

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES (PROTEN)

**DINÂMICA DA ÁGUA EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO
CAUPI EM REGIÃO DE BREJO DE ALTITUDE**

BRUNO BASTOS SALES

RECIFE

2007

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

BRUNO BASTOS SALES

**DINÂMICA DA ÁGUA EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO
CAUPI EM REGIÃO DE BREJO DE ALTITUDE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Radioagronomia/Física de Solos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino

CO-ORIENTADOR: Dr. José Romualdo de Sousa Lima

RECIFE

2007

S163d Sales, Bruno Bastos

Dinâmica da água em solo cultivado com feijão caupi em região de Brejo de altitude / Bruno Bastos Sales. – Recife: O Autor, 2007.

85 f.; il. color., mapas, gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN), 2007.

Inclui referências bibliográficas.

1. Energia Nuclear - Radioagronomia. 2. Física de solos. 3. Dinâmica da água. 4. Evapotranspiração. I. Título.

621.48 CDD (22.ed.)

UFPE/BCTG/2007-115

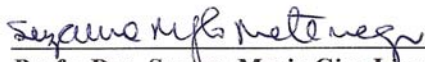
**DINÂMICA DA ÁGUA EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO
CAUPI EM REGIÃO DE BREJO DE ALTITUDE**

Bruno Bastos Sales

APROVADO EM: 17.07.2007

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima**

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Suzana Maria Gico Lima Montenegro – DECIV/UFPE



Prof. Dr. André Maciel Netto – DEN/UFPE



Prof. Dr. Marcus Metri Correa – DTR/UFRPE

Visto e permitida a impressão



Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

"O egoísmo não consiste em vivermos conforme os nossos desejos, mas sim em exigirmos que os outros vivam da mesma forma que nós gostaríamos. O altruísmo em deixarmos todo mundo viver do jeito que bem quiser."

Oscar Wilde

Aos meus pais
Evaldo Sales Costa e
Maria de Fátima Bastos Sales, exemplos de
alta dignidade

Minha homenagem
e minha gratidão

A Rita Butkutê,
elo querido de
afeição, encorajamento e
compreensão.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Antônio Celso Dantas Antonino, por todo o apoio e confiança dados desde os meus primeiros passos no PROTEN, ajudando sempre com paciência, incentivo e cobrança, indispensáveis ao desenvolvimento do trabalho e alcance das metas.

Ao pesquisador, Dr. José Romualdo de Sousa Lima, que foi uma peça fundamental durante todo o desenvolvimento desta dissertação, contribuindo desde a implementação do experimento até a finalização do trabalho.

Ao Professor André Maciel Netto, pelos ensinamentos e debates dentro e fora da sala de aula, sempre passando sua animação pela Física de Solos.

Aos técnicos do laboratório, Antônio e Ricardo, pelo companheirismo e ajuda.

Aos alunos do grupo de física de solos e demais discentes do Departamento de Energia Nuclear pelas horas de estudo em grupo e discussão de conceitos.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho.

DINÂMICA DA ÁGUA EM SOLO CULTIVADO COM FEIJÃO CAUPI EM REGIÃO DE BREJO DE ALTITUDE

Autor: Bruno Bastos Sales

Orientador: Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino

Co-orientador: Dr. José Romualdo de Sousa Lima

RESUMO

Uma boa compreensão da dinâmica da água no solo durante o desenvolvimento de uma cultura é essencial para o aprimoramento de práticas de manejo que visem à otimização da produtividade das culturas. Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a dinâmica da água num solo cultivado com feijão caupi, por meio do método do balanço hídrico, em condições de sequeiro no Brejo Paraibano, em dois períodos distintos do ano: sem (11/03/2003 a 30/05/2003) e com estresse hídrico (28/07/2003 a 22/10/2003). Para a realização do balanço hídrico, foram instalados numa área de 4 ha do CCA/UFPB, Areia-PB, três sítios tensio-neutrônicos contendo em cada um deles um tubo de acesso até a profundidade de 120 cm, para a sonda de nêutrons e oito tensiômetros, nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 e 120 cm. A precipitação pluvial foi medida por um pluviômetro automático instalado numa torre meteorológica no centro da área. Além disso, foram realizados ensaios de infiltração para a determinação da condutividade hidráulica do solo. Os resultados demonstraram que o fluxo de água no solo para a profundidade de 60 cm nos dois períodos de cultivo do feijão caupi, ocorreu unicamente no sentido descendente (drenagem interna), totalizando 50,6 mm e 61,4 mm, para o primeiro e segundo período de cultivo do feijão, respectivamente. Ocorreu uma subestimativa da drenagem interna para o período de cultivo sem estresse hídrico (11/03/2003 a 30/05/2003), principalmente durante os maiores eventos de precipitação pluvial. A evapotranspiração total e média do feijão caupi, cultivado em condições de sequeiro no Brejo Paraibano, foi 290,1 mm e 3,62 mm d⁻¹ e 184,6 mm e 2,14 mm d⁻¹, para os períodos sem e com estresse hídrico, respectivamente. A produção de grãos foi bem maior no período sem estresse (888,5 kg ha⁻¹) que no período com estresse hídrico (205,9 kg ha⁻¹).

Palavras-chave: umidade volumétrica do solo, drenagem, evapotranspiração

WATER DYNAMIC IN THE SOIL CULTIVATED WITH COWPEA IN MOUNTAIN REGION

Author: Bruno Bastos Sales

Adviser: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino

Coadviser: Dr. José Romualdo de Sousa Lima

ABSTRACT

A good understanding of water dynamic in soil during the crop development is essential for improvements in practices aiming the productivity optimization. This way, the current work had the objective to evaluate the water dynamic in the soil cultivated with the cowpea crop growing in the mountain region of Paraiba, Brazil (“Brejo Paraibano”), at two different periods of the year: with no water stress conditions (March 11, 2003 to May 30, 2003) and under water stress (July 28, 2003 to October 22, 2003). To determine the water balance, in a 4 ha area of the CCA/UFPB, Areia-PB, in three plots, a 120 cm access tube for neutron probe measurements, and 8 tensiometers were installed in each plot. Rainfall measurements were made. Infiltration tests were performed for the determination of the soil hydraulic conductivity. The results show that the water flux at 60 cm depth occurred always downward at the cultivated periods, with 50.6 and 61.4 mm for the first (March 11, 2003 to May 30, 2003) and second (July 28, 2003 to October 22, 2003) period, respectively. The total and average actual evapotranspiration of cowpea was 290.1 mm and 3.62 mm d⁻¹ e 184.6 mm e 2.14 mm d⁻¹, for the period without and with water stress, respectively. The crop yield of cowpea was 888.5 and 205.9 kg ha⁻¹, for the period of March 11, 2003 to May 30, 2003 and of July 28, 2003 to October 22, 2003, respectively.

Keywords: soil water content, drainage, evapotranspiration

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa do município de Areia-PB, com a localização da área experimental, mostrando em detalhes os sítios tensio-neutrônicos e a torre meteorológica automatizada. 28
- Figura 2. Sítio tensio-neutrônico instalado na área experimental, mostrando em detalhe oito tensiômetros com manômetro de mercúrio, e o tubo de acesso em alumínio para a sonda de nêutrons. 30
- Figura 3. Esquema mostrando todos os componentes do balanço hídrico do solo. 31
- Figura 4. Evolução da umidade volumétrica do solo e da precipitação pluvial durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003 em Areia-PB. 42
- Figura 5. Evolução da umidade volumétrica do solo dos sítios 1, 2, 3 e da média dos 3 sítios, bem como da precipitação pluvial durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003 em Areia-PB. 45
- Figura 6. Evolução do potencial matricial da água no solo e da precipitação pluvial durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003 em Areia-PB. 46
- Figura 7. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e total da água no solo para os dias 13/03/2003 e 17/03/2003 em Areia-PB. 48
- Figura 8. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e total da água no solo para os dias 11/04/2003 e 17/04/2003 em Areia-PB. 50
- Figura 9. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e total da água no solo para os dias 13/05/2003 e 20/05/2003 em Areia-PB. 52
- Figura 10. Evolução da umidade volumétrica do solo e da precipitação pluvial durante o período de 22/07/2003 a 22/10/2003 em Areia-PB. 54

- Figura 11. Evolução da umidade volumétrica do solo dos sítios 1, 2, 3 e da média dos 3 sítios, bem como da precipitação pluvial durante o período de 22/07/2003 a 22/10/2003 em Areia-PB. 56
- Figura 12. Evolução do potencial matricial da água no solo e da precipitação pluvial durante o período de 22/07/2003 a 22/10/2003 em Areia-PB. 58
- Figura 13. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e total da água no solo para os dias 31/07/2003 e 05/08/2003 em Areia-PB. 60
- Figura 14. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e total da água no solo para os dias 27/08/2003 e 02/09/2003 em Areia-PB. 62
- Figura 15. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e total da água no solo para os dias 12/09/2003 e 18/09/2003 em Areia-PB. 64
- Figura 16. Curva de retenção de água no solo para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, em Areia-PB. 66
- Figura 17. Curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica do solo para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm em Areia-PB. 67
- Figura 18. Evolução da drenagem profunda e da precipitação pluvial num solo cultivado com feijão caupi em Areia-PB, durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 (A) e de 28/07/2003 a 22/10/2003 (B). 69
- Figura 19. Componentes do balanço hídrico num solo cultivado com feijão caupi em Areia-PB, durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 (A) e de 28/07/2003 a 22/10/2003 (B). 71
- Figura 20. Valores acumulados de precipitação pluvial, evapotranspiração de referência (ET_o) e real (ET) durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 (A) e de 28/07/2003 a 22/10/2003 (B) em Areia-PB 74

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Análise granulométrica, classificação textural e densidade do solo (ρ) da área experimental. 29
- Tabela 2. Valores dos parâmetros da curva de retenção da água no solo $h(\theta)$ e da condutividade hidráulica saturada (K_s) para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm. 66
- Tabela 3. Componentes do balanço hídrico durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003. 72
- Tabela 4. Componentes do balanço hídrico durante o período de 28/07/2003 a 22/10/2003. 72
- Tabela 5. Produção e eficiência do uso de água do feijão caupi durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003. 75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A_L	Armazenamento acumulado de água no perfil de solo	mm
a	Constante numérica	—
b	Constante numérica	—
c	Constante numérica	—
c_p	Calor específico do ar em pressão constante	$J\ kg^{-1}\ C^{-1}$
D	Drenagem	mm
D_f	Dimensão fractal do solo	—
D_g	Parâmetro de escala do tamanho das partículas	mm
D_p	Diâmetro das partículas	mm
E	Dimensão de Euclides	3
e_a	Pressão atual de vapor	kPa
ET	Evapotranspiração	mm
ET_m	Evapotranspiração máxima	mm
ET_{BH}	Evapotranspiração obtida pelo método do balanço hídrico	mm
ET_o	Evapotranspiração de referência	mm
EUA	Eficiência do uso de água	$Kg\ m^{-3}$
$F(D)$	Distribuição do tamanho das partículas	—
G	Fluxo de calor no solo	$W\ m^{-2}$
H	Potencial total	m
h	Potencial matricial	m
h_c	Altura da cultura	m
h_g	Potencial de entrada de ar	m
I	Irrigação	mm
k	Constante de von Karman (0,41)	-
$K(\theta)$	Condutividade hidráulica não saturada	$mm\ dia^{-1}$
K_s	Condutividade hidráulica saturada	$mm\ dia^{-1}$
M	Parâmetro de forma da curva de $F(D)$	—
m	Parâmetro de ajuste da equação de van Genuchten	—
N	Parâmetro de forma da curva de $F(D)$	—
n	Parâmetro de ajuste da equação de van Genuchten	—
P	Precipitação pluviométrica	mm

$p(m)$	Índice de forma do meio	—
q	Fluxo vertical de água em um solo	mm dia^{-1}
$q(t)$	Taxa de infiltração	mm dia^{-1}
R	Escoamento superficial	mm
r	Raio do infiltrômetro	m
R_n	Radiação líquida	W m^{-2}
r_a	Resistência aerodinâmica	s m^{-1}
S	Sorvidade	$\text{mm dia}^{-1/2}$
S_{MAX}	Sorvidade Máxima	$\text{mm dia}^{-1/2}$
s	Dimensão fractal relativa	—
T	Temperatura do ar	$^{\circ}\text{C}$
T_{md}	Temperatura média diária	$^{\circ}\text{C}$
t	Tempo	s
t_{grav}	Tempo gravimétrico	s
u	Velocidade do vento	m s^{-1}
W	Ascensão capilar	mm
z_0	Comprimento de rugosidade	m
z_h	Altura de medição da umidade relativa	m
z_m	Altura de medição da velocidade do vento	m
z_{0h}	Comprimento de rugosidade para calor	m
z_{0m}	Comprimento de rugosidade para momentum	m
β	Razão de Bowen	—
η	Parâmetro de forma	—
κ	Coefficiente de Fuentes	—
γ	Constante psicrométrica	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
Γ	Função Gama clássica	—
Δ	Inclinação da curva de pressão de saturação de vapor	$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$
ΔA	Varição do armazenamento de água no solo	mm
θ	Umidade volumétrica	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
θ_s	Umidade volumétrica saturada do solo	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
ϕ	Porosidade total do solo	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
ρ	Densidade do solo	g cm^{-3}
∇H	Gradiente de potencial total	—

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Dinâmica da água no solo	18
2.2 Balanço Hídrico	19
2.2.1 Armazenamento de água no solo	21
2.2.2 Precipitação	22
2.2.3 Fluxo de água no limite inferior do solo	23
2.2.4 Escoamento superficial	25
2.2.5 Evapotranspiração	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Localização, clima e solo da área experimental	28
3.2 Balanço Hídrico	29
3.2.1 Período de medição e instrumentação	29
3.2.2 Componentes do balanço hídrico	30
3.2.3 Curvas de retenção e condutividade hidráulica do solo	32
3.2.3.1 Determinação dos parâmetros de forma	33
3.2.3.2 Determinação dos parâmetros de escala	35
3.3 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET _o)	38
3.4 Determinações realizadas na cultura do feijão caupi	40
3.4.1 Plantio, tratos culturais e colheita	40
3.4.2 Produção dos grãos	40
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Umidade volumétrica, potenciais matricial e total da água no solo no período de 11/03/2003 a 30/05/2003	41
4.2 Umidade volumétrica, potenciais matricial e total da água no solo no período de 22/07/2003 a 22/10/2003	53
4.3 Curvas de retenção, $h(\theta)$, e de condutividade hidráulica do solo, $K(\theta)$	65
4.4 Avaliação dos componentes do balanço hídrico durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003	68
4.4.1 Evolução do fluxo de água no solo	68
4.4.2 Balanço Hídrico	70

4.5 Evapotranspiração de referência (ET _o) durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003	73
4.6 Produção e eficiência do uso de água do feijão caupi durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003	75
5 CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

A agricultura, principalmente a de sequeiro, é uma atividade que possui riscos econômicos e ambientais relativamente altos, associados aos vários fatores inerentes à planta, ao solo, ao clima e à economia. A disponibilidade hídrica é um dos fatores que mais contribuem para esses riscos, principalmente na região Nordeste do Brasil, devido a irregularidade na distribuição temporal e espacial das chuvas, que condiciona a frequência e a intensidade de períodos de déficit hídrico.

O Agreste nordestino, por ser marcadamente uma região de transição climática, possui áreas, onde há maior umidade do ar, conhecidas como brejos de altitude. Essas áreas são formações com microclima diferenciado, onde, por efeito orográfico, a pluviosidade é bastante superior à do entorno. Por estarem inseridos no Sertão, os brejos de altitude funcionam como verdadeiras “ilhas” produtivas para regiões vizinhas (Coutinho, 1986). Pelas suas características, essas áreas são bastante procuradas e como consequência tem-se o conflito de uso, onde a agricultura disputa espaço com a vegetação nativa, comprometendo a qualidade e quantidade dos recursos hídricos, além de acrescentar o risco de degradação ambiental.

Dentre as diversas culturas, o feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), ou macassar, destaca-se como uma das mais cultivadas na região Nordeste, sendo considerada a principal cultura de subsistência das populações da zona rural. Além do papel fundamental na atividade econômica dessa população, o feijão caupi é o alimento básico das populações mais pobres, exercendo função social no suprimento das necessidades nutricionais (Cordeiro et al., 1998). Entretanto, a produtividade obtida com o seu cultivo ainda é extremamente baixa, geralmente inferior a 300 kg ha^{-1} (IBGE, 2002).

A alta sensibilidade do feijoeiro tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água no solo, aliada às incertezas climáticas, principalmente as relacionadas com as variações pluviométricas, determinam esses baixos rendimentos e a oscilação da produção anual dessa cultura.

O conhecimento da demanda hídrica de uma cultura, baseando-se nas quantidades e disponibilidades hídricas de diferentes regiões agroclimáticas, é de grande importância para um correto planejamento agrícola, tornando possível a regionalização do seu cultivo e a diminuição dos riscos, de modo a propiciar condições para a obtenção de elevados rendimentos.

O balanço hídrico é um dos métodos utilizados para estimar essa demanda hídrica para os diferentes estágios de desenvolvimento das culturas. Por intermédio da equação geral de

conservação de massa, é possível quantificar a água que entra e sai em um volume de solo durante um determinado período de tempo.

O balanço hídrico pode ser determinado tanto experimentalmente em campo, utilizando medidas diretas de todos os seus componentes, quanto numericamente, por meio de simulações com modelos computacionais baseados em equações diferenciais discretizadas.

Devido à importância da cultura do feijão caupi no cenário agrícola nordestino, qualquer refinamento da prática agrícola que proporcione um custo/benefício adequado é relevante tanto do ponto de vista prático, como científico.

Assim, o objetivo desse trabalho foi fazer um estudo da dinâmica da água em solo cultivado com feijão caupi no município de Areia, localizado no Brejo Paraibano, analisando os componentes do balanço hídrico desta cultura em dois períodos pluviométricos distintos e comparando as produções de grãos, nos casos sem e com estresse hídrico.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Dinâmica da água no solo

A água é uma das substâncias mais importantes da crosta terrestre, participando em processos físico-químicos e biológicos em todo o planeta. De toda a água da Terra, apenas 2,5% é doce e, nesse percentual, apenas 0,3% está prontamente disponível ao homem em lagos e rios. Além disso, 65% da água utilizada pelo homem é destinado a atividades agrícolas, o que evidencia a importância de se compreender o ciclo da água para poder usar de forma mais sustentável esse recurso (Stikker, 1998).

A água no sistema solo-planta-atmosfera, tem papel fundamental por ser a substância que, com maior frequência, determina os níveis de rendimento das culturas. O movimento da água no solo é um processo contínuo, responsável pelo controle da dinâmica dos elementos químicos que interferem na formação e evolução dos solos, na disponibilidade de nutrientes para as plantas e no atendimento da demanda hídrica (Netto, 1994).

Para o entendimento da dinâmica da água no solo, é de fundamental importância o conhecimento da umidade volumétrica, dos potenciais da água do solo e da condutividade hidráulica no solo. A umidade volumétrica do solo é um índice que quantifica o quanto o solo possui de água, enquanto que os potenciais da água indicam os diferentes tipos de energia potencial que atuam no sistema e podem indicar como a água se encontra no solo, se parada ou em movimento (Libardi, 1995).

O conhecimento detalhado da dinâmica da água durante o desenvolvimento de uma cultura fornece elementos essenciais ao estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola que visam à otimização da produtividade (Reichardt et al., 1979). Estes mesmos autores concluíram que o estabelecimento de um balanço hídrico pode fornecer informações úteis para o manejo correto de diferentes culturas em diferentes solos.

Uma boa compreensão da dinâmica da água no solo é essencial para o estudo de solos cultivados, pois além da relação direta com a eficiência da produção, é imprescindível para uma melhor gestão dos recursos hídricos na exploração agrícola desses solos (Cruz et al., 2005a). Por tudo isso, uma grande importância deve ser dada na caracterização dos fatores constituintes do transporte de água no solo.

A água dentro do solo move-se sempre que existir diferença de potencial total entre dois pontos, condicionada por um escoamento que busca o menor estado de energia. O movimento cíclico da água em um solo cultivado começa com a sua penetração no solo por meio da infiltração, continua com seu armazenamento temporário na zona do sistema

radicular e termina com sua remoção do solo por meio da drenagem, da evaporação e da absorção pelas raízes das plantas (Reichardt, 1996).

Como é preciso determinar as necessidades hídricas das culturas antes de se estabelecer o modelo de exploração agrícola, e como são difíceis e trabalhosos os procedimentos utilizados na avaliação direta do aproveitamento da água pelas culturas do campo, foram desenvolvidos diversos métodos para estimar essas necessidades. A maioria deles tem como resultado a estimativa da evapotranspiração. Porém, estes métodos são freqüentemente aplicados em condições agronômicas e ambientais diferentes das que foram concebidos, sendo necessárias calibrações (Doorenbos e Pruitt, 1977).

O movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera envolve processos como infiltração, redistribuição, drenagem, absorção pelas plantas e evapotranspiração. Esses vários processos na dinâmica da água são interdependentes e, na maioria das vezes, simultâneos (Reichardt, 1996), os quais podem ser medidos ou estimados por métodos classificados em: métodos diretos, baseados no balanço hídrico, métodos baseados na lei de Darcy e métodos de traçadores (Kinzelbach, 2002).

A escolha do método utilizado depende, em princípio, dos objetivos a serem atingidos, que estão diretamente relacionados com o nível de exigência, no que se refere à precisão dos resultados, à dimensão do sistema solo-planta-atmosfera envolvido e às características hidrogeológicas locais (Barreto, 2006).

O estudo desses processos utilizando o método do balanço hídrico tem sido muito utilizado (Rose e Stern, 1967; Pereira et al., 1974; Reichardt et al., 1979; Libardi e Saad, 1994; Cintra et al., 2000; Antonino et al., 2000; Lima et al., 2006), sobretudo pela sua simplicidade e eficiência na estimativa da evapotranspiração de uma cultura (Cruz et al, 2005b).

2.2 Balanço Hídrico

O método do balanço hídrico pode ser utilizado para medir, ou estimar, as variáveis relacionadas aos processos do ciclo hidrológico. O balanço hídrico nada mais é que a variação de água acumulada ao se fazer o somatório das entradas e saídas de água num elemento de volume de solo num dado intervalo de tempo (Reichardt, 1996). O uso de uma equação de balanço hídrico é teoricamente precisa, pois está alicerçada no princípio de conservação de massa, e está intimamente ligada ao balanço energético, pois seus processos requerem energia (Beltrame, 2002).

O balanço hídrico de um solo cultivado é efetuado ao se computar as entradas de água no solo via escoamento superficial, precipitação e irrigação, e as saídas, via escoamento superficial, evapotranspiração e drenagem, em um volume de solo, em determinado período de tempo. Se a quantidade de água que entra, no tempo considerado, for maior que a quantidade que sai durante o mesmo período, o saldo será positivo e, em caso contrário, negativo. Tanto o saldo positivo quanto o negativo serão medidos pela variação de armazenamento de água no perfil do solo no período considerado (Libardi, 2000).

A importância desse método como ferramenta para avaliar a intensidade das saídas e entradas de água no solo e, conseqüentemente, na definição dos períodos mais prováveis de déficit hídrico para a cultura, está relacionada não só ao conhecimento dos fatores que o compõem, como também ao conhecimento das características da planta, principalmente da sua fenologia, que representa o ponto de partida para a interpretação coerente dos resultados do balanço (Cintra et al., 2000).

Na escala local, o balanço hídrico permite estabelecer a variação de armazenamento de água no solo e, portanto, a quantidade disponível para a cultura, em um intervalo de tempo, permitindo assim avaliar os déficits hídricos ou excessos (Sentelhas e Angelocci, 2005).

O balanço hídrico pode ser realizado por meio de medidas diretas no campo ou por modelos. Os modelos muitas vezes são empregados em situações e para finalidades diferentes daquelas em que foram desenvolvidos, o que pode levar a erros, que são de maior ou menor magnitude dependendo do uso ao qual se destina o balanço. Entretanto, a substituição de balanços hídricos de campo por simulações que se utilizam de dados meteorológicos em conjunto com características hídricas do solo, poupa trabalho e permite sua transferência para outras situações similares (Souza et al., 2002; Faria e Chibana, 2003). Logo, cada termo da equação é medido, ou estimado, individualmente para se obter valores mais confiáveis e precisos. O grau de complexidade na medição de cada termo varia bastante, por isso no estabelecimento do balanço, são feitas simplificações e alguns componentes são tomados como desprezíveis para a facilidade de cálculo (Pereira et al., 2002).

Um grande problema no uso do método do balanço hídrico é a variabilidade espacial dos seus componentes: armazenamento de água no solo, condutividade hidráulica e gradientes de potencial total (Lima, 2004). Villagra et al. (1995) ao analisarem a influência dessa variabilidade na estimativa da evapotranspiração, constataram erros de até 40%.

Apesar dessa dificuldade, por ser um método simples e barato, principalmente quando comparado com métodos micrometeorológicos, o balanço hídrico vem sendo utilizado em estudos de culturas como alfafa (Rassini, 2002), feijão (Bernardo et al., 1996; Klar e

Fernandes, 1997; Calvache et al., 1998; Antonino et al., 2000; Medeiros et al., 2001; Lima, 2004; Lima et al., 2006), manga (Silva et al., 2001; Azevedo et al., 2003), milho (Oliveira et al., 1993) e uva (Trambouze et al., 1998; Ávila Netto et al., 2000). Dentre outras culturas, também se utilizou o método em áreas sem vegetação (Plauborg, 1995) e com florestas (Mac Nish et al., 2000; Domingo et al., 2001).

2.2.1 Armazenamento de água no solo

O armazenamento de água é a altura (ou espessura, ou profundidade) da lâmina líquida sobre uma superfície qualquer (Prevedello, 1996). O solo é um reservatório sem fundo, quanto maior a profundidade considerada, maior a quantidade de água armazenada, porém devido à ação da gravidade, parte da água se move no sentido vertical para baixo, saindo da zona radicular e indo contribuir para a recarga dos reservatórios subterrâneos (Reichardt, 1990). Por isso, ao se definir o armazenamento de água num solo, é preciso definir a profundidade de estudo.

Para a quantificação do armazenamento de água num solo cultivado, deve-se levar em consideração uma camada de solo que envolva todo o volume explorado pelo sistema radicular da cultura. Para cada profundidade (z) considerada, o volume varia em função do tempo devido a processos de ganho e perda de água. Sendo, assim, o armazenamento de água é determinado a partir da integração do perfil de umidade volumétrica do solo (Carvalho, 2002).

A umidade volumétrica do solo pode ser obtida por técnicas diretas, como o método gravimétrico; e indiretas, tais como a atenuação de raios gama, a moderação de nêutrons (sonda de nêutrons, SN) e vários sensores incluindo blocos de resistência e sondas de TDR (Time Domain Reflectometry), que podem ser instalados em várias profundidades. O método gravimétrico, apesar de ser considerado padrão, normalmente é evitado, pois é demorado, destrutivo e não permite a repetição da amostragem no mesmo local. Das técnicas indiretas, a moderação de nêutrons, inicialmente usada por van Bavel e Stirik (1967) para os estudos de evapotranspiração, tem sido desde então muito utilizada (Antonino et al., 2000; Lima et al., 2002; Azevedo et al., 2003; Lima et al., 2006).

A precisão das medições da umidade volumétrica do solo com a sonda de nêutrons tem sido sempre alta e satisfatória para muitas investigações, com erro padrão $< 0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Gardner, 1986). Contudo, as regras de licenciamento e treinamento de usuários, e a considerável e crescente burocracia fazem com que o método da sonda de nêutrons (SN) permaneça caro e difícil de ser usado em algumas situações de campo (Evet e Steiner, 1995),

além de não permitir a automatização, principalmente em estudos realizados em locais de difícil acesso.

Um método que venha substituir a sonda de nêutrons deverá permitir medições em várias profundidades e localizações no campo. Esse método não deve ser nuclear e, portanto, livre de regras pertinentes à radioatividade, além de possibilitar sua automatização. É desejável que ele tenha uma melhor resolução em profundidade e uma precisão no mínimo comparável ao método da sonda de nêutrons (Evelt e Steiner, 1995).

Os sensores tipo TDR podem ser utilizados em substituição à sonda de nêutrons, já que eles não utilizam fonte nuclear, podem ser instalados em várias profundidades e em vários locais no solo, além de fazerem leituras automatizadas, sem a necessidade de intervenção do usuário. Entre as desvantagens desses sensores podem ser citados: alto custo de aquisição e necessidade de calibração para diferentes tipos de solo (Lima et al., 2006).

2.2.2 – Precipitação

O vapor de água presente na atmosfera, sob determinadas condições meteorológicas, condensa-se, formando microgotículas de água que se mantêm suspensas no ar devido à turbulência natural. O agrupamento das microgotículas, que são visíveis, com o vapor de água, que é invisível, mais eventuais partículas de poeira e gelo, forma um aerossol que é chamado de nuvem, ou de nevoeiro quando o aerossol forma-se junto ao solo. Através da dinâmica das massas de ar, acontece a principal transferência de água da atmosfera para a superfície terrestre que é a precipitação (Silveira, 1993).

Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas distintas de precipitação. O que as diferencia é o estado físico em que a água se encontra. A precipitação, na sua forma mais comum que é a chuva, ocorre quando complexos fenômenos de aglutinação e crescimento das microgotículas, em nuvens com presença significativa de umidade (vapor de água) e núcleos de condensação (poeira ou gelo), formam uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para que a gravidade supere a turbulência normal (Tucci, 2002).

A determinação da intensidade e distribuição da precipitação é importante para o planejamento de irrigação de culturas, abastecimento de água para cidades, controle de inundação e erosão do solo. As características principais da precipitação são o total, a duração e as distribuições temporal e espacial. A precipitação é medida como a altura da lâmina d'água que seria acumulada em superfície plana se nenhuma perda ocorresse (Paiva e Paiva, 2003). A unidade usual dessas medidas é definida como a quantidade de água necessária para

se ter uma altura de 1 mm de água, aplicando-se 1 litro de água em 1 m² de área. A quantidade de precipitação é normalmente usada como parâmetro de entrada em simulações numéricas do balanço hídrico.

O total precipitado não tem significado se não estiver ligado a uma duração. Por exemplo, 100 mm pode ser pouco em um mês, mas é muito em um dia ou, ainda mais, em uma hora. A ocorrência de precipitação é um processo aleatório que não permite uma previsão determinística com grande antecedência. O tratamento dos dados de precipitação para a grande maioria dos problemas hidrológicos é estatístico (Bertoni e Tucci, 2002).

Dentre os vários métodos para a quantificação da precipitação, o mais comumente utilizado é o emprego de pluviômetros e pluviógrafos que garantem resultados confiáveis e precisos. Outros métodos para se fazer medidas de precipitação, como o uso de radares meteorológicos ou imagens de satélite, ainda possuem erros associados à sua metodologia relativamente grandes, principalmente quando se deseja a quantificação exata (Santos et al., 2002).

O pluviômetro é um aparelho dotado de uma superfície de captação horizontal delimitada por um anel metálico e de um reservatório para armazenar a água captada. Já o pluviógrafo é um equipamento capaz de registrar continuamente de forma analógica, ou digital, a precipitação local, além de possuir a melhor eficiência quando se pretende medir chuvas em pequenos intervalos de tempo e, conseqüentemente, estimar a intensidade (Santos et al., 2002).

2.2.3 Fluxo de água no limite inferior do solo (Ascensão Capilar ou Drenagem)

À medida que ocorre a passagem de água da superfície para o interior do solo, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a superfície, naturalmente, o primeiro nível a saturar. Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando consegue, apenas as camadas próximas à superfície, formando um perfil típico no qual o teor de umidade decresce com a profundidade (Louzada, 2002).

Quando o aporte de água à superfície cessa, isto é, deixa de haver infiltração, a umidade no interior do solo se redistribui, evoluindo para um perfil de umidade inverso, isto é, com menores teores de umidade próximos à superfície e maiores nas camadas mais

profundas. Nem toda umidade é drenada para as camadas mais profundas do solo, já que parte é transferida para a atmosfera por evapotranspiração (Silveira et al., 2002).

Esse fluxo vertical do movimento da água em um solo não saturado pode ser descrito pela equação de Darcy, originalmente deduzida para solos saturados:

$$\vec{q} = -\vec{K}_s \nabla H \quad (1)$$

sendo K_s a condutividade hidráulica saturada do solo [$L T^{-1}$] e ∇H o gradiente do potencial total da água no solo [-], com o potencial expresso por energia por unidade de peso [L].

A extensão da lei de Darcy para solos não saturados exige que sejam redefinidas a condutividade hidráulica, em função da umidade, e o potencial total da água no solo. Tem-se que $K(\theta)$, por exemplo, varia com o teor de umidade do solo, tendo como limite superior a condutividade hidráulica saturada K_s . O potencial total, por sua vez, tem duas componentes principais em um solo não-saturado, em função das energias envolvidas, o potencial matricial da água no solo (h) e o potencial gravitacional (z). Tomando como referência a superfície do solo e com o sentido negativo para o interior, o potencial total é dado por:

$$H = h - z \quad (2)$$

Quando o fluxo é positivo, isto é, ascendente, observa-se o efeito de ascensão capilar. As forças de tensão superficial da água determinam um efeito em tubos estreitos (ditos “tubos capilares”) e, de um modo mais geral, em quaisquer espaços estreitos, que é o fluxo de água contra a gravidade (Terzaghi, 1942).

No caso de fluxo negativo, isto é descendente, ocorre o fenômeno de drenagem e redistribuição interna. Acontece porque a camada superior do solo que foi quase ou totalmente saturada durante a infiltração não retém toda esta água, surgindo um movimento descendente em resposta aos gradientes gravitacional e matricial (Louzada, 2002).

A aplicação da equação de Darcy necessita de muito cuidado, pois devido a erros cometidos na estimativa do gradiente de potencial e na escolha do valor da condutividade hidráulica, encontram-se grandes erros na determinação do fluxo (Reichardt et al., 1979).

Devido à sua complexidade de avaliação, alguns estudos sugerem que o fluxo (drenagem ou ascensão capilar) pode ser desprezado em regiões secas (Antonino et al., 2000). Mas para isso é necessária uma verificação em cada caso particular (Brutsaert, 1982), pois a

drenagem depende de vários fatores como profundidade, declividade, permeabilidade e armazenamento de água no solo (Jensen et al., 1990) além do clima (Katerji et al., 1984, citado em Rana e Katerji, 2000).

Azevedo et al. (2003) num cultivo irrigado de manga em Petrolina-PE, observaram valores na drenagem, em torno de $0,79 \text{ mm d}^{-1}$. Libardi e Saad (1994) efetuaram o balanço hídrico num cultivo de feijão irrigado em Guairá-SP e encontraram que, praticamente, não existiu drenagem. No entanto, dependendo do tipo de solo, as perdas por drenagem podem ser consideráveis, chegando a mais de 50% do total precipitado, como encontrado em trabalhos com Latossolo (Reichardt et al., 1979). A quantificação dos fluxos de drenagem, utilizando-se perfis de umidade e de potencial total da água do solo, mostra-se confiável em períodos de déficit hídrico, mas falha nos períodos chuvosos, quando ocorrem aumentos no armazenamento de água no solo (Andrade et al., 1988).

2.2.4 Escoamento Superficial

Parte da água proveniente da chuva pode originar um escoamento à superfície do terreno, mais conhecido como escoamento superficial, que se concentra em sulcos, cuja reunião dá lugar aos cursos de água. O escoamento superficial constitui uma resposta rápida à precipitação e cessa certo tempo depois dela (Tucci, 2002).

Esse processo é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo. O escoamento superficial manifesta-se inicialmente na forma de pequenos filetes de água que se moldam ao micro-relevo do solo. A erosão de partículas de solo pelos filetes em seus trajetos, aliada à topografia preexistente, molda, por sua vez, uma micro-rede de drenagem efêmera que converge para a rede de cursos de água mais estável, formada por arroios e rios. A presença de vegetação na superfície do solo contribui para obstaculizar o escoamento superficial e reduzir a energia cinética de impacto das gotas de chuva no solo, minimizando a erosão (Silveira, 1993).

O escoamento superficial é, portanto, a combinação do fluxo de pequena profundidade na superfície com escoamento em pequenos canais que constituem a drenagem de uma área. A representação do escoamento em seus mínimos detalhes é difícil, devido à grande variabilidade das condições físicas do solo (Tucci, 2002).

2.2.5 – Evapotranspiração

O processo conjunto de perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta denomina-se evapotranspiração (ET), ocorrendo quando a água líquida é convertida para

vapor de água e transferida, neste estado, para a atmosfera. Este processo somente poderá ocorrer naturalmente se houver fornecimento de energia, proveniente do sol, da atmosfera ou de ambos (Morton, 1983).

Informações quantitativas do processo de evapotranspiração, que se constitui em importante fase do ciclo hidrológico, são utilizadas na resolução de numerosos problemas que envolvem o gerenciamento de recursos hídricos. Tanto o planejamento de áreas agrícolas de sequeiro ou irrigada, a previsão de cheias ou a construção e operação de reservatórios, requerem dados confiáveis de evapotranspiração (Tucci e Beltrame, 2002).

A evapotranspiração depende essencialmente da energia disponível para o processo de evaporação da água, e se houver água disponível no solo, a evapotranspiração é diretamente proporcional à energia disponível. Para que houvesse padronização da terminologia da evapotranspiração, foi introduzido o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o) (Pereira et al., 1997).

A definição do termo ET_o surgiu no início dos anos 70, visto que as definições originais, embora definidas corretamente, não especificam o tipo de vegetação, o grau e a altura da cobertura vegetal do solo, as dimensões da superfície e as condições de bordadura (Corrêa, 2004). Wright e Jensen (1972) sugeriram que a cultura de referência deveria ser a alfafa, em fase de crescimento ativo, com tamanho variando entre 30 e 50 cm de altura e bordadura mínima de 100 m. Posteriormente, definiu-se como ET_o a evapotranspiração que ocorre em uma extensa área de grama com altura de 8 a 15 cm, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água (Doorenbos e Pruitt, 1977).

Procurando superar a dificuldade na adoção do coeficiente de cultura determinado a partir de outra cultura de referência, foi proposta a adoção de uma definição padronizada para ET_o, com vistas, principalmente, à utilização do modelo de Penman-Monteith (Smith, 1991). Portanto, a ET_o seria aquela que ocorre em uma cultura hipotética, com altura fixa de 12 cm, albedo igual a 0,23 e resistência de transporte de vapor de água igual a 70 s m^{-1} (Allen et al., 1998). Estas características seriam encontradas em um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem deficiência hídrica (Sediyama, 1996; Pereira et al., 1997).

Inicialmente proposto na década de 50, o coeficiente de cultura (k_c) é importante no estudo da evapotranspiração. Ele é definido como a relação entre a evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) e a de referência (ET_o). Os fatores mais influentes no valor de k_c são as fases fenológicas, espécies e variedades de cultura. O k_c é determinado experimentalmente, e sua estimativa é dada por meio de medidas simultâneas de ET_o e ET_m (Reichardt e Timm,

2004). Para a maioria das culturas, o valor de k_c aumenta a partir de um pequeno valor no momento da emergência até um máximo durante o período em que é alcançado seu pleno desenvolvimento e diminui à medida em que amadurece (fases de maturação e de senescência).

A evapotranspiração máxima (ET_m) refere-se às condições em que água é suficiente para um crescimento e desenvolvimento sem restrição e representa a taxa de ET de uma cultura sadia que cresce em grandes áreas sob condições ótimas de manejo agrônômico e de irrigação (Doorenbos e Kassam, 1994).

Para se determinar a evapotranspiração (ET) de uma cultura deve-se considerar a quantidade de água disponível no solo. A ET será igual à ET_m quando a água disponível no solo para a cultura for suficiente. Entretanto, $ET < ET_m$ quando a água disponível no solo for limitada. A magnitude de ET pode ser quantificada para períodos entre irrigações ou chuvas intensas e para períodos mensais (Doorenbos e Kassam, 1994).

3 MATERIAS E MÉTODOS

3.1 Localização, clima e solo da área experimental

As medidas para a realização do balanço hídrico foram efetuadas numa área de 4,0 ha localizada na fazenda Chã de Jardim (Figura 1), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, situado na microrregião do Brejo Paraibano, no município de Areia, Estado da Paraíba ($6^{\circ}58'12''$ S e $35^{\circ}42'15''$ O). A altitude é de aproximadamente 619 m acima do nível do mar. O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo As' (quente e úmido), com estação chuvosa no período outono-inverno, sendo as maiores precipitações nos meses de junho e julho (BRASIL, 1972). O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 1999).

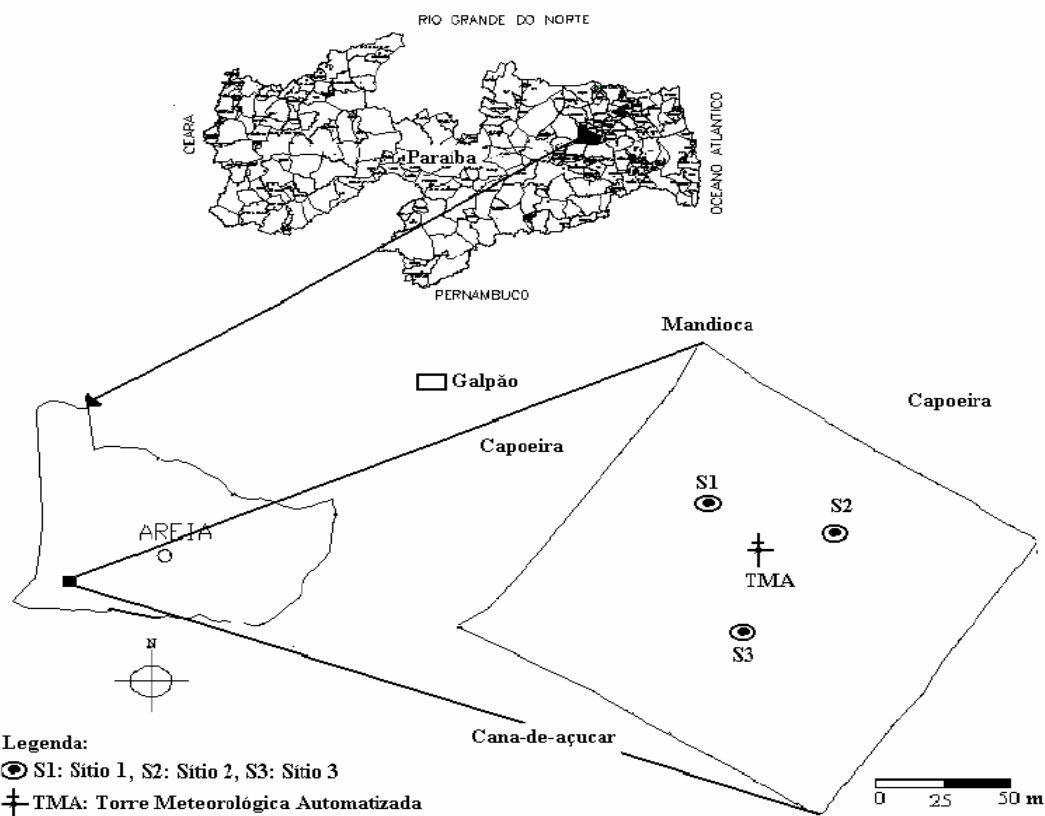


Figura 1. Mapa do município de Areia-PB, com a localização da área experimental, mostrando em detalhes os sítios tensio-neutrônicos e a torre meteorológica automatizada.

Foram realizadas coletas de amostras deformadas de solo a cada 10 cm até a profundidade de 80 cm para a realização da análise física do solo, constando de granulometria, classificação textural e densidade do solo, cujos resultados estão na Tabela 1.

Tabela 1. Análise granulométrica, classificação textural e massa específica (ρ) da área experimental

Profundidade (cm)	Granulometria (%)			Classificação Textural	ρ (g cm ⁻³)
	Areia	Silte	Argila		
0-10	64,0	12,9	23,0	Franco Argilo Arenosa	1,21
10-20	61,7	15,2	23,0	Franco Argilo Arenosa	1,35
20-30	55,8	14,0	30,1	Franco Argilo Arenosa	1,35
30-40	55,8	14,0	30,1	Franco Argilo Arenosa	1,32
40-50	49,9	11,7	38,3	Argilo Arenosa	1,32
50-60	44,1	11,7	44,1	Argilo Arenosa	1,43
60-70	48,8	7,0	41,7	Argilo Arenosa	1,43
70-80	48,8	9,3	44,1	Argilo Arenosa	1,20

Fonte: Lima (2004).

3.2 Balanço Hídrico

3.2.1 Localização, clima e solo da área experimental

O estudo dos componentes do balanço hídrico foi realizado em solo cultivado com o feijão caupi (*Vigna unguiculata* L Walp.), nos períodos de 11 de março a 30 de maio e de 22 de julho a 22 de outubro de 2003.

Para a determinação do balanço hídrico foram instalados três sítios tensio-neutrônicos (Figura 2), cada um contendo um tubo de acesso, em alumínio, para a sonda de nêutrons, e oito tensiômetros nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 e 120 cm. As medidas neutrônicas foram realizadas diariamente a cada 10 cm, em três repetições, até a profundidade de 120 cm, com uma sonda TROXLER série 4300, tendo a mesma uma fonte radioativa de Am-Be de atividade de 10 mCi (0,37 GBq). As leituras nos tensiômetros também foram realizadas diariamente.

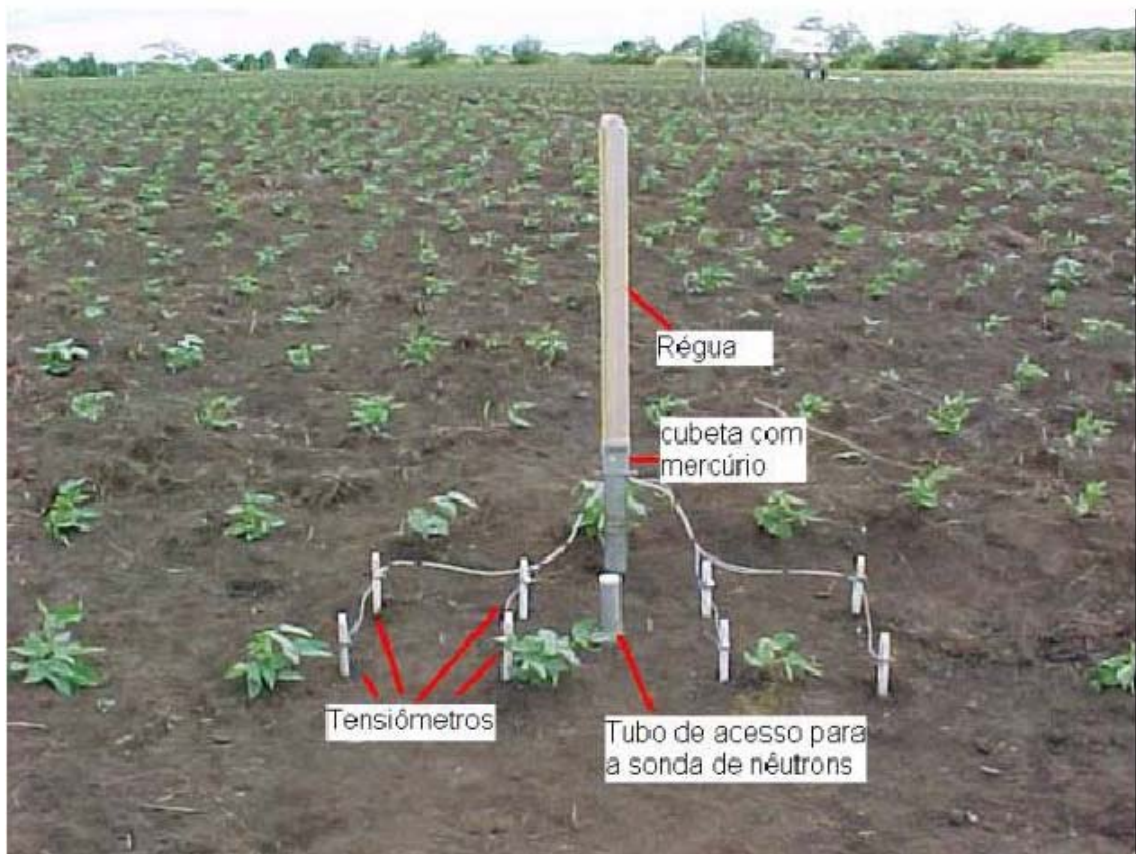


Figura 2. Sítio tensio-neutrônico instalado na área experimental, mostrando em detalhe oito tensiômetros com manômetro de mercúrio, e o tubo de acesso em alumínio para a sonda de nêutrons.

A curva de calibração da sonda de nêutrons foi obtida do trabalho de Lima et al. (2002), os quais trabalharam com a mesma sonda de nêutrons, com o mesmo solo e mesma cultura.

3.2.2 Componentes do balanço hídrico

O balanço hídrico é baseado no princípio de conservação de massa para a água num volume de solo, que normalmente vai da superfície até uma profundidade que englobe o sistema radicular da cultura em estudo, num dado período de tempo. A figura 3 mostra um esquema do balanço hídrico.

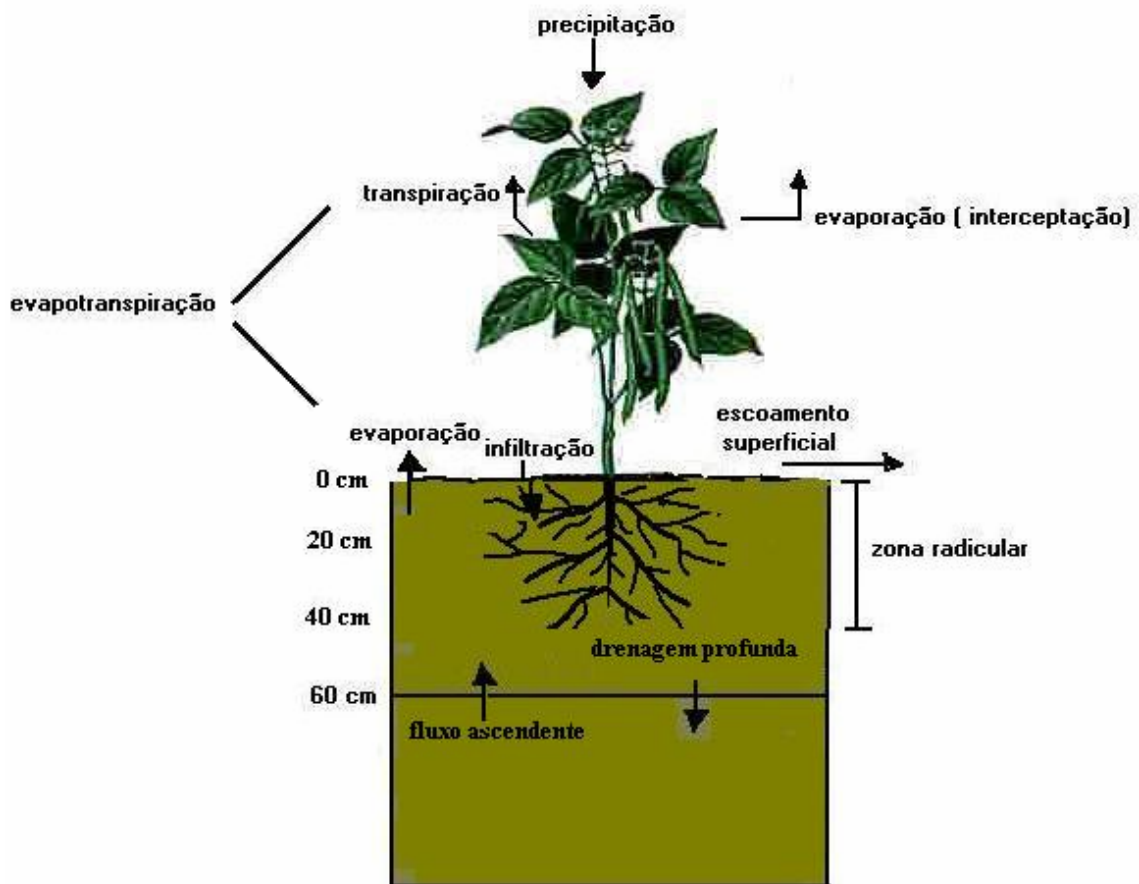


Figura 3. Esquema mostrando todos os componentes do balanço hídrico

O balanço hídrico pode ser descrito pela seguinte equação (Rana e Katerji, 2000):

$$P + I + W - ET \pm R - D = \pm[\Delta A] \quad (3)$$

sendo P a precipitação, I a irrigação, W a ascensão capilar, R o escoamento superficial, D a drenagem, ET a evapotranspiração e ΔA a variação de armazenamento de água no solo.

A partir da equação do balanço hídrico (equação 3), a evapotranspiração da cultura (ET) pode ser obtida por:

$$ET = P + I + W \pm R - D \pm \Delta A \quad (4)$$

Nas condições dos experimentos de campo realizados, o termo irrigação foi nulo, pois o cultivo foi realizado em condições de sequeiro. Considerou-se também que não houve escoamento superficial de água, pois o solo da área experimental (Latosolo amarelo) possui

declive suave e apresenta uma elevada infiltrabilidade. A precipitação pluvial foi medida por meio de um pluviógrafo automático instalado numa torre meteorológica no centro da área.

A variação no armazenamento de água no perfil de solo (ΔA) foi determinada pela diferença dos valores do armazenamento acumulado de água no solo obtida nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela seguinte equação:

$$\Delta A = \left[\theta_{(f)} - \theta_{(i)} \right] L = A_f - A_i \quad (5)$$

sendo L a profundidade, A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

O armazenamento acumulado de água no solo foi calculado pela regra do trapézio, considerando-se que as medidas foram realizadas em intervalos (10 cm) igualmente espaçados, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L$) (Libardi, 1995), por meio da equação:

$$A_L = \int_0^L \theta(z) dz = \left[0,50\theta(z_0) + \sum_{i=1}^{n-1} \theta(z_i) + 0,50\theta(z_n) \right] \Delta z \quad (6)$$

sendo θ a umidade volumétrica do solo, medida com a sonda de nêutrons.

O fluxo de água através da base do perfil de solo (ascensão capilar ou drenagem profunda) estudado foi estimado com base na equação de Darcy – Buckingham:

$$q = -K(\theta)\nabla H \quad (7)$$

sendo $K(\theta)$ a condutividade hidráulica não saturada e ∇H o gradiente de potencial total da água no solo na direção vertical.

3.2.3 Curvas de retenção, $\theta(h)$ e de condutividade hidráulica do solo, $K(\theta)$

As curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ são descritas, respectivamente, pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks e Corey (1964):

$$\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m} \quad \text{com } m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{Burdine, 1953}) \quad (8)$$

e

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta \quad (9)$$

sendo θ a umidade volumétrica [$L^3.L^{-3}$]; θ_s a umidade volumétrica saturada [$L^3.L^{-3}$]; h o potencial matricial [L]; h_g [L] um valor crítico de h a partir do qual ocorre a dessaturação, conhecido como potencial de entrada de ar; n e m são parâmetros de forma; K_s a condutividade hidráulica saturada do solo [$L.T^{-1}$] e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Essas funções contêm seis parâmetros desconhecidos: três parâmetros de forma (m , n e η) e três parâmetros de escala (θ_s , K_s e h_g). Os parâmetros de forma são ligados à textura (Haverkamp et al., 1999), enquanto que os parâmetros de normalização dependem da estrutura dos solos. Os parâmetros de forma e normalização foram obtidos usando o programa BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments) proposto por Lassabatère et al. (2006).

3.2.3.1 Determinação dos parâmetros de forma

Assumindo a similaridade de forma entre a distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ e a curva de retenção $\square(h)$, Haverkamp e Parlange (1986) apresentaram a seguinte equação para expressar $F(D)$:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D_p}\right)^N\right]^{-M} \quad \text{com } M = 1 - \frac{2}{N} \quad (10)$$

sendo D_p o diâmetro da partícula, D_g o parâmetro de escala do tamanho das partículas e M e N os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

O índice de forma do meio (p_m) pode ser estimado a partir de M e N usando (Zataráin et al., 2003):

$$p_m = \frac{MN}{1+M} \cdot (1+\kappa)^{-1} \quad (11)$$

sendo κ um coeficiente definido por Fuentes et al., (1998):

$$\kappa = \frac{2s-1}{2s(1-s)} \quad (12)$$

sendo s a dimensão fractal relativa. A dependência de s ($s = D_f/E$, onde D_f é a dimensão fractal do solo e $E = 3$ a dimensão de Euclides) com respeito a porosidade total do solo (ϕ) é definida de maneira implícita:

$$(1-\phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad \text{com} \quad \frac{1}{2} < s < 1 \quad (13)$$

Uma das propostas de Fuentes (1992) para obter os parâmetros de forma (m e n) para a curva de retenção $\theta(h)$ de van Genuchten (1980) leva em consideração que:

$$m = \frac{M}{1+(1+M) \cdot \kappa} \quad (14)$$

e

$$n = \frac{2}{1-m} \quad (15)$$

No caso da equação da curva de condutividade hidráulica de Brooks e Corey (1964), o seu parâmetro de forma, η , pode ser expresso como uma função do produto dos parâmetros de forma da curva de retenção e do fator de tortuosidade (p):

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (16)$$

sendo $p = 1$ para o modelo de Burdine (1953).

3.2.3.2 Determinação dos parâmetros de escala

O primeiro parâmetro de escala, θ_s , foi estimado a partir da umidade gravimétrica saturada e da massa específica do solo. Os outros parâmetros de normalização são obtidos a partir da modelagem dos ensaios de infiltração. Esses ensaios de infiltração foram realizados com infiltrômetro de anel simples com 15 cm de diâmetro na superfície e nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, utilizando-se o método proposto por Haverkamp et al. (1994). Este método consiste em anotar o tempo em que volumes constantes de água levam para infiltrar no solo, sendo que esses volumes de água podem variar de 70 a 250 mL dependendo da taxa de infiltração, a fim de evitar uma carga hidráulica e conseqüente fluxo forçado no solo. A infiltração acumulada é obtida calculando-se a razão entre o volume acumulado e a área do infiltrômetro de anel ($A = 176,71 \text{ cm}^2$).

Para uma fonte de água circular, com um dado potencial de pressão da água, sobre uma superfície de solo uniforme e com um conteúdo de água inicial uniforme (θ_0), a infiltração acumulada tridimensional $I(t)$ e a taxa de infiltração $q(t)$ podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Equações 17a e 17b) e estacionário (Equações 17c e 17d) (Haverkamp et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [aS^2 + bK_s]t \quad (17a)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [aS^2 + bK_s] \quad (17b)$$

$$I_{+\infty}(t) = [aS^2 + K_s]t + c \frac{S^2}{K_s} \quad (17c)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = aS^2 + K_s \quad (17d)$$

com,

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (18a)$$

$$b = \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right] \quad (18b)$$

$$c = \frac{1}{2 \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right] (1-\beta)} \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (18c)$$

sendo S a sorvidade [$L.T^{-1/2}$], r o raio do cilindro [L]; γ igual a 0,75 e β igual a 0,6.

Para a determinação de K_s e S , o BEST utiliza equações, equivalentes às (17a) e (17b), obtidas pela substituição de K_s em função da sorvidade S e da taxa de infiltração no regime estacionário $q_{+\infty}$, (Equação 17d) nas equações (10a) e (10b):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a(1-b)S^2 + bq_{+\infty}]t \quad (19a)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [a(1-b)S^2 + bq_{+\infty}] \quad (19b)$$

O ajuste das Eq. (19a e 19b) aos dados experimentais da infiltração acumulada ($I_{exp}(t)$) é obtido pela minimização da clássica função objeto dada por:

$$f_1(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^k [I_{exp}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (20)$$

na qual k é o número de pontos considerado no regime transitório. O algoritmo usado na minimização de $f_1(S, K_s, k)$ é o de Marquardt (1963). O desempenho dos ajustes é analisado pelos valores correspondentes ao erro quadrático médio (EQM):

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_{exp}(t_i) - I(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k (I_{exp}(t_i))^2}} \quad (21)$$

Inicialmente, o BEST estima um valor máximo para a sorvidade, S_{MAX} , a partir do ajuste dos dados experimentais com a equação (18). Neste caso, assume-se um fluxo de água dependente apenas da capilaridade, considerando b igual a zero.

Como as equações (17a), (17b) e (19) são válidas apenas para o regime transitório, é possível que os ajustes não sejam feitos para todos os valores de k . A sorvidade então é estimada para valores de k de no mínimo cinco pontos para um máximo de N_{tot} . S_{MAX} é considerada o valor máximo de toda a seqüência de pontos. Para obter valores positivos de K_s , são levadas em consideração as seguintes condições: S_{MAX}^2 deve ser menor do que a taxa de infiltração no regime estacionário ($q_{+\infty}$) dividido pelo coeficiente a (equação 22). Desse modo, a sorvidade máxima S_{MAX} é definida por:

$$S_{MAX} = \underset{N_{obs}=5 \dots N_{tot}-1}{MAX} \left[\underset{(b=0)}{MIN} \left(S_{N_{obs}}, \sqrt{\frac{q_{+\infty}}{a}} \right) \right] \quad (22)$$

Para a obtenção de K_s , é considerado o valor verdadeiro de b (equação 18b). O ajuste é executado minimizando a função objeto definida pela equação (20). Como os ajustes pela equação (19) nem sempre são válidos para todos os pontos (de 0 à k), o BEST ajusta os dados para um mínimo de cinco pontos a um máximo de N_{tot} . Para cada subconjunto de dados que contém os k primeiros pontos, o BEST estima a sorvidade $S(k)$, a condutividade hidráulica $K_s(k)$ em função de $S(k)$ e da equação (17d) para um tempo máximo $t_{max}(k)$ definido como:

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-b)^2} \cdot t_{grav} \quad (23)$$

sendo t_{grav} o tempo gravimétrico definido por Philip (1969). O $t_{max}(k)$ é o tempo máximo para o qual as expressões para o regime transitório são consideradas válidas. Logo, o tempo mais longo do subconjunto de dados t_k é comparado com $t_{max}(k)$. Os valores de $S(k)$ e $K_s(k)$ são considerados válidos para t_k menores do que $t_{max}(k)$. Dos valores que cumprirem esta condição, serão escolhidos aqueles correspondentes ao maior k .

Após a determinação de θ_s e K_s , o parâmetro h_g é obtido pela seguinte equação (Lassabatère et al., 2006):

$$h_g = - \frac{S^2}{c_p (\theta_s - \theta_0) \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right) K_s} \quad (24)$$

na qual c_p é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de forma n , m e η dos modelos (Haverkamp et al., 1999; De Condappa e Soria Ugalde, 2002):

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \left[\frac{\Gamma \left(n\eta - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma \left(n\eta + m - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(n\eta + m)} \right] \quad (25)$$

sendo Γ a função Gama clássica.

3.3 – Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)

A estimativa da evapotranspiração de referência será realizada utilizando o método de Penman-Monteith, pela equação seguinte (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{\Delta(Rn - G) + \frac{\rho c_k (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (26)$$

sendo Δ a declividade da curva de pressão de vapor em função da temperatura (kPa °C); Rn a radiação líquida total diária (MJ m⁻² dia⁻¹); G o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); ρ a densidade do ar (kg m⁻³); c_k o calor específico do ar à pressão constante (MJ kg⁻¹ °C⁻¹); (e_s-e_a) o déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referência medida (kPa); γ a constante psicrométrica (kPa °C⁻¹) e r_s e r_a as resistências total da cobertura e aerodinâmica (s m⁻¹), respectivamente.

A resistência aerodinâmica é obtida por:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_2} \quad (27)$$

sendo z_m a altura de medição da velocidade do vento (m); z_h a altura de medição da umidade relativa (m); d a altura de deslocamento do plano zero (m); z_{om} o comprimento de rugosidade que governa a transferência de momentum (m); z_{oh} o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (m); k a constante de von Karman (0,41) e u₂ a velocidade do vento na altura z (m s⁻¹).

O comprimento de rugosidade que governa a transferência de momentum (z_{om}) é estimado da altura da cultura (h_c) por meio da seguinte equação:

$$z_{om} = 0,123h_c \quad (28)$$

Já o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (z_{oh}) pode ser estimado por:

$$z_{oh} = 0,1z_{om} \quad (29)$$

A resistência total da cobertura (r_s) pode ser obtida pela seguinte equação:

$$r_s = \frac{rl}{0,5 \cdot 24h_c} \quad (30)$$

sendo rl a resistência estomática de uma folha bem iluminada ($s \text{ m}^{-1}$), medida por meio de um porômetro.

Os dados de radiação líquida (R_n), fluxo de calor no solo (G), temperatura e umidade relativa do ar e velocidade do vento foram obtidos de uma estação micrometeorológica instalada no centro da área, sendo as leituras dessas variáveis realizadas a cada minuto e as médias armazenadas a cada 30 minutos. Para se calcular os totais diários de G e de R_n em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, foram utilizados os valores medidos de 30 em 30 minutos em W m^{-2} . A temperatura média diária (T_{md}) do ar foi calculada como a média dos 48 valores de 30 minutos de temperatura do ar.

A declividade (Δ) da curva de pressão de vapor em função da temperatura ($\text{kPa } ^\circ\text{C}$) foi obtida a partir da equação (Allen et al., 1998):

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (31)$$

A pressão de saturação de vapor, e_s (kPa), foi obtida de acordo com a equação (Murray, 1967):

$$e_s = 0,61 \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right) \quad (32)$$

A partir dos dados de umidade relativa do ar (UR, %) e dos valores calculados de pressão de saturação de vapor (e_s) foram calculados os valores de pressão real de vapor (e_a) em kPa, pela seguinte equação:

$$e_a = UR \frac{e_s}{100} \quad (33)$$

3.4 Determinações realizadas na cultura do feijão caupi

3.4.1 Plantio, tratos culturais e colheita

O primeiro plantio da cultura do feijão caupi foi realizado manualmente e se estendeu de 11 à 12/03/2003, sendo a colheita realizada nos dias 27 e 28/05/2003 e no dia 02/06/2003. Já o segundo plantio foi realizado nos dias 22, 23 e 24/07/2003 e a colheita realizada no dia 22/10/2003.

Nos dois cultivos, os espaçamentos entre filas e entre plantas foram de 1,0 m e 0,50 m, respectivamente, sendo colocadas três sementes por cova. Foi feita uma capina manual durante o período de desenvolvimento do feijão. Durante o ciclo fenológico da cultura não se detectou a presença de pragas, nem a ocorrência de doenças. Não foi realizada a adubação do solo.

3.4.2 Produção de grãos

Para a quantificação da produção de grãos, nos dois períodos de cultivo do feijão caupi, foram selecionadas quatro áreas com 100 m² cada uma. Após a colheita das quatro áreas, os grãos foram colocados para secar em estufa a 105°C ± 3°C até atingir uma umidade de 12% (BRASIL, 1992), sendo em seguida pesados e computado o valor em kg ha⁻¹.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados da dinâmica da água no solo, ou seja, os dados referentes à quantidade, retenção e movimento de água no solo. Para os dados de

umidade volumétrica, de potencial matricial e total da água no solo, serão apresentados os resultados dos três sítios tensio-neutrônicos, bem como seu valor médio, para os dois períodos de cultivo do feijão caupi. Além disso, ainda serão apresentados os dados da curva de retenção da água no solo e de condutividade hidráulica do solo, e ao final, os dados dos componentes do balanço hídrico no solo, para os dois períodos de cultivo do feijão caupi. O primeiro período vai de 11/03/2003 a 30/05/2003 e o segundo de 22/07/2003 a 22/10/2003

4.1 Umidade volumétrica, potenciais matricial e total da água no solo no período de 11/03/2003 a 30/05/2003

Os dados da evolução da umidade volumétrica do solo e da precipitação pluvial para os sítios 1, 2 e 3 durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003 são apresentados na figura 4.

Pode-se observar na figura 4 que a umidade volumétrica do solo segue a distribuição da precipitação pluvial, ou seja, ocorre um aumento ou um decréscimo da umidade volumétrica do solo quando ocorre uma maior ou uma menor quantidade de precipitação pluvial, respectivamente.

A precipitação pluvial apresentou seu maior evento, 32,4 mm, no dia 21/04/2003, representando quase 10% de toda a precipitação pluvial do período (341,4 mm). Além desse dia, apenas mais três dias alcançaram valores acima de 20 mm, quais sejam: 18/03/2003 com 28 mm, 20/3/2003 com 21,4 mm e 10/4/2003 com 20,6 mm. Em todos esses eventos é possível visualizar o aumento da umidade volumétrica do solo para todas as profundidades avaliadas. Por outro lado, nos períodos de menor quantidade de precipitação pluvial ocorria um decréscimo da umidade volumétrica do solo. Um exemplo disso pode ser visto nos períodos de 01 a 08/04/2003 e de 20 a 30/05/2003, onde em todas as profundidades avaliadas, de todos os sítios, observa-se que existiu um decréscimo da umidade volumétrica do solo, em virtude da ausência de precipitação pluvial.

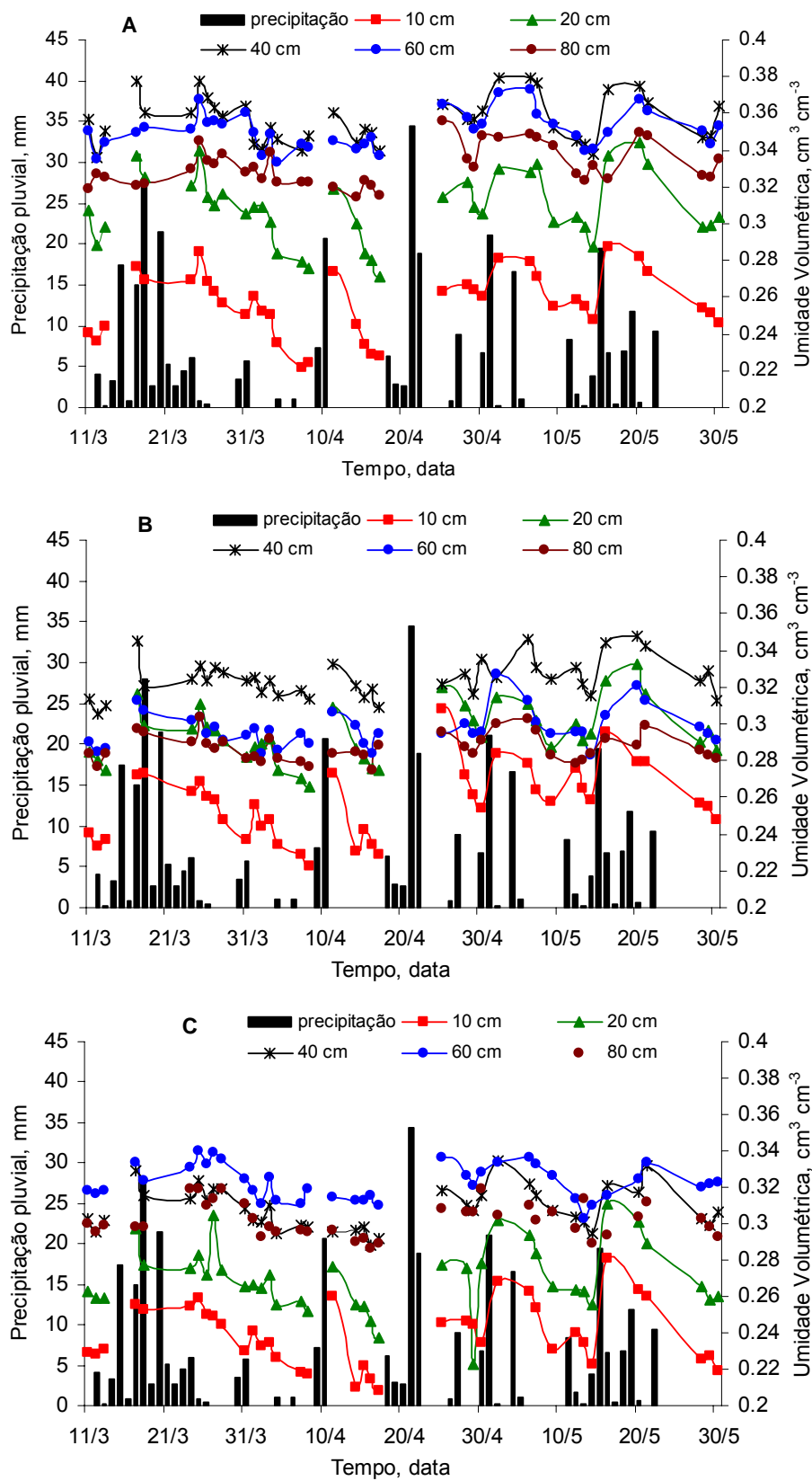


Figura 4. Evolução da umidade volumétrica do solo e da precipitação pluvial durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C são referentes aos sítios 1, 2 e 3, respectivamente.

Observando-se a figura 4 mais detalhadamente, vê-se que as camadas mais superficiais (10 e 20 cm) apresentam maiores variações nos valores de umidade volumétrica, enquanto nas camadas mais profundas (40, 60 e 80 cm) as amplitudes de variação dos valores de umidade volumétrica são menores.

A maior variação dos valores nas camadas mais superficiais pode ser explicada devido ao fato de que essas camadas, principalmente a de 10 cm, sofrem maior influência dos efeitos da demanda atmosférica e do sistema radicular da cultura, cujas raízes se concentram nas camadas mais superficiais, fatores esses, que atuando conjuntamente, são responsáveis pela retirada de água do solo. Por outro lado, nessas profundidades a recarga acontece também de forma mais efetiva.

Já nas camadas mais profundas, principalmente em 60 e 80 cm, essa menor variação dos valores de umidade volumétrica do solo se deve ao fato de que essas camadas já não sofrem efeito direto da demanda atmosférica, bem como, do sistema radicular da cultura do feijão, que não está presente extraíndo água. Além disso, as camadas de 60 e 80 cm apresentam um maior teor de argila, como pode ser visto da Tabela 1, o que pode contribuir para que a água fique mais fortemente retida.

Analisando-se a Figura 4A, sítio 1, observa-se que as camadas de 40 e 60 cm são as que apresentam os maiores valores de umidade volumétrica do solo. Os valores máximos de umidade volumétrica do solo nessas camadas foram $0,379 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,373 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para as profundidades de 40 e 60 cm, respectivamente. Os menores valores de umidade volumétrica nesse sítio ocorrem, naturalmente, nas camadas de 10 e 20 cm, com valores máximos de $0,288 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,344 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente. A camada de 80 cm apresenta um comportamento interessante, pois, de acordo com a Tabela 1, por essa camada possuir teor de argila semelhante às camadas de 40 e 60 cm, esperava-se que a mesma tivesse valores muito próximos dos dessas camadas. No entanto, observa-se que seus valores estão abaixo dos valores de umidade volumétrica das camadas de 40 e 60 cm. O que talvez possa explicar esse comportamento da camada de 80 cm seja a própria variabilidade do solo.

Para os sítios 2 e 3 (Figuras 4B e 4C), observa-se que os valores de umidade volumétrica do solo são inferiores aos valores encontrados no sítio 1, para todas as profundidades estudadas, com exceção da profundidade de 10 cm no sítio 2. E, do mesmo modo que o sítio 1 (Figura 4A), os sítios 2 e 3 (Figuras 4B e 4C) apresentam os maiores valores de umidade volumétrica do solo nas camadas de 40 e 60 cm, sendo que no sítio 2 a camada que apresentou maior valor de umidade volumétrica foi a de 40 cm, enquanto no sítio 3 foi a de 60 cm.

Essas pequenas diferenças de comportamento e de valores da umidade volumétrica do solo entre os três sítios (locais de medição) podem ser devidas, como já dito anteriormente, à própria variabilidade espacial natural do solo.

Diante dessas pequenas diferenças de valores de umidade volumétrica entre os três sítios, fez-se a média, bem como o desvio padrão, para inferir se essas diferenças eram relevantes para as condições experimentais ou se poderia trabalhar com o valor médio. Desse modo, na Figura 5 são apresentados os valores da umidade volumétrica do solo dos sítios 1, 2 e 3, bem como os valores médios, com seu respectivo desvio padrão, durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003, para as profundidades de 20, 40 e 60 cm. A escolha dessas profundidades deveu-se ao fato do sistema radicular do feijão caupi se encontrar em toda sua totalidade nelas, bem como ser as profundidades que apresentaram maiores valores de umidade volumétrica (40 e 60 cm).

Observando-se a profundidade de 20 cm (Figura 5A) vê-se que o valor médio de umidade volumétrica se encontra abaixo dos valores do sítio 1 e acima dos valores do sítio 3, e muito semelhante ao do sítio 2. O comportamento da profundidade de 40 cm (Figura 5B) é semelhante ao da profundidade de 20 cm, ou seja, os valores médios de umidade volumétrica estão acima dos valores de umidade volumétrica do sítio 3 e abaixo dos valores do sítio 1, sendo quase iguais aos do sítio 2. Já para a profundidade de 60 cm (Figura 5C) ocorre comportamento diferenciado dos outros dois sítios, com os valores médios sendo menores que os valores do sítio 1, no entanto, os valores do sítio 3 é que são próximos aos valores médios, com os valores do sítio 2 abaixo dos valores médios de umidade volumétrica do solo.

Contudo, apesar dessas diferenças entre os valores de umidade volumétrica dos três sítios e os valores médios, pode-se observar que essas diferenças não são expressivas para os objetivos da pesquisa, uma vez que os valores de umidade volumétrica permanecem dentro do limite do desvio padrão. Esse comportamento é verificado para todas as profundidades. Desses resultados, infere-se que se pode utilizar os valores médios de umidade volumétrica do solo, ao invés de um valor para cada local de medição (sítio).

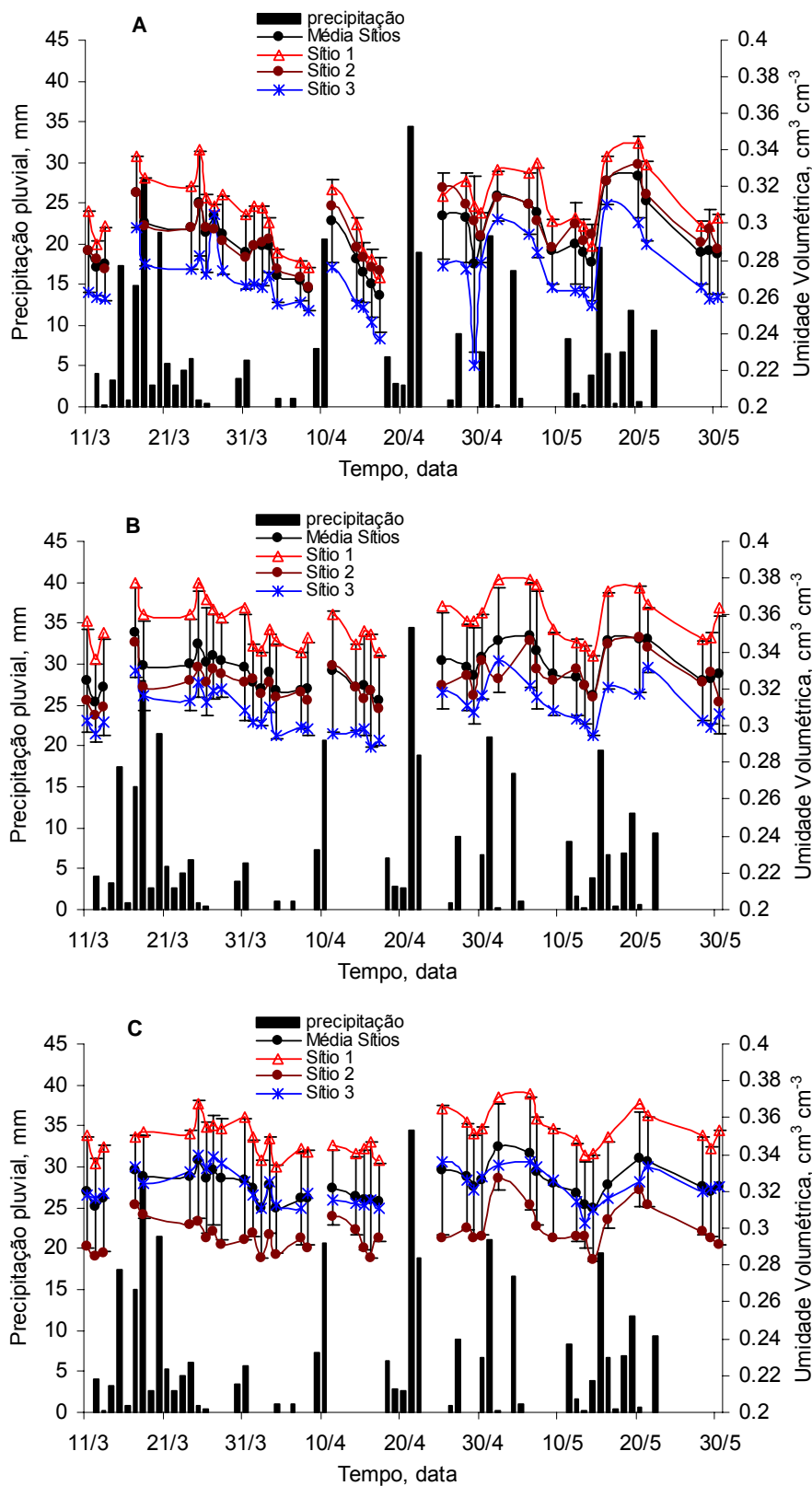


Figura 5. Evolução da umidade volumétrica do solo dos sítios 1, 2, 3, e da média dos 3 sítios, bem como da precipitação pluvial durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C são referentes às profundidades de 20, 40 e 60 cm, respectivamente. As barras indicam o desvio padrão

Os dados da evolução do potencial matricial da água no solo, nas profundidades de 10, 20, 40, 60 e 80 cm, para os sítios 1 e 3, bem como a evolução da precipitação pluvial durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003 são apresentados na figura 6. Os dados de potencial matricial da água no solo para o sítio 2 não são apresentados, pois os tensiômetros ainda não tinham sido instalados.

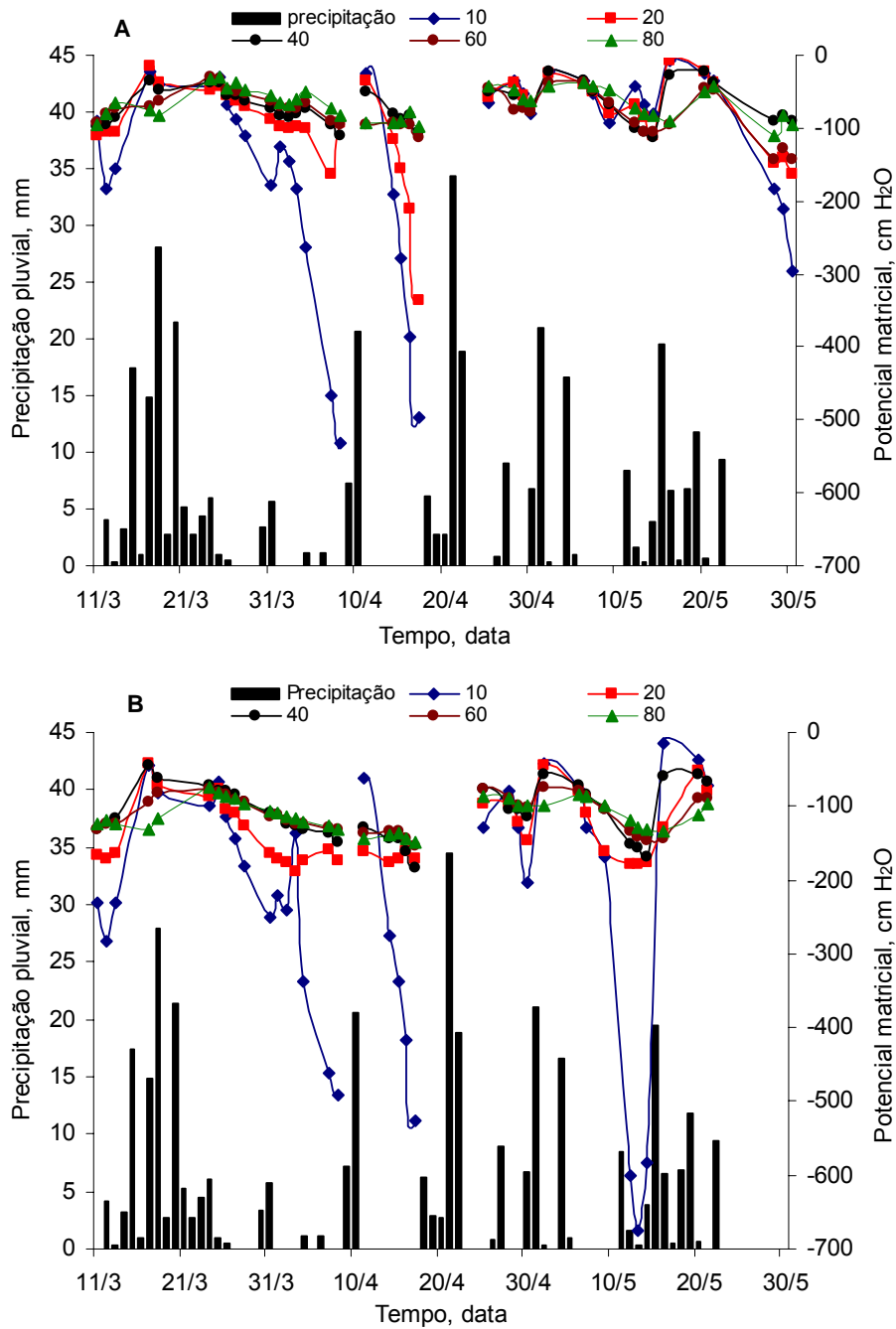


Figura 6. Evolução do potencial matricial da água no solo e da precipitação pluvial durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003 em Areia-PB. As letras A e B representam os sítios 1 e 3, respectivamente.

Observa-se na Figura 6 que, independentemente do sítio, a profundidade na qual ocorre maior variação nos valores de potencial matricial é a de 10 cm, uma vez que é essa profundidade que sofre maior efeito da demanda evaporativa da atmosfera e a influência das raízes na extração de água. Além da profundidade de 10 cm, no sítio 1, a de 20 cm também apresentou grandes variações dos valores de potencial matricial. Desconsiderando-se esses valores extremos, tanto no sítio 1 quanto no sítio 3, observa-se que os valores de potencial matricial seguem as variações da precipitação pluvial, com os menores valores (mais negativos) ocorrendo no período de secamento do solo, e os maiores valores (menos negativos) no período de umedecimento do solo, ou seja, no período em que as chuvas são maiores e mais frequentes, demonstrando o funcionamento adequado dos tensiômetros.

Com o intuito de mostrar de uma forma mais detalhada as condições de umedecimento e de secamento do solo, serão apresentados perfis de umidade volumétrica do solo e de potenciais matricial e total da água no solo para os sítios 1 e 3, em diferentes fases da cultura do feijão caupi.

Na figura 7 são apresentados perfis de umidade volumétrica do solo (Figura 7A), de potencial matricial (Figura 7B) e de potencial total (Figura 7C) da água no solo para o sítio 1 nos dias 13 e 17/03/2003, que são dias representativos da fase de emergência da cultura do feijão caupi. Observa-se na figura 7A que o dia 13/03/2003 apresenta-se mais seco que o dia 17/03/2003 até a profundidade de 70 cm, sendo que a partir da profundidade de 100 cm ocorre o inverso. Os perfis de umidade volumétrica do solo para os dias 13 e 17/03/2003 ilustram muito bem o processo de umedecimento do solo, já que do dia 13/03/2003 ao dia 17/03/2003 ocorreu uma precipitação total de 22,0 mm. Esse total precipitado foi mais eficiente em umedecer as profundidades mais superficiais, ou seja, de 10 a 40 cm. Por exemplo, no dia 13/03/2003 a umidade volumétrica do solo na profundidade de 40 cm era de $0,350 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e a do dia 17/03/2003 passou para $0,377 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, ou seja, ocorreu um acréscimo de umidade de $0,0277 \text{ cm}^3$. Pode-se observar, ainda, na figura 7A que, independentemente do dia analisado, os maiores valores de umidade volumétrica ocorrem na profundidade de 40 cm.

Os perfis de potencial matricial (Figura 7B) e total (Figura 7C) da água no solo estão coerentes com os perfis de umidade volumétrica (Figura 7A), uma vez que quando o solo está mais seco, dia 13/03/2003, os potenciais matricial e total são menores (mais negativos), enquanto no período de solo mais úmido, ocorre o inverso.

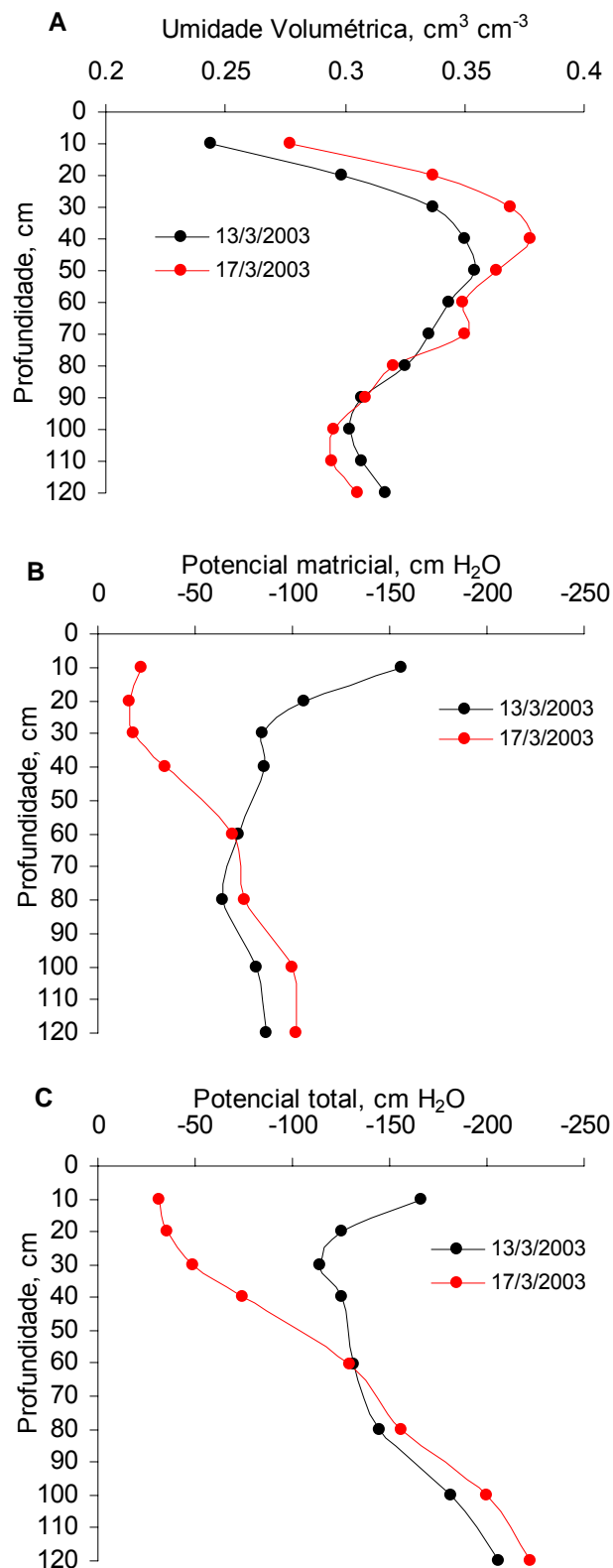


Figura 7. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potenciais matricial e total da água no solo para os dias 13/03/2003 e 17/03/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C representam umidade volumétrica, potencial matricial e potencial total, respectivamente.

Com relação ao movimento de água no solo, o qual pode ser inferido pelo potencial total da água no solo (Figura 7C), vê-se que o dia 13/03/2003 apresenta um movimento ascendente de água da profundidade de 60 cm para as camadas mais superiores e um movimento descendente de 60 cm para as camadas mais profundas. Já para o dia 17/03/2003 o movimento de água no solo se caracteriza por ser descendente, ou seja, está ocorrendo drenagem da água das camadas mais úmidas, que estão na superfície, para as camadas mais secas (mais profundas).

Das figuras 7B e 7C, observa-se ainda que o potencial matricial no dia mais seco (13/03/2003) é o principal componente do potencial total, enquanto que no dia mais úmido (17/03/2003), o principal componente do potencial total é o gravitacional. Por exemplo, no dia 13/03/2003 o potencial total na profundidade de 40 cm foi -125,8 cm H₂O, sendo o potencial matricial e o potencial gravitacional iguais a -85,8 e -40,0 cm H₂O, respectivamente. Já para o dia 17/03/2003, na mesma profundidade, o potencial total foi de -75,0 cm H₂O, sendo o potencial matricial e o potencial gravitacional iguais a -35,0 e -40,0 cm H₂O, respectivamente. Esses resultados estão de acordo com autores como Reichardt (1996), que comentam que na faixa de solo mais úmido, o principal componente do potencial total é o gravitacional, enquanto na faixa de solo mais seco, o potencial matricial se torna o principal componente do potencial total.

Outra informação relevante para esses perfis de umidade volumétrica e de potenciais matricial e total para os dias 13/03/2003 e 17/03/2003, é que a cultura do feijão caupi não estava exercendo nenhuma influência neles, uma vez que nesse período a cultura se encontrava na fase de germinação.

Os perfis de umidade volumétrica do solo e de potenciais matricial e total da água no solo para os dias 11/04/2003 e 17/04/2003, medidos no sítio 3, são apresentados na figura 8. Nesse período o feijão caupi se encontrava na fase vegetativa e cobria aproximadamente 25% da superfície do solo.

Observando-se a figura 8A vê-se que o solo se encontra em processo de secamento, uma vez que o dia 11/04/2003 encontra-se com maior valor de umidade volumétrica que o dia 17/04/2003, principalmente para as camadas mais superficiais (10 a 30 cm). Esse maior secamento nas camadas mais superficiais, como já comentado anteriormente, é devido à maior ação da demanda evaporativa da atmosfera, além da extração de água pelo sistema radicular da cultura, que nessa fase já começa a atuar no secamento do solo.

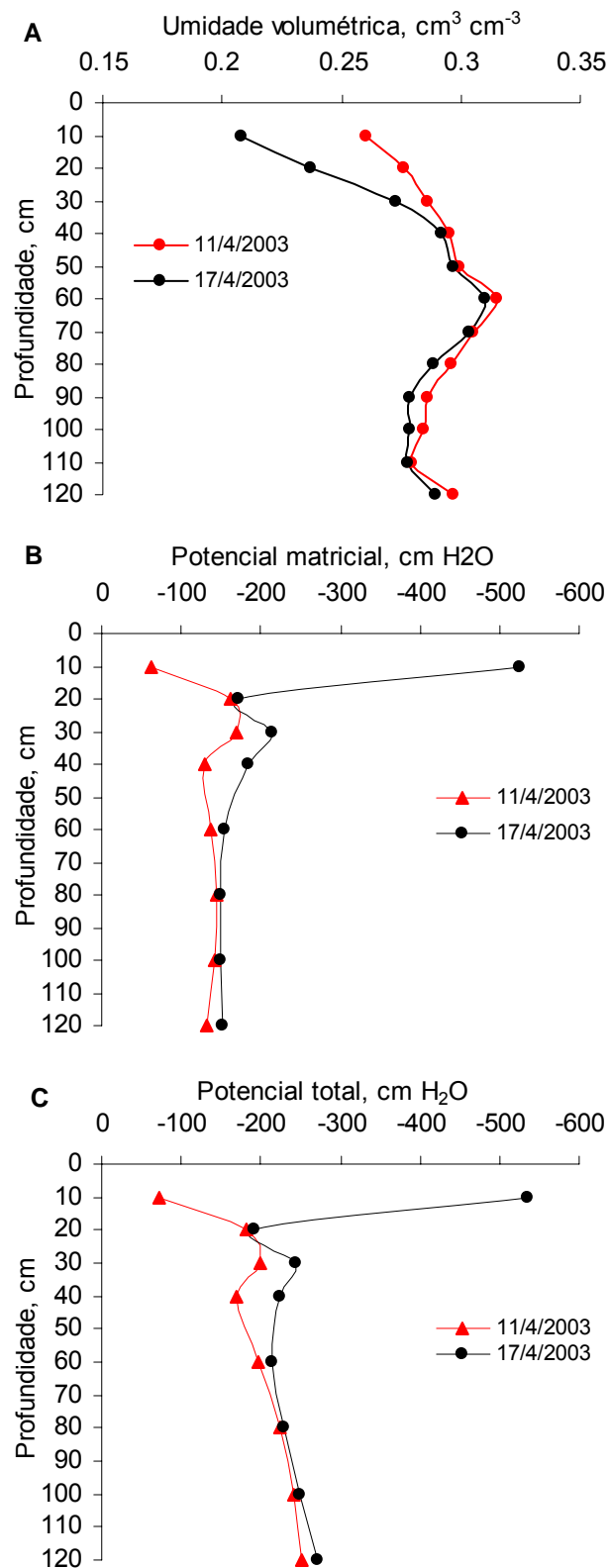


Figura 8. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potenciais matricial e total da água no solo para os dias 11/04/2003 e 17/04/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C representam umidade volumétrica, potencial matricial e potencial total, respectivamente.

Os perfis de potenciais matricial (Figura 8B) e total (Figura 8C), a exceção da profundidade de 20 cm, estão condizentes com os valores de umidade volumétrica do solo. Esperavam-se valores bem menores de potenciais matricial e total para essa profundidade, uma vez que a umidade volumétrica nessa profundidade caiu de $0,276 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (dia 11/04/2003) para $0,237 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (dia 17/04/2003). No entanto, os valores de potenciais matricial e total do dia 17/04/2003, período de solo mais seco, permaneceram iguais aos do dia 11/04/2003, período de solo mais úmido. O que talvez possa explicar essa discrepância seja o mau funcionamento do tensiômetro, nessa profundidade, nesse período.

Deve-se ressaltar, ainda, que para todas as outras profundidades os tensiômetros funcionaram adequadamente, mostrando que com o processo de secamento do solo ocorriam menores valores (mais negativos) de potenciais matricial e total da água no solo. Esse período estudado, 11/04/2003 a 17/04/2003, é considerado de secamento, pois, tinham ocorridos precipitações (Figura 4) nos dias 09 e 10/04/2003 que totalizaram 28 mm, e a partir do dia 11/04/2003 até o dia 17/04/2003 não ocorreram precipitações pluviais na área de estudo.

Do mesmo modo que nas fases anteriores, foi escolhido um período de tempo para mostrar a dinâmica da água no solo quando o feijão caupi se encontrava na sua fase de maior exigência hídrica, que corresponde à fase reprodutiva. Esses dados estão apresentados na figura 9 e correspondem aos dias 13 e 20/05/2003, sendo que nesse período a precipitação total foi de 50,0 mm, correspondendo, conseqüentemente, a um período de umedecimento do solo. Os dados de umidade volumétrica do solo e de potenciais matricial e total da água no solo foram obtidos no sítio 1.

O umedecimento do solo nesse período ocorreu até a profundidade de 80 cm (Figura 9A), sendo que nas profundidades de 90, 100, 110 e 120 cm praticamente não houve variação da umidade volumétrica. Independentemente dos dias analisados, os maiores valores de umidade volumétrica do solo ocorreram nas profundidades de 40 a 60 cm, o que talvez se explique pelo maior teor de argila nessas profundidades (Tabela 1).

Como já dito anteriormente, o total de precipitação pluvial nesse período foi de 50,0 mm, o que contribuiu para um grande aumento de umidade volumétrica entre os dias analisados. Por exemplo, na camada de 0-60 cm ocorreu uma variação de armazenamento de água nesse período de 20 mm.

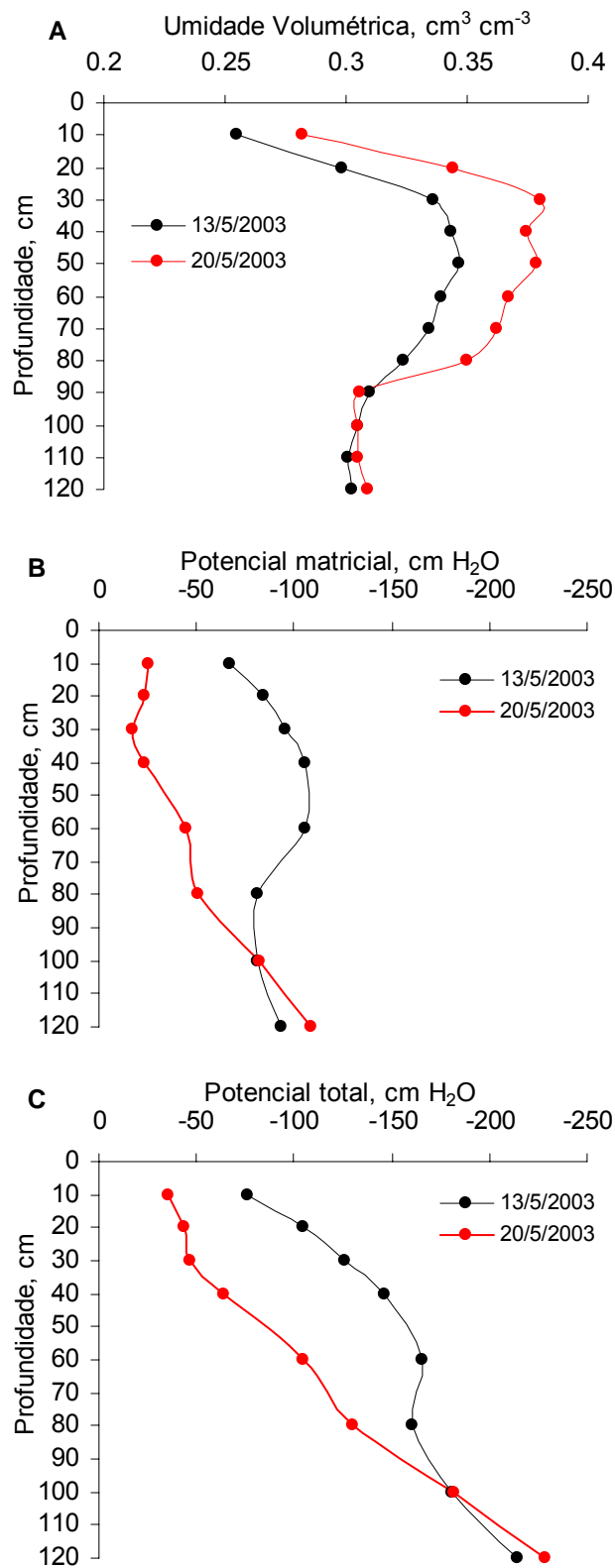


Figura 9. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potenciais matricial e total da água no solo para os dias 13/05/2003 e 20/05/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C representam umidade volumétrica, potencial matricial e potencial total, respectivamente.

Do mesmo modo que nas figuras anteriores (Figuras 7A, 7B, 8A e 8B), os perfis de potenciais matricial (Figura 9B) e total (Figura 9C) estão condizentes com o período de umedecimento do solo. E tendo em vista nesse período, 13/05/2003 a 20/05/2003, ter chovido 50,0 mm, algo em torno de 15% do total precipitado no período do monitoramento, os perfis de potencial total (Figura 9C) demonstram coerência, uma vez que se tem apenas o fenômeno de drenagem interna, ou seja, o movimento de água no solo está se dando unicamente no sentido descendente.

4.2 Umidade volumétrica, potenciais matricial e total da água no solo no período de 22/07/2003 a 22/10/2003

Os dados da evolução da umidade volumétrica do solo e da precipitação pluvial para os sítios 1, 2 e 3 durante o período de 22/07/2003 a 22/10/2003 são apresentados na figura 10. Esse período de estudo se caracteriza por apresentar uma quantidade de precipitação pluvial de 241,7 mm, bem inferior ao período anterior que foi de 341,4 mm.

Do mesmo modo que ocorreu no primeiro período, 11/03/2003 a 30/05/2003, a umidade volumétrica do solo seguiu a variação da precipitação pluvial. A precipitação pluvial apresentou seu maior evento, 30,3 mm, no dia 16/08/2003, representando 12,5% de toda a precipitação pluvial do período. Além desse dia, apenas mais dois dias alcançaram valores acima de 20 mm, quais sejam: 23/08/2003 com 25,0 mm, e 17/10/2003 com 24,3 mm. Observa-se, ainda, na figura 10, independentemente do sítio analisado, que existiu um período de déficit hídrico no solo, o qual ocorreu de 11/09/2003 a 08/10/2003.

Observando-se a figura 10 mais detalhadamente, vê-se que, do mesmo modo que ocorreu no primeiro período (Figura 4), as camadas mais superficiais (10 e 20 cm) apresentam maiores variações nos valores de umidade volumétrica, enquanto nas camadas mais profundas (40, 60 e 80 cm) as amplitudes de variação dos valores de umidade volumétrica são menores.

No sítio 1 (Figura 10A) as camadas de 40, 60 e 80 cm apresentam valores de umidade volumétrica do solo muito próximos entre si, o mesmo ocorrendo para o sítio 3. Já no sítio 2, a camada de 40 cm é a que apresenta os maiores valores de umidade volumétrica.

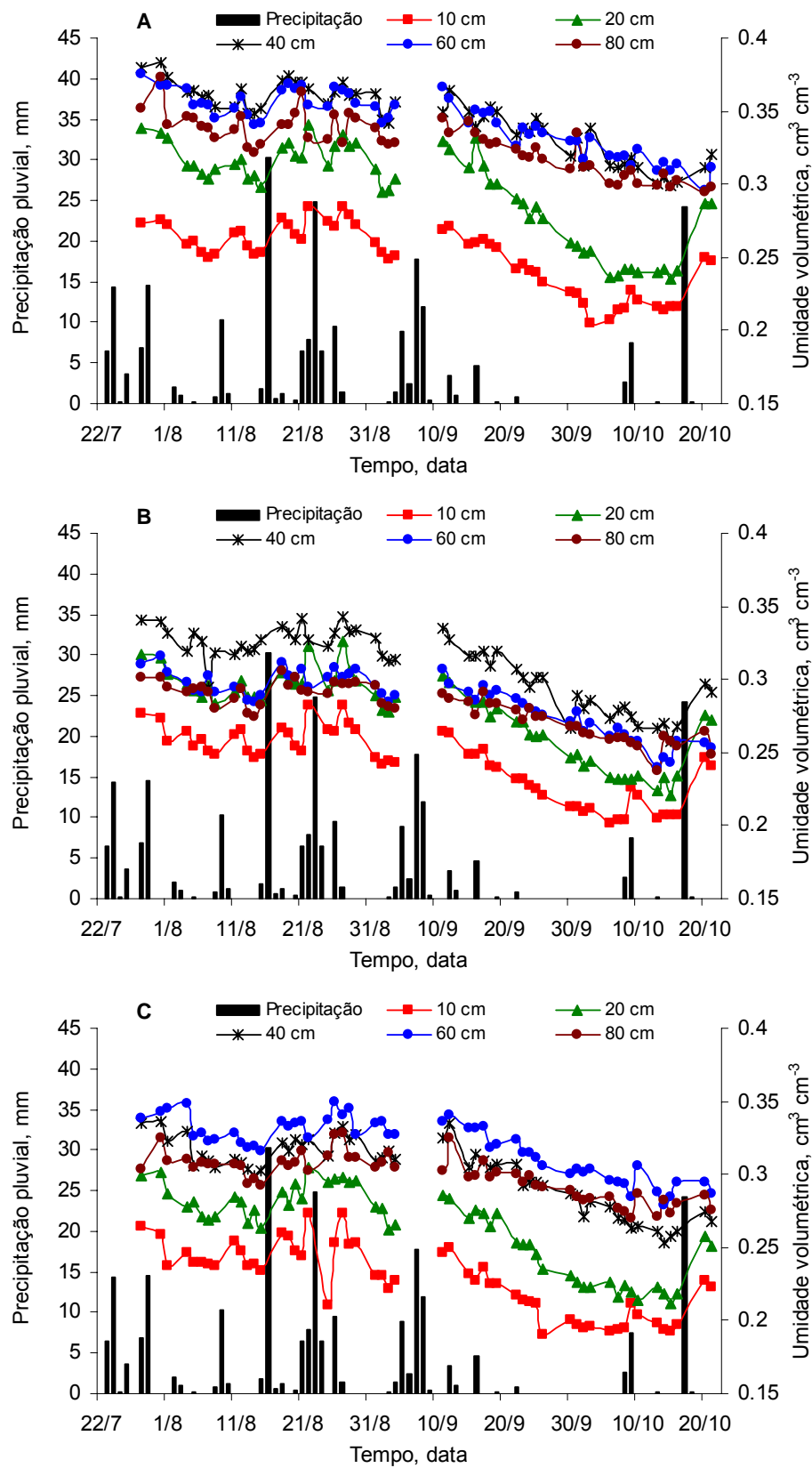


Figura 10. Evolução da umidade volumétrica do solo e da precipitação pluvial durante o período de 22/07/2003 a 22/10/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C são referentes aos sítios 1, 2 e 3, respectivamente.

Do mesmo modo que foi feito para o primeiro período de cultivo do feijão caupi, 11/03/2003 a 30/05/2003, será apresentada na figura 11 as médias das umidades volumétricas, com seus respectivos desvios padrão, correspondentes aos sítios 1, 2 e 3, para as profundidades de 20, 40 e 60 cm, por razões já explicadas no primeiro período de cultivo do feijão caupi.

Observando-se a profundidade de 20 cm (Figura 11A) vê-se que o valor médio de umidade volumétrica se encontra abaixo dos valores do sítio 1 e acima dos valores do sítio 3, e muito semelhante ao do sítio 2. O comportamento da profundidade de 40 cm (Figura 11B) é semelhante ao da profundidade de 20 cm. Já para a profundidade de 60 cm (Figura 11C) ocorre comportamento diferenciado dos outros dois sítios, com os valores do sítio 3 muito próximos aos valores médios.

Vale ressaltar que esse comportamento dos valores de umidade volumétrica do solo para os sítios 1, 2 e 3, bem como para os valores médios, são idênticos aos encontrados para o primeiro período de cultivo do feijão caupi. A única diferença se encontra nos valores de umidade volumétrica em si, já que no primeiro período, a umidade volumétrica é maior que a encontrada para este período. E da mesma forma que foi observada no primeiro período de cultivo, ocorreram diferenças irrelevantes entre os valores médios e os valores dos sítios 1, 2 e 3, como pode ser visto pelas barras de desvio.

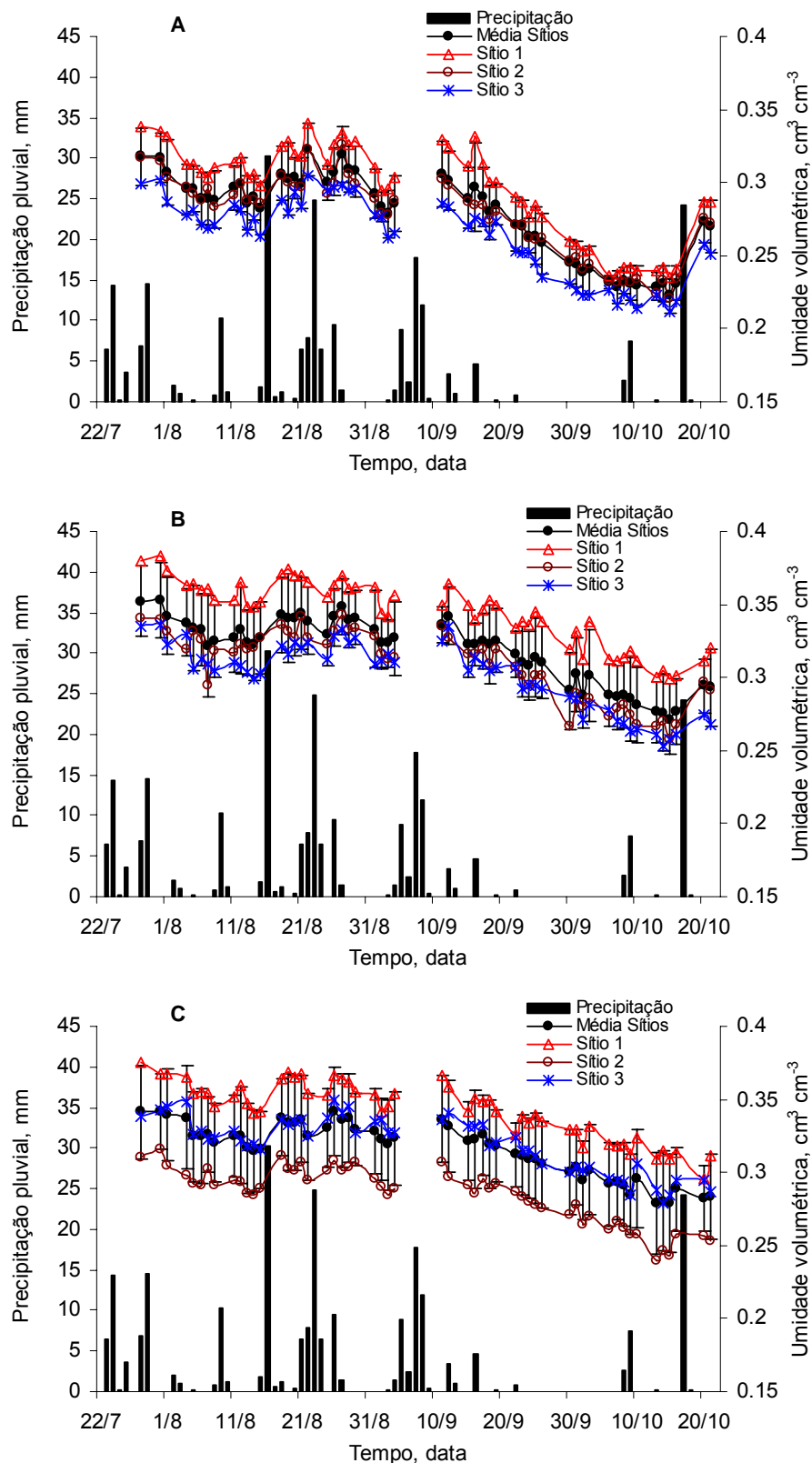


Figura 11. Evolução da umidade volumétrica do solo dos sítios 1, 2, 3, e da média dos 3 sítios, bem como da precipitação pluvial durante o período de 22/07/2003 a 22/10/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C são referentes às profundidades de 20, 40 e 60 cm, respectivamente. As barras indicam o desvio padrão

A evolução do potencial matricial da água no solo, juntamente com a evolução da precipitação pluvial, para os sítios 1, 2 e 3 durante o período de 22/07/2003 a 22/10/2003 é apresentada na figura 12. Observa-se, de um modo geral, para os sítios 1, 2 e 3, que a evolução do potencial matricial segue as variações da precipitação pluvial até o período de escassez das chuvas (20/09/2003), sendo que a partir desse período ocorre um mau funcionamento dos tensiômetros, que pode ser visto pelo aparecimento de valores muito pequenos e de valores positivos de potencial matricial.

Observa-se, independentemente do sítio analisado, que o potencial matricial da água no solo sofre maiores variações nas profundidades de 10 e 20 cm, o que é normal, haja vista essas profundidades estarem mais sujeitas aos efeitos diretos da demanda atmosférica e da extração da água pelas raízes.

Os dados apresentados na figura 12 contradizem o que se encontra normalmente na literatura com referência ao intervalo de funcionamento do tensiômetro. O intervalo de funcionamento do tensiômetro vai desde o solo saturado, ou seja, potencial matricial próximo de 0 cm H₂O, até -1,0 atm, ou seja, -1033,0 cm H₂O. No entanto, vê-se pela figura 12, que quando os valores de potencial matricial chegam próximos a -500 cm H₂O, ou seja, a metade do intervalo teórico de funcionamento, os tensiômetros já começam a não funcionar adequadamente. Assim sendo, infere-se que nas condições de estudo, o intervalo adequado de funcionamento dos tensiômetros para a medida do potencial matricial da água no solo é de 0 a -400 cm H₂O.

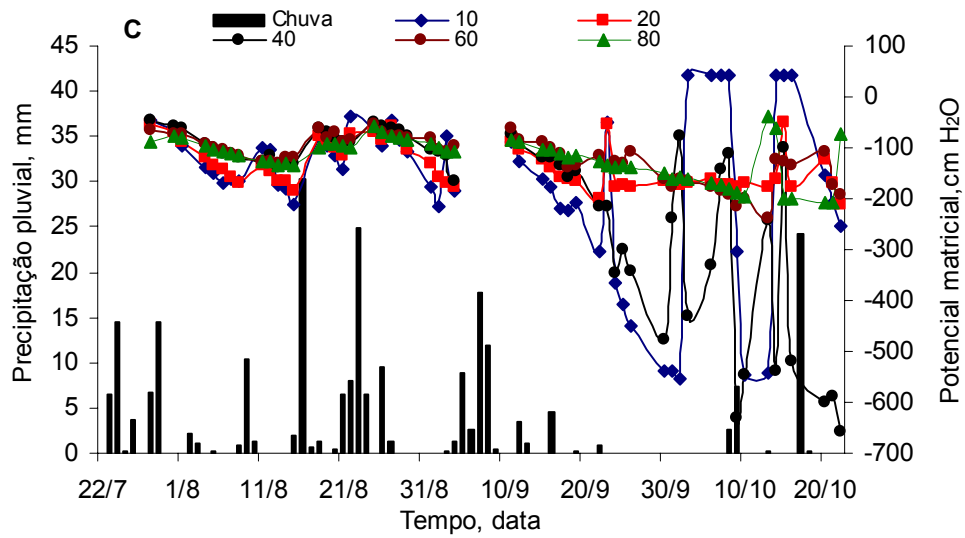
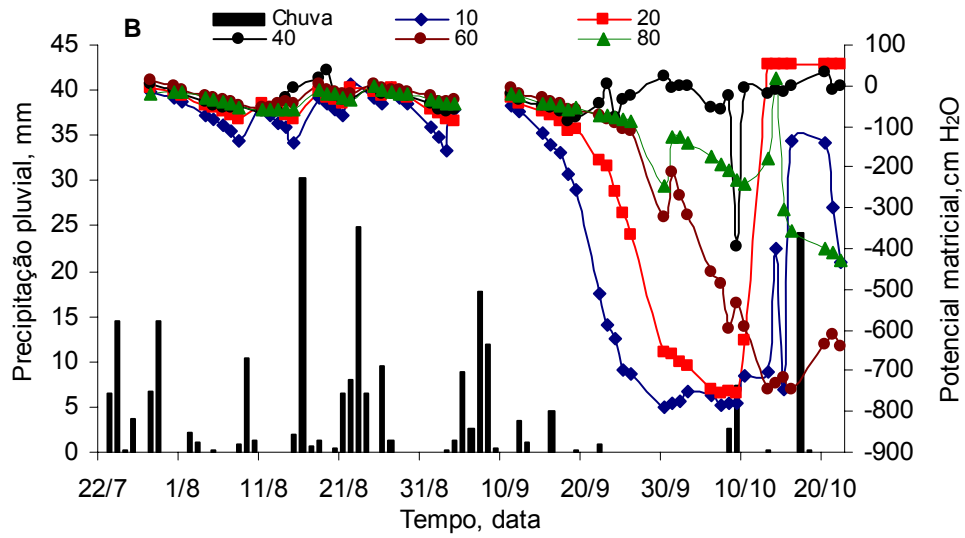
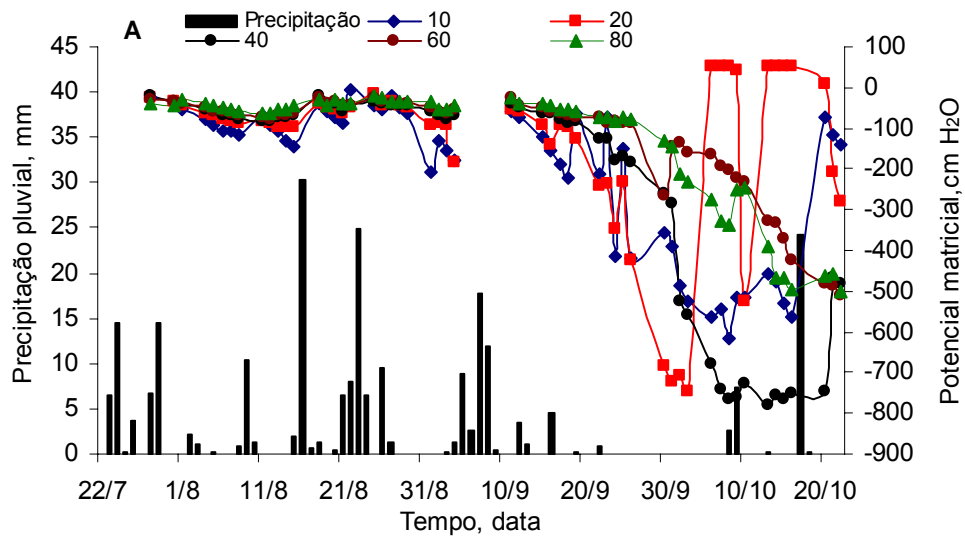


Figura 12. Evolução do potencial matricial da água no solo e da precipitação pluvial durante o período de 22/07/2003 a 22/10/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C representam os sítios 1, 2 e 3, respectivamente

Da mesma forma que foi feita para o primeiro período, a seguir serão mostrados os perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e de potencial total da água no solo, dos três sítios monitorados, em diferentes fases da cultura do feijão caupi.

Na figura 13A são apresentados perfis de umidade volumétrica do solo, obtidos do sítio 3, durante a fase de emergência do feijão caupi, para os dias 31/07/2003 e 05/08/2003. Vê-se, nessa figura, que esses dias analisados se caracterizam por um período de secamento do solo, uma vez que os valores de umidade volumétrica são maiores para todas as profundidades, com exceção da de 120 cm, no dia 31/07/2003 que no dia 05/08/2003.

Do mesmo modo que ocorreu para o primeiro período de cultivo do feijão caupi, os maiores valores de umidade volumétrica do solo se encontram na camada de 40-60 cm, o que se justifica, como já comentado anteriormente, pelo maior teor de argila existente nessas profundidades.

Quanto ao potencial matricial da água no solo (Figura 13B), vê-se que seus valores estão condizentes com os de umidade volumétrica, já que no dia 05/08/2003 os valores de potencial matricial são menores que os do dia 31/07/2003.

Quanto ao sentido do movimento de água no solo (Figura 13C), observa-se que no dia 31/07/2003 esse sentido é descendente, ou seja, está ocorrendo o processo de drenagem, o que está condizente com os valores de umidade volumétrica desse dia (Figura 13A). Já no dia 05/08/2003 começa a ocorrer um secamento do solo, principalmente nas camadas mais superficiais, e o sentido do movimento de água no solo é ascendente, da profundidade de 40 cm para as superiores, e descendente de 40 cm para as camadas mais profundas.

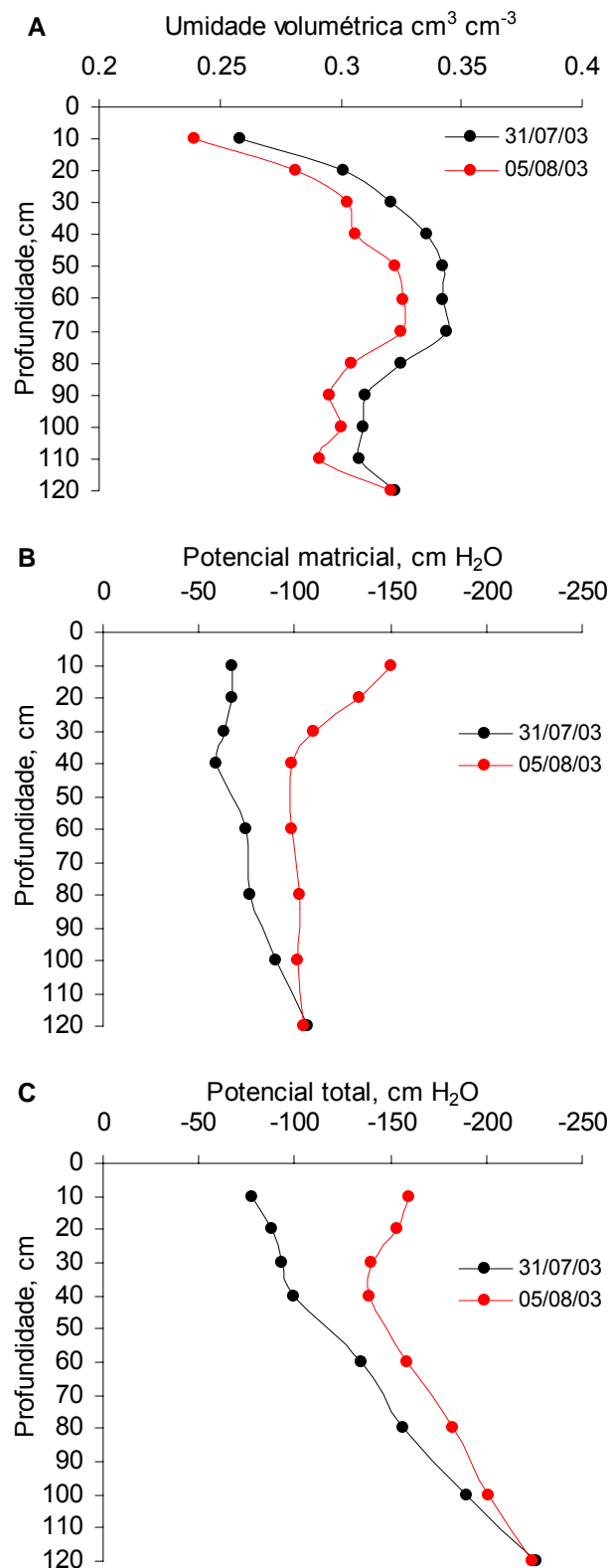


Figura 13. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potenciais matricial e total da água no solo para os dias 31/07/2003 e 05/08/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C representam umidade volumétrica, potencial matricial e potencial total, respectivamente.

Os dados dos perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e de potencial total da água no solo, para os dias 27/08/2003 e 02/09/2003, período no qual a cultura se encontrava na fase vegetativa são apresentados na figura 14.

Os valores de umidade volumétrica do solo (Figura 14A) mostram, novamente, que esse período se caracteriza como de secamento do solo, já que dos dias 21/08/2003 ao 27/08/2003 tinha ocorrido uma precipitação total de 57 mm, e de 28/08/2003 até 02/09/2003 não ocorreram precipitações pluviais.

Do mesmo modo que a figura anterior, os perfis de potencial matricial de água no solo (Figura 14B) estão concordantes com os dados de umidade volumétrica do solo, já que no dia 27/08/2003, dia mais úmido, os valores de potencial matricial estão maiores (menos negativos), principalmente para as camadas mais superiores (10 a 40 cm).

Com relação aos perfis de potencial total (Figura 14C), que indicam o sentido do movimento de água no solo, pode-se observar que no dia 27/08/2003 o perfil de potencial total indica que está ocorrendo movimento descendente de água no solo, ou seja, está ocorrendo uma drenagem da água das camadas mais superiores para as mais profundas. Já o dia 02/09/2003 indica que nas camadas mais superiores (10-30 cm) está ocorrendo um movimento ascendente de água no perfil de solo, sendo que o inverso está ocorrendo para as outras profundidades. Esse comportamento do dia 02/09/2003 mostra muito bem o processo dinâmico que é o movimento de água no interior do solo.

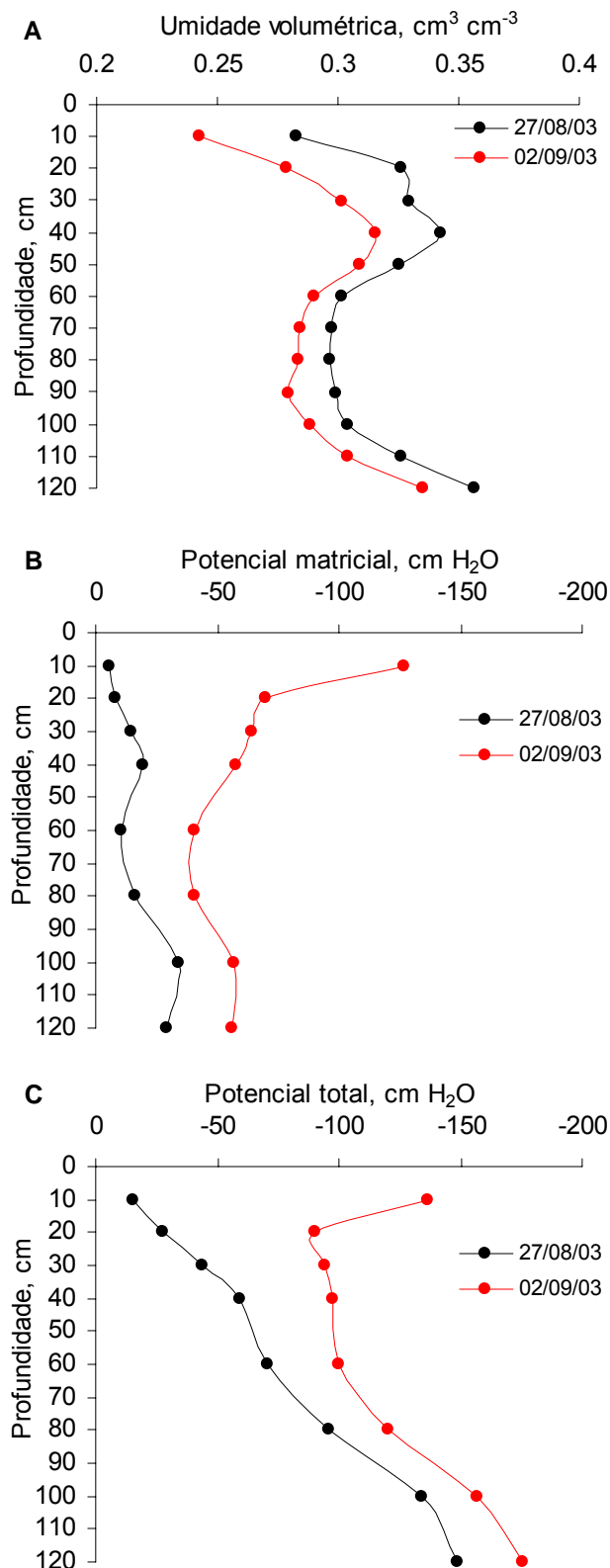


Figura 14. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potenciais matricial e total da água no solo para os dias 27/08/2003 e 02/09/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C representam umidade volumétrica, potencial matricial e potencial total, respectivamente.

A figura 15 apresenta os perfis de umidade volumétrica do solo (Figura 15A), de potencial matricial (Figura 15B) e de potencial total (Figura 15C) da água no solo para os dias 12 e 18/09/2003, período em que a cultura se encontrava na fase reprodutiva. Os dados foram obtidos do sítio 1.

Observa-se, independentemente do dia analisado, que os maiores valores de umidade volumétrica do solo estão concentrados nas camadas de 40 a 60 cm. Do mesmo modo que as figuras anteriores (Figuras 13 e 14) está ocorrendo um secamento do solo.

Os perfis de umidade volumétrica do solo para os dias 12 e 18/09/2003 ilustram muito bem o processo de secamento do solo, já que do dia 12/09/2003 ao dia 18/09/2003 ocorreu uma precipitação total de somente 9,0 mm. Pela figura 15A, pode-se afirmar que esse total não foi suficiente para manter o solo úmido e atender à demanda de água pela cultura, que é máxima nessa fase fenológica.

Quanto aos valores de potencial matricial da água no solo (Figura 15B), nota-se, mais uma vez, que os mesmos estão condizentes com os valores de umidade volumétrica do solo, demonstrando a confiabilidade dos tensiômetros, pelo menos quando o solo se encontra com maior valor de umidade volumétrica.

De um modo geral, os dias 12 e 18/09/2003 se caracterizam por apresentar movimento descendente de água no perfil de solo (Figura 15C), exceção feita às camadas mais superficiais (10 a 40 cm) para o dia 18/09/2003, onde está ocorrendo um movimento ascendente.

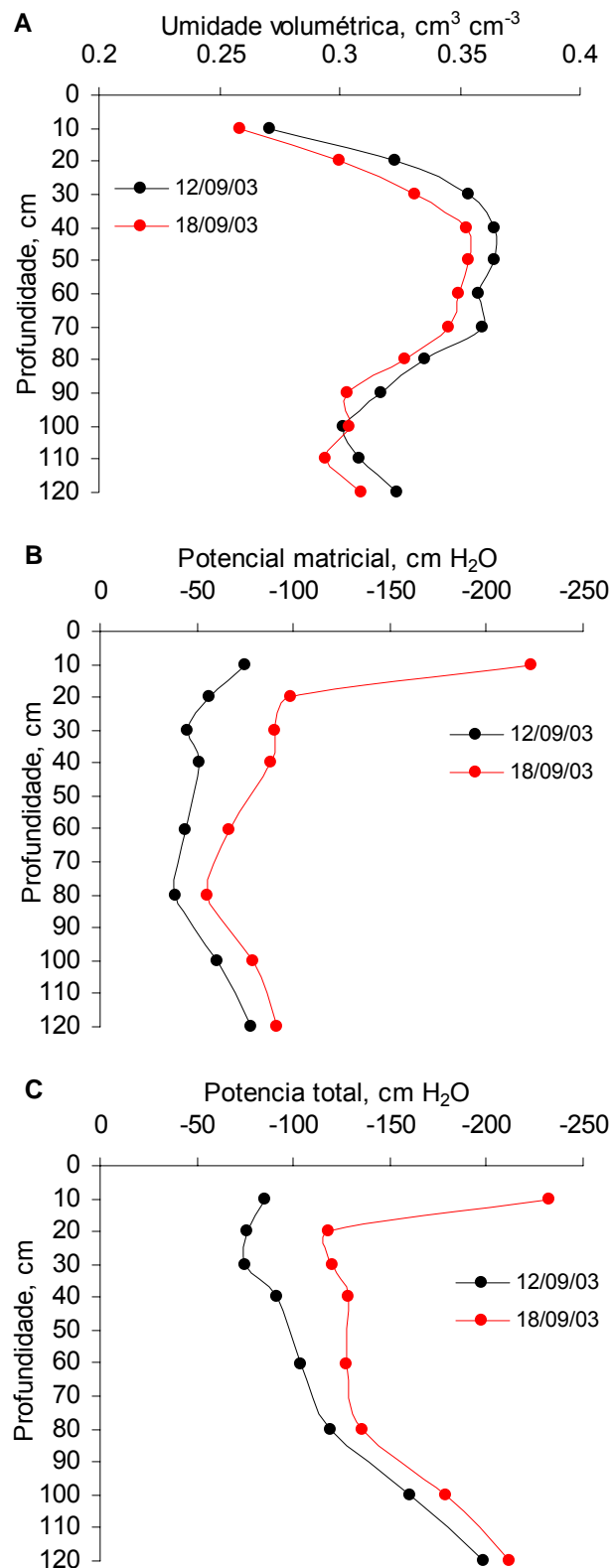


Figura 15. Perfis de umidade volumétrica do solo, de potencial matricial e total da água no solo para os dias 12/09/2003 e 18/09/2003 em Areia-PB. As letras A, B e C representam umidade volumétrica, potencial matricial e potencial total, respectivamente.

Pelos dados apresentados nas figuras 4 a 9, vê-se que a cultura do feijão caupi, durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003, não passou por estresse hídrico, mesmo quando existiu veranico, a exemplo do período compreendido entre os dias 11/04/2003 a 17/04/2003.

Já para o período de 22/07/2003 a 22/10/2003, observa-se, pelas figuras 10 a 15, que ocorreu o inverso, ou seja, existiram períodos em que a cultura do feijão caupi sofreu déficit hídrico, principalmente no período de 11/09/2003 a 08/10/2003. Deve se ressaltar, que é justamente nesse período que o feijão caupi necessita de uma maior quantidade de água no solo, uma vez que o mesmo se encontrava na fase reprodutiva.

4.3 Curvas de retenção, $\theta(h)$, e de condutividade hidráulica do solo $K(\theta)$

A seguir serão apresentadas as duas principais características utilizadas para se descrever a dinâmica da água no solo, que são as curvas de retenção da água no solo e de condutividade hidráulica do solo.

Como foi visto nas figuras 6A e 6B, para o período de 11/03/2003 a 30/05/2003, e nas figuras 12A, 12B e 12C, para o período de 22/07/2003 a 22/10/2003, o funcionamento dos tensiômetros ficou inadequado quando o solo se encontrava mais seco (potencial matricial < -500,0 cm H₂O). Tendo em vista que para a confecção da curva de retenção de água no solo se necessita de uma ampla faixa de variação de umidade volumétrica e de potencial matricial, e como não se dispunha desses dados, principalmente de potencial matricial, utilizou-se a metodologia Beerkan (descrita no Material e Métodos, seção 3.2.3) para se obter os parâmetros da equação de van Genuchten (equação 8).

Esses parâmetros (α e n), que estão apresentados na Tabela 2, foram usados para a obtenção do potencial matricial da água, e conseqüentemente, para a confecção da curva de retenção (Figura 16). Além disso, o parâmetro η , juntamente com o valor de condutividade hidráulica saturada (K_s), foi usado para a obtenção da curva de condutividade hidráulica em função da umidade, ou seja, de $K(\theta)$ (Figura 17).

Tabela 2. Valores dos parâmetros da curva de retenção da água no solo $h(\theta)$ e da condutividade hidráulica saturada (K_s) para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm.

Profundidade cm	θ_s $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	α cm^{-1}	n	η	K_s mm d^{-1}
20 cm	0,438	0,042	2,316	9,337	94,59
40 cm	0,432	0,019	2,370	8,401	77,26
60 cm	0,409	0,012	2,382	8,230	26,77
80 cm	0,442	0,014	2,388	8,160	48,82

Na figura 16 são apresentadas as curvas de retenção da água no solo para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm. Essas curvas foram obtidas usando os parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten (equação 8).

Observa-se que a profundidade de 20 cm se apresenta como a que retém menos água, a profundidade de 80 cm é a que retém mais água, e as profundidades de 40 e 60 cm apresentam comportamento intermediário.

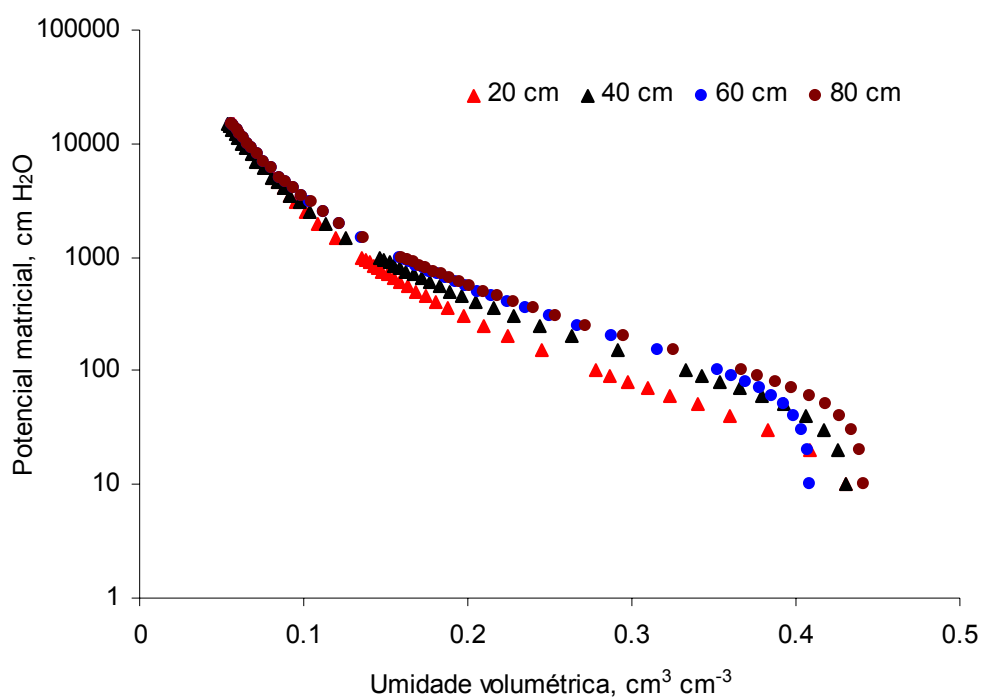


Figura 16. Curva de retenção de água no solo para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm em Areia-PB.

Considerando-se que para este tipo de solo a umidade volumétrica na capacidade de campo corresponde a um potencial matricial de $-103,3 \text{ cm H}_2\text{O}$ ($-0,1 \text{ atm}$), observa-se na Figura 16 que existiram diferenças nos valores da capacidade de campo. A profundidade de 20 cm é a que apresenta menor valor de capacidade de campo ($0,275 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), ocorrendo um aumento do valor da capacidade de campo para $0,329$, $0,350$ e $0,364 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente, para as profundidades de 40, 60 e 80 cm.

Observa-se, ainda na figura 16, ao contrário da capacidade de campo, que não existiram diferenças no ponto de murcha permanente (potencial matricial de $-15.000 \text{ cm H}_2\text{O}$). Os valores de ponto de murcha permanente foram iguais a $0,057$, $0,054$, $0,056$ e $0,056 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, respectivamente.

Na figura 17 são apresentadas as curvas de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica do solo, nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm.

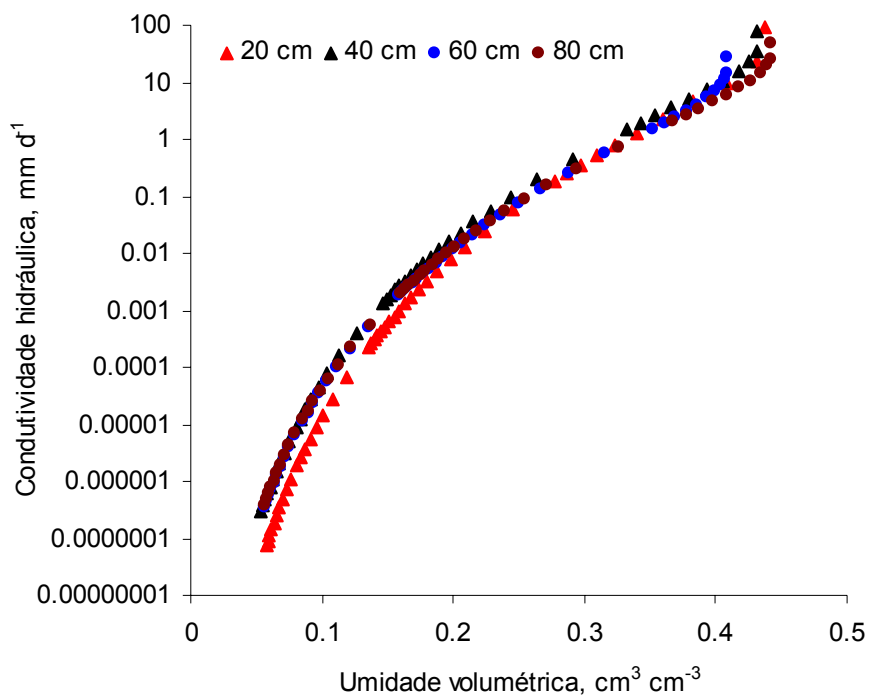


Figura 17. Curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica do solo para as profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm em Areia-PB.

Observando-se a figura 17, vê-se que a profundidade de 20 cm foi a única que apresentou comportamento diferenciado das demais profundidades, principalmente quando o solo se encontrava com um menor valor de umidade volumétrica. Já quando o solo tinha um maior valor de umidade volumétrica, vê-se que a profundidade de 60 cm apresentou

comportamento diferenciado das demais, a qual apresentou um valor de condutividade hidráulica saturada (K_s) bem menor que as demais profundidades (Tabela 2).

4.4 Avaliação dos componentes do balanço hídrico durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003

Neste tópico serão apresentados os resultados dos componentes do balanço hídrico para o solo cultivado com feijão caupi, durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003 em Areia-PB.

4.4.1 Evolução do fluxo de água no solo

A evolução do fluxo de água no solo, na profundidade de 60 cm, bem como da precipitação pluvial, estão apresentados na figura 18. Observa-se que o fluxo de água no solo para os dois períodos de cultivo do feijão caupi, 11/03/2003 a 30/05/2003 (Figura 18A) e 28/07/2003 e 22/10/2003 (Figura 18B) ocorreu apenas no sentido descendente (valores negativos), ou seja, ocorreu nesses dois períodos de cultivo o fenômeno da drenagem interna. Vale ressaltar, que esses valores de fluxo de água (drenagem interna) são valores médios dos três sites de medição.

Observa-se na figura 18A que a variação do fluxo de drenagem no solo seguiu as variações da precipitação pluvial, com o maior valor (-3,05 mm) observado no dia 06/05/2003. Esse elevado valor de drenagem nesse dia pode ser explicado devido à quantidade de precipitação pluvial ocorrida do período de 22/04/2003 a 05/05/2003, que foi de 45,6 mm. Partindo desse pressuposto, pode-se dizer que a lacuna existente entre alguns dias nas leituras de umidade volumétrica e de potencial total deve ter causado influência na estimativa do fluxo de água no solo. Por exemplo, do período de 18 a 25/04/2003 ocorreu uma precipitação de 65,0 mm, sendo que a drenagem de água no solo no dia 25/04/2003 foi de apenas -1,02 mm. Nesse período, as leituras de umidade volumétrica e de potencial total ocorreram no dia 17/04/2003 e depois somente no dia 25/04/2003.

A quantidade total de drenagem no período de 11/03/2003 a 30/05/2003 (Figura 18A) foi de 50,6 mm, com um valor médio de 1,3 mm d⁻¹.

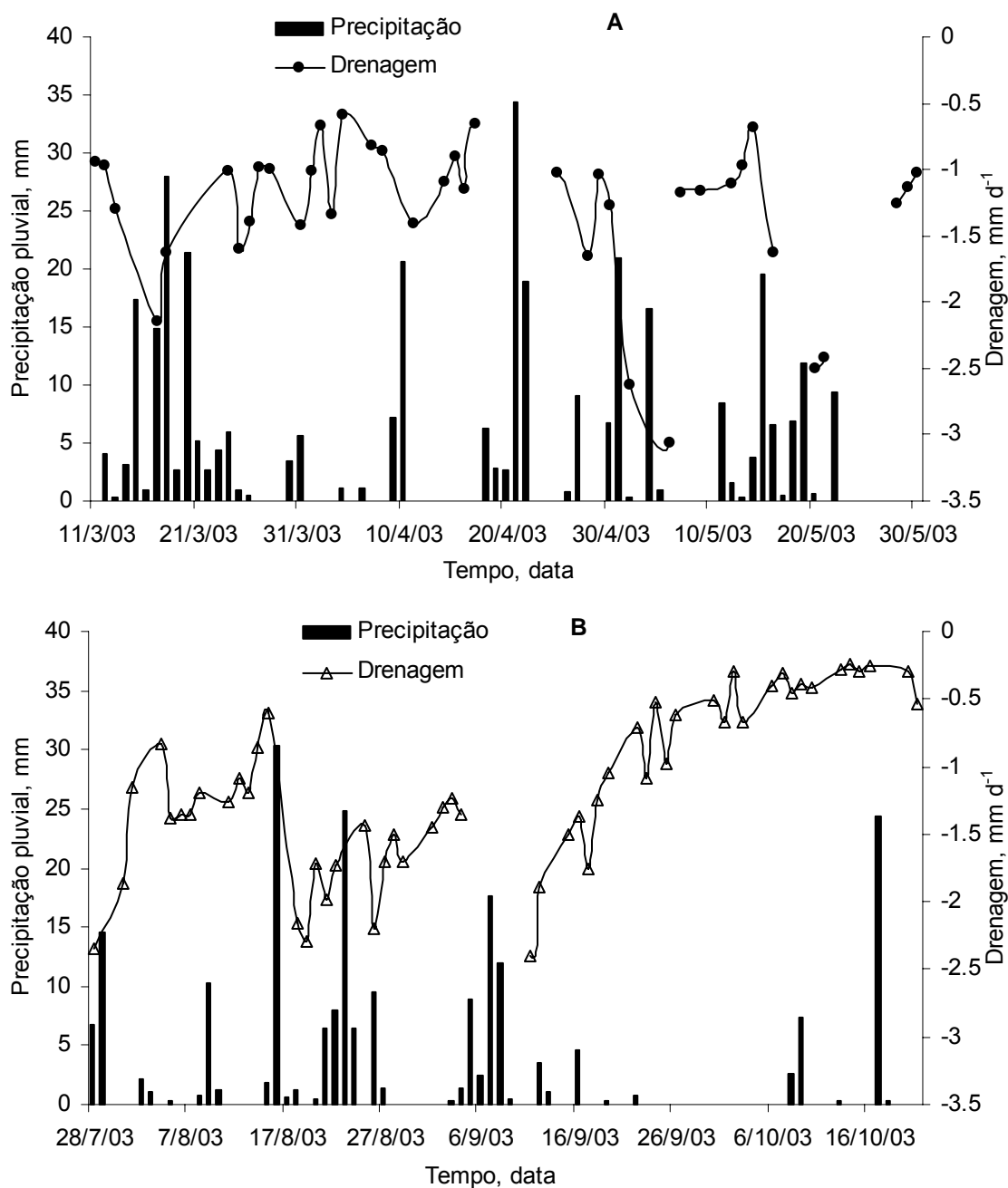


Figura 18. Evolução da drenagem e da precipitação pluvial num solo cultivado com feijão caupi em Areia-PB, durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 (A) e de 28/07/2003 a 22/10/2003 (B)

E do mesmo modo que ocorreu no primeiro período de cultivo do feijão caupi, a variação do fluxo de água no solo no segundo período (Figura 18B) seguiu as variações da precipitação pluvial. A quantidade de drenagem ocorrida no solo no período de 28/07/2003 a 22/10/2003 foi de 61,4 mm e o valor médio foi de 1,1 mm d⁻¹, sendo que o maior valor (-2,4

mm) ocorreu no dia 11/09/2003. Esse elevado valor de drenagem nesse dia explica-se devido a quantidade de precipitação ocorrida no período de 04 a 11/09/2003, que foi de 43,0 mm.

Observa-se, ainda, na figura 18B, que no período de 18/09/2003 a 07/10/2003 ocorreu uma escassez das precipitações pluviais, o que ocasionou um déficit hídrico no solo, e conseqüentemente, os valores de drenagem foram quase nulos. Desse modo, conclui-se que no período 28/07/2003 a 22/10/2003 não deve ter ocorrido uma subestimativa da drenagem de água no solo, como ocorreu para o período anterior (Figura 18A).

Essa constatação é corroborada pelos valores totais de drenagem ocorridas nos dois períodos de cultivo, uma vez que no primeiro período (Figura 18A) o valor total de drenagem (50,6 mm) foi menor que a do segundo período (Figura 18B), que foi de 61,4 mm, mesmo a precipitação total (314,4 mm) do primeiro período sendo bem maior que a do segundo (216,9 mm).

4.4.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico foi efetuado considerando-se o perfil de solo de 0-60 cm, tendo em vista essa profundidade englobar todo o sistema radicular da cultura. O período de 11/03/2003 a 30/05/2003, totalizou 80 dias, sendo que eles foram divididos em 11 subperíodos, sendo 8 subperíodos com 7 dias, 1 com 5 dias, 1 com 9 dias e 1 com 10 dias. Já o período de 28/07/2003 a 22/10/2003, que totalizou 85 dias, foi dividido em 12 subperíodos, sendo 8 subperíodos com 7 dias, 2 com 6 dias, 1 com 8 dias e 1 com 9 dias. A não uniformidade dos subperíodos, ou seja, número de dias desiguais entre eles foi devido ao fato de que as leituras de umidade volumétrica e de potencial total do solo apresentaram algumas lacunas.

Na Figura 19 e nas Tabelas 3 e 4, estão apresentados os dados referentes aos componentes do balanço hídrico no solo para os dois períodos de cultivo do feijão caupi. Esses dados são valores médios obtidos nos três sítios de medição.

Observa-se na Figura 19 e nas Tabelas 3 e 4, independentemente do período de cultivo do feijão caupi, que a variação do armazenamento de água no solo (ΔA) seguiu as variações da precipitação pluvial, sendo seu valor total de 0,72 mm e -29,1 mm, para os primeiro e segundo períodos, respectivamente.

Os valores de drenagem (D), como já comentado anteriormente, também seguiram as variações da precipitação pluvial, sendo que deve ter ocorrido uma subestimativa de seus valores no primeiro período de cultivo (Figura 19A e Tabela 3), principalmente nos subperíodos mais chuvosos.

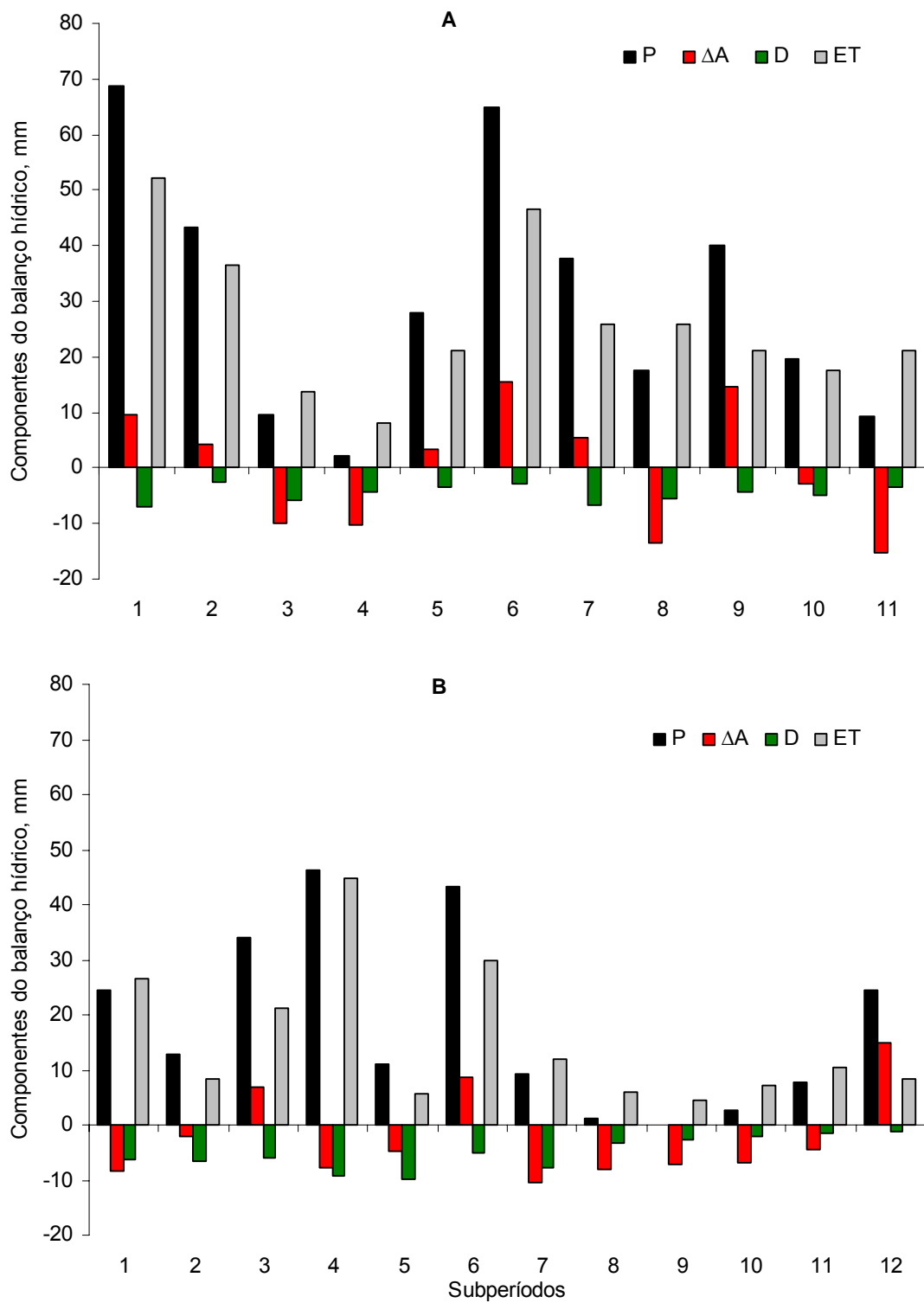


Figura 19. Componentes do balanço hídrico num solo cultivado com feijão caupi em Areia-PB, durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 (A) e de 28/07/2003 a 22/10/2003 (B)

Tabela 3. Componentes do balanço hídrico durante o período de 11/03/2003 a 30/05/2003.

Subperíodo	P	ΔA	D	ET
1 – 11/03/2003 a 18/03/2003	68,8	9,6	-7,0	52,3
2 – 18/03/2003 a 25/03/2003	43,3	4,2	-2,6	36,5
3 – 25/03/2003 a 01/04/2003	9,6	-10,1	-5,8	13,8
4 – 01/04/2003 a 08/04/2003	2,2	-10,2	-4,3	8,1
5 – 08/04/2003 a 15/04/2003	27,8	3,3	-3,4	21,1
6 – 15/04/2003 a 25/04/2003	65,0	15,6	-2,8	46,6
7 – 25/04/2003 a 02/05/2003	37,8	5,3	-6,6	25,9
8 – 02/05/2003 a 09/05/2003	17,6	-13,6	-5,4	25,8
9 – 09/05/2003 a 16/05/2003	40,2	14,6	-4,4	21,2
10 – 16/05/2003 a 21/05/2003	19,7	-2,7	-4,9	17,5
11 – 21/05/2003 a 30/05/2003	9,4	-15,3	-3,4	21,3
Total	341,4	0,72	-50,60	290,1

Tabela 4. Componentes do balanço hídrico durante o período de 28/07/2003 a 22/10/2003.

Subperíodo	P	ΔA	D	ET
1 – 28/07/2003 a 04/08/2003	24,5	-8,4	-6,2	26,7
2 – 04/08/2003 a 11/08/2003	12,7	-2,1	-6,6	8,3
3 – 11/08/2003 a 18/08/2003	34,1	6,9	-5,9	21,3
4 – 18/08/2003 a 25/08/2003	46,2	-7,6	-9,2	44,7
5 – 25/08/2003 a 02/09/2003	10,9	-4,7	-9,9	5,7
6 – 02/09/2003 a 11/09/2003	43,3	8,6	-5,0	29,7
7 – 11/09/2003 a 18/09/2003	9,2	-10,4	-7,8	11,9
8 – 18/09/2003 a 24/09/2003	1,1	-8,1	-3,4	5,8
9 – 24/09/2003 a 01/10/2003	0,0	-7,2	-2,8	4,4
10 – 01/10/2003 a 08/10/2003	2,6	-6,8	-2,1	7,2
11 – 08/10/2003 a 15/10/2003	7,7	-4,4	-1,6	10,5
12 - 15/10/2003 a 22/10/2003	24,6	15,0	-1,1	8,5
Total	216,9	-29,1	-61,40	184,6

Com relação à evapotranspiração (ET), observa-se na Figura 19A e na Tabela 3 que seus valores estão coerentes com os valores de precipitação pluvial ocorrida no período, ou seja, os maiores valores de ET ocorreram nos subperíodos de maior disponibilidade hídrica. Do mesmo modo, os valores de ET para o segundo período de cultivo do feijão caupi (Figura 19B e Tabela 4) estão coerentes com os valores de precipitação pluvial.

Observa-se, ainda, na Tabela 4 que os valores de ET foram bem menores que os valores de ET ocorridos no primeiro período de cultivo do feijão caupi (Tabela 3). O valor total de ET para o primeiro período foi de 290,1 mm e o valor médio foi de 3,62 mm d⁻¹, enquanto que para o segundo período foi de 184,6 mm e 2,14 mm d⁻¹. Essa diferença nos valores totais e médios entre a ET ocorrida nos dois períodos de cultivo do feijão caupi, explica-se devido à quantidade de precipitação pluvial, a qual foi bem maior no primeiro que no segundo período de cultivo do feijão caupi. Essa menor quantidade de precipitação pluvial no segundo período contribuiu, ainda, para um menor desenvolvimento e crescimento da cultura do feijão caupi, o que também contribuiu para os menores valores de ET observados no segundo período de cultivo do feijão caupi.

4.5 Evapotranspiração de referência (ET_o) durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003

Na figura 20 são apresentados os dados referentes à evapotranspiração de referência (ET_o) acumulada durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 (Figura 20A) e de 28/07/2003 a 22/10/2003 (Figura 20B), além da evapotranspiração real (ET), obtida pelo balanço hídrico, e da precipitação pluvial.

Pode-se observar na Figura 20A, primeiro período de cultivo do feijão caupi, que a evapotranspiração real (ET) está com um valor acumulado (290,1 mm) muito próximo do valor da demanda da atmosfera, representada pela ET_o (309,2 mm), sendo a diferença de apenas 19 mm.

Para o segundo período de cultivo do feijão caupi (Figura 20B) observa-se que a ET durante todo período de cultivo sempre esteve menor que a ET_o, sendo os valores totais de 184,6 mm e 365,0 mm para a ET e ET_o, respectivamente. A diferença entre o valor total de ET_o e ET foi de 169 mm.

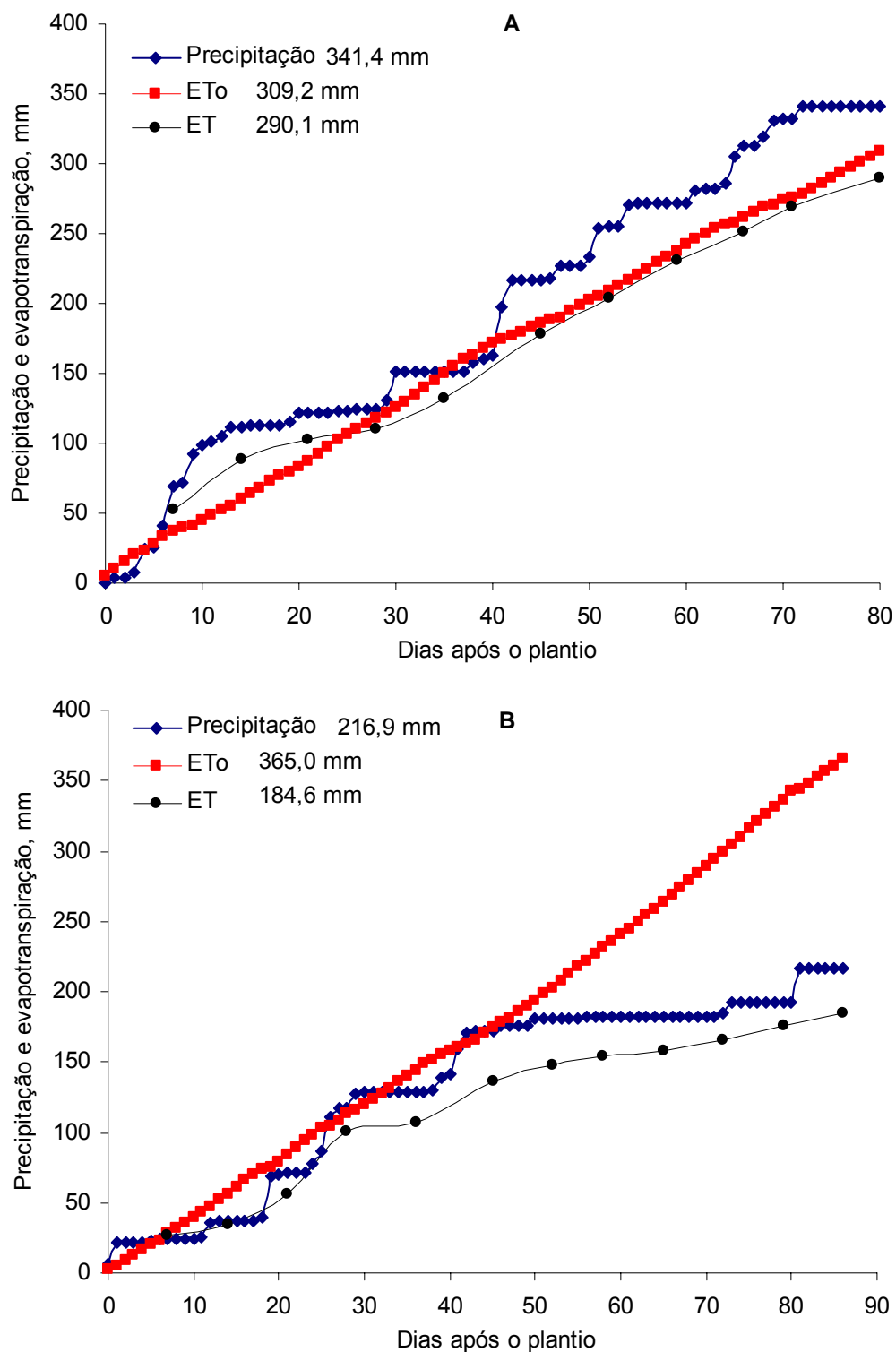


Figura 20. Valores acumulados de precipitação pluvial, evapotranspiração de referência (ETo) e real (ET) durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 (A) e de 28/07/2003 a 22/10/2003 (B) em Areia-PB

As maiores diferenças encontradas entre os valores totais de ETo e ET para o segundo período de cultivo do feijão caupi, demonstram claramente que a cultura sofreu estresse

hídrico, uma vez que não existia água suficiente no solo para que a cultura atendesse a demanda atmosférica, representada pela ETo. Já as pequenas diferenças encontradas no primeiro período de cultivo, indicam que o feijão caupi não sofreu estresse hídrico nesse período (11/03/2003 a 30/05/2003).

4.6 Produção e eficiência do uso de água do feijão caupi durante os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003

Os dados de produção de grãos (kg ha^{-1}) e de eficiência do uso de água (kg m^{-3}) do feijão caupi estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Produção, evapotranspiração (ET) e eficiência do uso de água (EUA) do feijão caupi, em Areia-PB

Período	Produção, kg ha^{-1}	ET, mm	*EUA, kg m^{-3}
11/03/2003 a 30/05/2003	888,5	290,1	0,31
28/07/2003 a 22/10/2003	205,9	184,6	0,11

* Obtida pela relação entre ET e produção

Observa-se nesta tabela que a produtividade do feijão caupi no período de 11/03/2003 a 30/05/2003 foi de $888,5 \text{ kg ha}^{-1}$ e no período de 28/07/2003 a 22/10/2003 foi de $205,9 \text{ kg ha}^{-1}$, com uma diferença de $682,6 \text{ kg ha}^{-1}$ entre os cultivos. Os valores de produtividade do feijão caupi para o primeiro período estão bem acima da média Nacional, que é de $303,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (IBGE, 2002), enquanto os do segundo período estão abaixo dessa média em cerca de 100 kg ha^{-1} . Bernardo et al. (1996) encontraram valores de produtividade do feijão caupi, na zona da mata norte de Pernambuco, de 548 kg ha^{-1} e de 1014 kg ha^{-1} , durante um período seco e um período chuvoso, respectivamente. Para as condições semi-áridas da Paraíba, Antonino et al. (2000) encontraram produtividades de 166 kg ha^{-1} , enquanto que para as condições de Parnaíba-PI; sob irrigação, Andrade Júnior et al. (2002) encontraram produtividades médias variando de $937,1$ a $2877,8 \text{ kg ha}^{-1}$.

A eficiência do uso de água (EUA) apresentou valores muito diferentes para o primeiro e segundo períodos de cultivo do feijão caupi. Os valores de EUA foram de 0,31 e $0,11 \text{ kg m}^{-3}$, para o primeiro e segundo período, respectivamente.

O valor da EUA para o primeiro período (11/03/2003 a 30/05/2003) está próximo daquele recomendado por Doorenbos & Kassam (1994) para feijão *phaseolus*, cujos valores

variam de 0,30-0,60 kg m⁻³. Já a EUA do segundo período está bem abaixo da reportada por Doorenbos & Kassam (1994).

Andrade Júnior et al. (2002) encontraram valores da EUA, para feijão caupi irrigado, variando de 0,48 a 0,72 kg m⁻³, dependendo da lâmina de irrigação aplicada. Bernardo et al. (1996), encontraram valores da EUA de 0,32 e 0,43 kg m⁻³, para períodos secos e chuvosos, respectivamente. Já Antonino et al. (2000) encontraram um dos mais baixos valores da EUA apresentados na literatura, cujo valor foi de 0,08 kg m⁻³, enquanto que Calvache et al. (1998) encontraram valores da EUA, para a cultura do feijão phaseolus, variando de 0,46 a 0,75 kg m⁻³. Essas discrepâncias entre os valores da EUA encontrados nos vários trabalhos podem ser em virtude da densidade de plantas, além da quantidade de água evapotranspirada, bem como do regime de plantio (sequeiro ou irrigado). Como exemplo, nesse trabalho a densidade de plantas foi de 40.000 plantas ha⁻¹ e o feijão caupi foi cultivado em condições de sequeiro, enquanto que no trabalho de Andrade Júnior et al. (2002), a densidade de plantas foi de 62.500 plantas ha⁻¹, sendo o feijão cultivado em condições irrigadas.

A grande diferença encontrada entre a EUA para os dois períodos de cultivo do feijão caupi, deve ter ocorrido devido, principalmente, a baixa produção de grãos encontrada no segundo período de cultivo (205,9 kg ha⁻¹). E essa baixa produção de grãos, não deve ter ocorrido unicamente pela menor disponibilidade hídrica, mas também devido a problemas térmicos, pois, sabe-se que o feijão caupi ou macassar é uma cultura que não é tolerante a temperaturas mais baixas, e, durante esse segundo período de cultivo do feijão (22/07/2003 a 22/10/2003) ocorrem as menores temperaturas anuais na região, principalmente, nos meses de julho e agosto.

5 CONCLUSÕES

O fluxo vertical de água no solo ocorreu somente no sentido descendente (drenagem interna), com valor total de 50,6 mm para o período de 11/03/2003 a 30/05/2003, e 61,4 mm para o período de 28/07/2003 a 22/10/2003.

Durante os períodos de maiores eventos de precipitação pluvial, principalmente ao longo do primeiro cultivo (sem estresse hídrico), houve uma subestimativa nos valores da drenagem interna devido à impossibilidade de medição da umidade volumétrica do solo nos dias chuvosos.

A evapotranspiração (ET) total estimada para o feijão caupi, cultivado em condições de sequeiro no Brejo Paraibano, foi de 290,1 mm para o período sem estresse hídrico que teve uma precipitação acumulada de 341,4 mm. Já para o segundo cultivo, período com estresse hídrico, a ET total foi de 184,6 mm, enquanto a precipitação totalizou 241,7 mm. Os valores médios diários de evapotranspiração foram 3,62 e 2,14 mm d⁻¹, respectivamente para os períodos de 11/03/2003 a 30/05/2003 e de 28/07/2003 a 22/10/2003.

O resultado da produção de grãos do feijão caupi (888,5 kg ha⁻¹), para o primeiro período de cultivo, indicou os meses de março e abril como a melhor época de cultivo desta cultura nas condições do Brejo Paraibano. Já a produção no segundo semestre foi bem inferior, alcançando apenas 205,9 kg ha⁻¹, indicando ser anti-econômico o cultivo sem irrigação do feijão caupi nessa época do ano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; Smith, M. **Crop evapotranspiration** - Guidelines for predicting crop water requirements, Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; RODRIGUES, B.H.N.; FRIZZONE, J.A.; CARDOSO, M.J.; BASTOS, E.A.; MELO, F.B. Níveis de irrigação na cultura do feijão caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.17-20, 2002.
- ANDRADE, C.L.T.; SEDIYAMA, G.C.; COUTO, L; SANS, L.M.A.; FERREIRA, P.A. Balanço hídrico num Latossolo Vermelho-Escuro álico cultivado com milho com irrigação por aspersão. **Agronômica Ceres**, São Paulo, v.35, p.89-104, 1988.
- ANTONINO, A.C.D.; SAMPAIO, E.V.S.B.; DALL'OLIO, A.; SALCEDO, I.H. Balanço hídrico em solo com cultivos de subsistência no semi-árido do nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p.29-34, 2000.
- ÁVILA NETTO, J.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B.; SOARES, J.M.; TEIXEIRA, A.H.C. Exigências hídricas da videira na região do submédio São Francisco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.1159-1566, 2000.
- AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.58, p.241-254, 2003.
- BARRETO, C.E.A.G. **Balanço Hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. São Carlos, USP. 2006. Dissertação de Mestrado.
- BELTRAME, L. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Cap. 7, p. 253, 3ª Edição. 2002.
- BERNARDO, A.L.; ANTONINO, A.C.D.; CARNEIRO, C.J.G.; DALL'OLIO, A. Evapotranspiração da cultura do feijão caupi na Zona da Mata de Pernambuco. In: CONGRESSO GERAL DE ENERGIA NUCLEAR, 4, 1996, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear, 1996. CD Rom.
- BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Cap. 5, p. 177, 3ª Edição. 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e fertilidade do Solo. Divisão de Agrologia – SUDENE. **Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro. 670p. 1972 (Boletim Técnico, 15).

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNVD/CLAV, 1992. 365p.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, v.3, Colorado State Univ. Fort Collins, 1964.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. Reidel: Dordrecht, 1982. 299p.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculation from size distribution data. **Trans.AIME**, v.198, p.71-78, 1953.

CALVACHE, A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Efeito de épocas de deficiência hídrica na evapotranspiração atual da cultura do feijão cv. Imbabello. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55, p.1-14, 1998.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: As simplificações do método do perfil instantâneo**. Piracicaba, 2002. 86f. Tese (Mestrado em Agronomia) – Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, p.23-28, 2000.

CORDEIRO, L.G.; BEZERRA, F.M.L.; SANTOS, J.J.A.; MIRANDA, E.P. Fator de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura do feijão Caupi (*Vigna unguiculata* (L). Walp.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, p.153-157, 1998.

CORRÊA, R.A.L. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura em dois ciclos de produção do maracujazeiro amarelo**. Piracicaba, USP. 2004. Dissertação de Mestrado.

COUTINHO, S.F.S. Geografia e uso da terra nos trópicos - Degradação dos recursos naturais nas áreas de “brejos” do agreste pernambucano. **1º Congresso Brasileiro de Tropicologia**. (Anais). Recife. 1986.

CRUZ, A.C.R.; LIBARDI, P.L.; CARVALHO, L.A.; ROCHA, G.C. Balanço de Água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de Citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.29, p.1-10, 2005 (a).

CRUZ, A.C.R.; LIBARDI, P.L.; ROCHA, G.C.; CARVALHO, L.A. Evapotranspiração real de uma cultura de laranja em produção num latossolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.29, p.659-668, 2005 (b).

De CONDAPPA, D.; SORIA UGALDE, J.M. **Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés**. Rapport interne HZNS-LTHE. 82 p. 2002.

DOMINGO, F.; VILLAGARCÍA, L.; Boer, M.M.; ALADOS-ARBOLEDAS, L.; PUIGDEFÁBREGAS, J. Evaluating the long term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modelling and hillslope runoff measurements. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.243, p.17-30, 2001.

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

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: FAO, p.179 (Irrigation and Drainage Paper, 24). 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, EMBRAPA – Serviço de Produção da Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA solos, 1999. 412p.

EVETT, S.R.; STEINER, J.L. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, n. 4, pp. 961-968, 1995.

FARIA, R.T.; CHIBANA, E.Y. Simulação do Balanço Hídrico do cafeeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL E WORKSHOP INTERNACIONAL DE CAFÉ & SAÚDE, 3., Porto Seguro. **Anais**. Brasília: Embrapa Café, p.79, 2003.

FUENTES, C. **Approche fractale des transferts hydriques dans les sols non-saturés**. Grenoble, 1992. Tese (Doutorado) - Université Joseph Fourier.

FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J.-Y.; HAVERKAMP, R. Soil water conductivity of a fractal soil. In: BAVEYE, P. et al. (eds) **Fractals in soil science**. CRC. 1998. p.333-340.

GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison: ASA; Madison: SSSA, 1986. p.493-544.

- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, Y.-Y. Predicting the water-retention curve from particle size distribution: I. Sandy soils without organic matter. **Soil Science**, v.1, n.142, p.325–339, 1986.
- HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v.30, p.2931-2935, 1994.
- HAVERKAMP, R.; BOURAOUI, F.; ZAMMIT, C.; ANGULO-JARAMILLO, R. Soil Properties and Moisture Movement in the Unsaturated Zone. In: DELLEUR, J. W. (Ed.) **The Handbook of Groundwater Engineering**. Cap. 5, p.1-47, 1999.
- IBGE, 2002. Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA: bando de dados agregados. Produção Agrícola Municipal. <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda>>
- JENSEN, M.E.; BEURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. (Eds). **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. ASCE Manuals No. 70, 1990. 332 p.
- KINZELBACH, W. A survey of methods of groundwater recharge in arid and semi-arid regions. **UNEP/DEWA/RS.02/2**. Nairobi, Kenia, 2002. ISBN 92-80702131-3.
- KLAR, A.E.; FERNANDES, M.A. Water needs for winter bean crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.54, n.3, p.1-10, 1997.
- LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA UGALDE, J.M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, p.521-532, 2006.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ, 1995. p.497.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ, 2ª edição, 2000.
- LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigada por pivô central em latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, p.529-532, 1994.
- LIMA, J.R.S. **Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para condições do Brejo Paraibano**. Recife: UFPE, 2004. Tese Doutorado
- LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOARES, W.A.; SOUZA, E.S.; LIRA; C.A.B.O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.1, p.89-95, 2006.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D; LIRA, C.A.B.O; SILVA,I.F.; NETTO, A.M.; SOUZA, J.C. Evaporação da água de um solo sem vegetação no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, São Paulo, v.4, n.3, p.1550-1555, 2002.

LOUZADA, J. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Cap. 9, p. 356, 3ª Edição. 2002.

MAC NISH, R.D.; UNKRICH, C.L.; SMYTHE, E.; GOODRICH, D.C.; MADDOCK III, T. Comparison of riparian evapotranspiration estimates based on a water balance approach and sap flow measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.105, p.271-279, 2000.

MARQUARDT, D.W. An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. **J. Soc. Indust. Appl. Mater.**, v.2, p.431-441, 1963.

MEDEIROS, G.A.; ARRUDA, F.B.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.49, p.211-224, 2001.

MORTON, F.I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology, **Journal of Hydrology**, n. 66, p.1-76, 1983.

MURRAY, F. W. On the computation of saturation vapor pressure. **J. Appl. Meteor**, v.6, p.203-204, 1967.

NETTO, A.M. **Condutividade Hidráulica não saturada de um solo podzólico vermelho amarelo da Zona da Mata de Pernambuco**. Recife: UFPE, 1994, p. 96. Dissertação de Mestrado.

OLIVEIRA, F.A.; SILVA, J.J.S.; CAMPOS, T.G.S. Evapotranspiração e desenvolvimento radicular do milho irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.28, n.12, p.1407-1415, 1993.

PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. **Hidrologia Aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Editora Evangraf. 2003.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, p.152-154, 2002.

PEREIRA, A.R.; FERRAZ, E.S.B.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. **Estimativa da evapotranspiração e da drenagem profunda em cafezais cultivados em solos podzolizados Lins e Marília**. Piracicaba:USP – CENA, 1974. 14p. (CENA. Boletim Científico, 14).

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

PHILIP, J.R. Theory of infiltration. **Adv. Hydrosci**, v.5, p.215-305, 1969.

PLAUBORG, F. Evaporation from bare soil in a temperate humid climate—measurement using micro-lysimeters and time domain reflectometry, **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.76, p.1-17, 1995.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Salesward-discovery. 1996. 446p

RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.13, p.125-153, 2000.

RASSINI, J.B. Manejo da água na irrigação da alfafa num Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 4, p. 503-507, 2002.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2 ed. Piracicaba: ESALQ/USP, p.513. 1996.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargil, 1990. 445p

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.U.; CADIMAZ, A. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.3, p.1-5, 1979.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, p. 478, 2004.

ROSE, C.W.; STERN, W.R. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as function of depth and time. **Australian Journal of Soil Research**, Sidney, v.5, p.11-19, 1967.

SANTOS, L. A. R. ; OLIVEIRA, M.C.F. ; GONCALVES, P. H. L. ; ATHAIDES JUNIOR, J. . Variabilidade da Precipitação e sua associação aos fenômenos El Niño e La Niña, Belém - PA. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Fóz do Iguaçu. Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, n.1, p.1-12, 1996.

SENTELHAS, P.C.; ANGELOCCI, L.R. **Balanço Hídrico**: BH Climatológico, normal e seqüencial, de cultura e para controle da irrigação. Aula 9, 2005.
<<http://www.lse.esalq.usp.br/aulas/lce306/aula9.pps>.>

- SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; BASSOI, L. M.; TEIXEIRA, A. H. C.; SOARES, J. M.; SILVA, J. A. M. Estimativa da evapotranspiração da mangueira com base no balanço hídrico do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 456-462, 2001
- SILVEIRA, G. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Cap. 2, p. 36, 2ª Edição. 1993.
- SILVEIRA, G.; TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Cap. 8, p. 285, 3ª Edição. 2002.
- SMITH, M. **Report on the export consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO. 1991.
- SOUZA, J.L.M.; FRIZZONE, J.A.; GERVÁSIO, E.S. Simulação do balanço hídrico climatológico decendial para a cultura do cafeeiro, na região de Lavras, MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 5., Araguari. **Anais**. Uberlândia: UFU, p. 156-161, 2002.
- STIKKER, A. Water today and tomorrow: prospects for overcoming scarcity. **Futures**, Great Britain, v. 30, n. 1, p. 43 – 62, 1998.
- TERZAGHI, K. **Hydrology**. Cap. 9, p. 332. 1942.
- TRAMBOUZE, W., BERTUZZI, P., VOLTZ, M. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.91, p.193-208, 1998.
- TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Cap. 11, p. 391, 3ª Edição. 2002.
- TUCCI, C.E.M.; BELTRAME, J. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Cap. 7, p. 253, 3ª Edição. 2002.
- VAN BAVEL, C.H.M.; STIRK, G.B. Soil water measurement with and Am²⁴¹-Be neutron source and an application to evaporimetry. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.5, p.40-46, 1967.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.
- VILLAGRA, M.M.; BACCHI, O.O.S.; TUON, R.L.; REICHARDT, K. Difficulties of estimating evaporation from the water balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.72, p. 317-325, 1995.
- WRIGHT, J.L.; JENSEN, M.E. Peak water requirements in southern Idaho. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v.98 (IR 2), p.193-201, 1972.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. Memorias del XIII Congreso Nacional de Irrigación Zacatecas, Zac., México. Mesa 7, Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje. 2003.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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