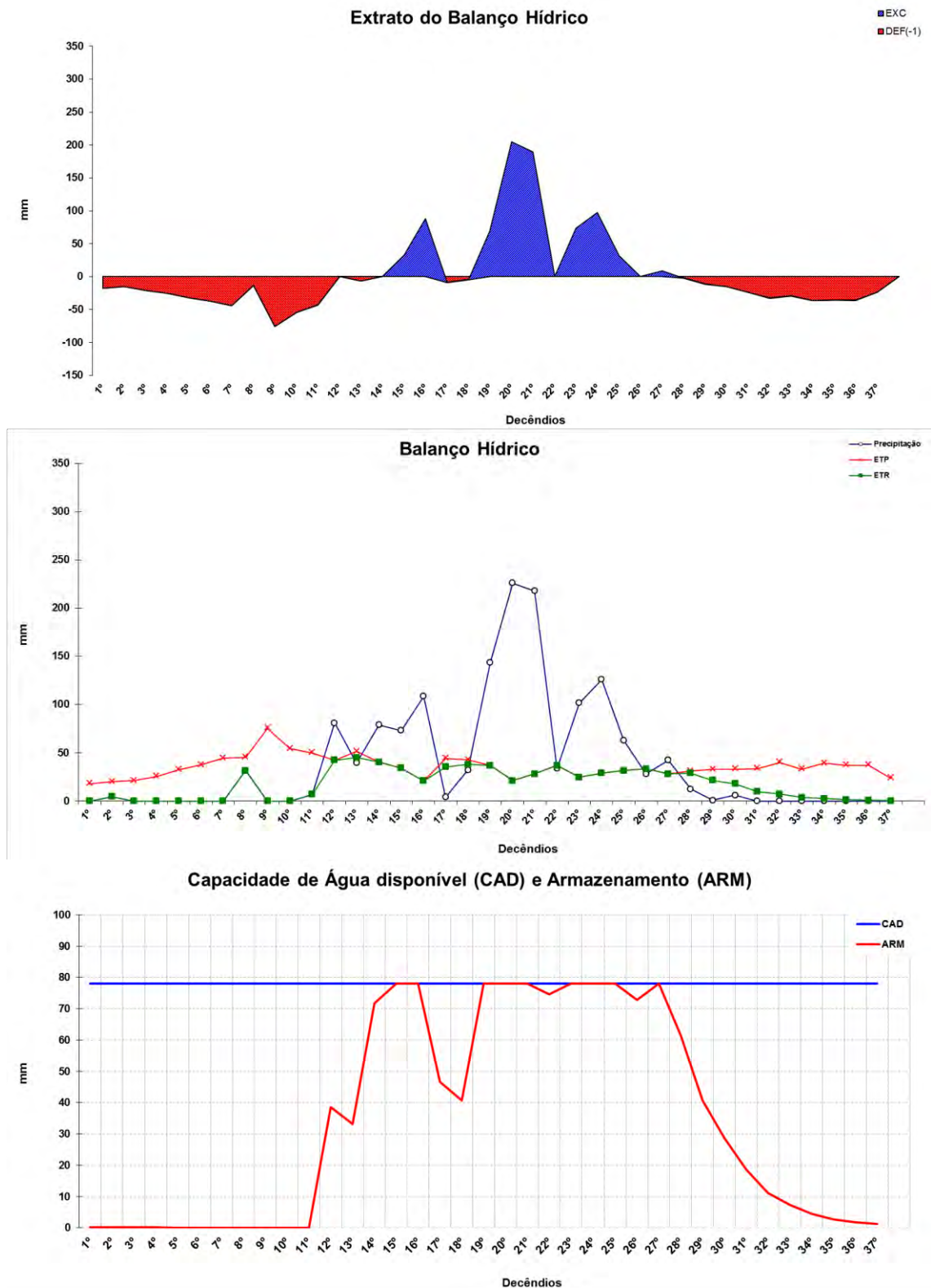


Figura 14 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 29 para o ciclo da primeira cana-soca.

## APÊNDICE B

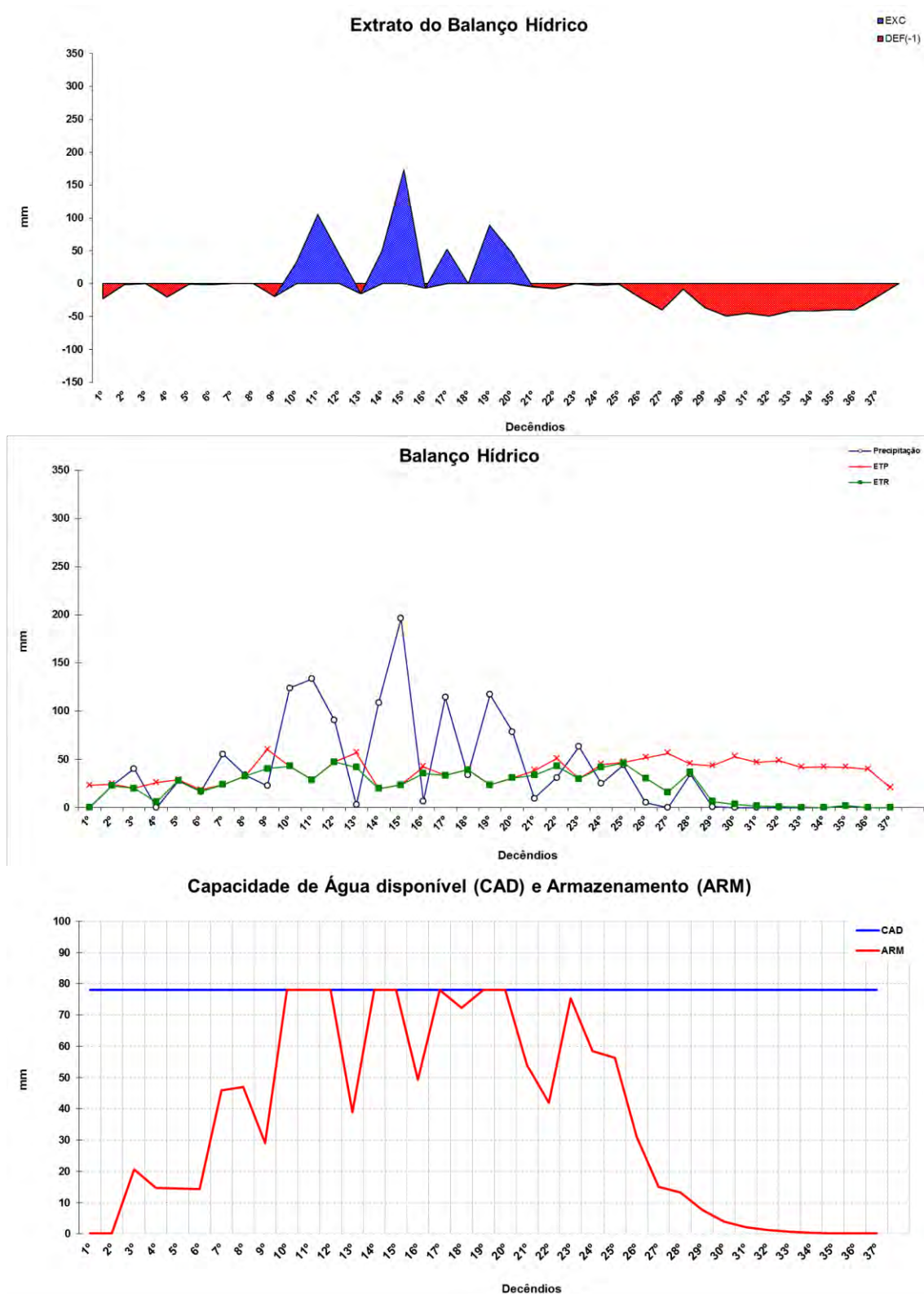


Figura 15 – Representação do balanço hídrico, capacidade de água disponível no solo e armazenamento do experimento 30 para o ciclo da primeira cana-soca.