

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DE UM SOLO DE VÁRZEA SOB DUAS
CONDIÇÕES DE DRENAGEM E SUBIRRIGAÇÃO**

PABLO ROBERTO RIVERO YUJRA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP-FCA, Campus de
Botucatu, para a obtenção do título de Doutor em
Agronomia - Programa de Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP

ABRIL-2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”.
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DE UM SOLO DE VÁRZEA SOB DUAS
CONDIÇÕES DE DRENAGEM E SUBIRRIGAÇÃO**

PABLO ROBERTO RIVERO YUJRA

PROF. DR. AFFONSO MARIA DE CARVALHO
ORIENTADOR

PROF. DR. R. WAINE SKAGGS
CO-ORIENTADOR

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP-FCA, Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Doutor em Agronomia - Programa de Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP
ABRIL-2001

Aos meus pais Juan e Luisa e meus irmãos e irmãs, que aprenderam e que me ensinaram a viver neste mundo....

AGRADEÇO

Aos meus filhos Juan e Pakissa e minha mãe que mesmo ausente, vivem sempre no meu coração.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Sempre em primeiro lugar e em qualquer lugar, a Deus que vive dentro de mim, como guia no meu caminho.

Ao CNPq , pela concessão da bolsa de estudos por três anos.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos de 6 meses.

Ao Prof. Dr. Affonso Maria de Carvalho, pela colaboração sincera e amizade durante o tempo de realização desse trabalho.

Ao Distinguido Prof. Ph.D. R. W. Skaggs, pela orientação e apoio recebidos na realização desse trabalho.

A coordenação do curso de pós-graduação em agronomia, área de concentração Irrigação e Drenagem, FCA–UNESP, pela valiosa colaboração na formação profissional e científica.

Ao departamento de Engenharia de Biologia e Agricultura da Universidade Estadual de Carolina do Norte (B&AE of NCSU-USA), pelo acolhimento e oportunidade de realizar o trabalho da tese.

Ao Pesquisador do Programa Manejo de Água na Agricultura Ph.D. G.M. “Chip” Chescheir, pelo apoio e orientação de campo (NCSU-USA).

Ao pesquisador e Prof. Ph.D. Devendra M. Amatya, pelo apoio e análise dos dados meteorológicos (NCSU-USA).

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola, FCA-UNESP, pelo conhecimento repassado, que fundamenta este trabalho,

A equipe de trabalho do Prof. Doutor R. W. Skaggs (B&AE. Dept. of NCSU-USA), que analisaram e recolheram os dados no campo, em especial o Eng. Charles Frick.

A Jeane Alves de Almeida, braço direito e incentivo na realização deste trabalho.

Aos colegas do curso de pós-graduação em irrigação e drenagem, pela convivência e companheirismo ao longo do curso.

A todos aqueles que direta ou indiretamente, colaboraram para concretização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTAS DE FIGURAS.....	X
1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY.....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO DA LITERATURA.....	8
4.1. Considerações Gerais.....	8
4.2. Modelo de Simulação e Método do Balanço de Água no Solo.....	17
4.3. Método de Análise de Umidade do Solo: TDR.....	24
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
5.1. Condições Experimentais.....	28
5.2. Instrumentação dos Métodos BAS e TDR.....	29
5.3. Condições Gerais de Campo Para Sistemas de Manejo.....	34
5.4. Determinação das Propriedades do Solo.....	44
5.4.1 Coleta e Preparação das Amostras de Solo.....	44
5.4.2. Condutividade Hidráulica.....	46
5.4.3. Textura do Solo.....	49
5.4.4. Densidade do solo.....	50
5.4.5. Porosidade.....	50

5.4.6. Carbono Total.....	52
5.4.7. Conteúdo de Umidade e Água Residual.....	53
5.4.8 pH do Solo.....	54
5.4.9 pH da Água.....	54
5.5. Curva Característica de Água no Solo.....	54
5.6. Análise Estatística.....	56
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
6.1 Componentes do balanço de água no solo.....	57
6.2 Balanço de água no perfil do solo.....	63
6.3 Método do TDR.....	68
6.4 Análise estatística.....	71
6.5 Rendimento das culturas.....	76
7. CONCLUSÕES.....	80
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
9. APÊNDICE.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Culturas e manejos de água para as diferentes estações agrícolas, Campo <i>Experimental Tide Water</i> , NCSU, North Carolina, USA.....	35
2. Média da condutividade hidráulica nas parcelas experimentais para diferentes profundidades de coleta de amostras de solo.....	49
3. Dados de textura do solo nas parcelas experimentais, para diferentes profundidades de coleta de amostras de solo.....	50
4. Valores médios da densidade aparente nas parcelas experimentais para amostras de solo coletadas a diferentes profundidades.....	51
5. Valores Médios da Porosidade do Solo nas Parcelas Experimentais. Dados para amostras de solo coletadas a diferentes profundidades.....	51
6. Valores médios do conteúdo de carbono total do solo nas parcelas experimentais. Dados para amostras de solo coletadas a diferentes profundidades.....	52
7. Valores Médios do Conteúdo de Água residual do Solo nas Parcelas Experimentais. Dados para amostras de solo coletados em diferentes profundidades.....	53
8. Média $\pm$ desvio padrão de umidade de solo (TDR) e Balanço Hídrico (BAS) para milho sob os tratamentos de subirrigação (SI) e drenagem convencional (Dr).....	72
9. Média $\pm$ desvio padrão de umidade de solo (TDR) e Balanço Hídrico (BAS) para o experimento de cultivo do trigo sob os tratamentos de drenagem convencional (Dr) e drenagem controlada (DC).....	73
10. Média $\pm$ desvio padrão de umidade de solo (TDR) e Balanço Hídrico (BAS) para o experimento de cultivo da soja sob os tratamentos de drenagem convencional (Dr) e subirrigação (SI)	73

11. Coeficiente de correlação de Pearson ou de correspondente não paramétrico-correlação de Spearman, para dados de TDR versus dados do Balanço Hídrico (BH) nos diferentes períodos agrícolas e tratamentos compreendidos entre junho de 1999 e novembro de 2000.....	75
12. Componentes do cálculo de método do balanço de água no solo (ΔS) em mm/período da cultura.....	77
13. Rendimento das culturas cultivadas para cada tratamento de manejo do lençol freático.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Sistemas de manejo do lençol freático: drenagem convencional ou livre, drenagem controlada e subirrigação.....	16
2. Esquema do sistema de manejo de água com tubos ou canais de drenagem e componentes considerados no balanço de água no solo.....	18
3. Layout experimental para o estudo do manejo de água no lençol freático em Plymouth, NC.....	37
4. Esquema da disposição dos equipamentos de manejo para as parcelas experimentais.....	39
5. Esquema experimental da instalação para o sistema de manejo drenagem controlada nas parcelas experimentais de campo.....	40
6. Curva característica de umidade do solo nas parcelas experimentais para diferentes profundidades.....	55
7. Variação temporal na precipitação (PP) e evapotranspiração potencial (ET), volume de água drenada no tratamento de drenagem convencional (Dr), volume de água suprida no tratamento de subirrigação (SI) e profundidade do lençol freático nos tratamentos de Dr e SI, para o período agrícola do milho (Jun/Nov 1999).....	60
8. Variação temporal da precipitação (PP) e evapotranspiração potencial (ET), volume de água drenada no tratamento de drenagem convencional (Dr), volume de água drenada no tratamento de drenagem controlada (DC) e profundidade do lençol freático nos tratamentos de Dr e DC para o período agrícola do trigo (Nov/Jun 2000).....	61

9. Variação temporal da precipitação (PP) e evapotranspiração potencial (ET), volume de água, drenada no tratamento de drenagem convencional (Dr), drenada no tratamento de subirrigação (Dr(SI) e volume de água suprida no tratamento de subirrigação (SI). Profundidade do lençol freático nos tratamentos de Dr e SI para o período agrícola da soja (Jun/ Nov 2000).....	62
10. Balanço de água no perfil do solo (ΔS). Resultados médios das parcelas sob tratamento de subirrigação (SI) e drenagem convencional (Dr), período agrícola de milho (junho–Novembro/99).....	64
11. Balanço de água no perfil do solo (ΔS). Resultados médios das parcelas sob tratamento de drenagem controlada (DC) e drenagem convencional (Dr), período agrícola de trigo (janeiro–junho//2000).....	65
12. Balanço de água no perfil do solo (ΔS). Resultados médios das parcelas sob tratamento de Subirrigação (SI) e drenagem convencional (Dr), período agrícola de soja (junho – novembro /2000).....	66
13. Conteúdo de água no perfil do solo medida pelo método TDR nas parcelas sob os tratamentos de manejos de drenagem convencional (Dr) e subirrigação (SI), no período agrícola do milho (jun/nov 1999).....	69
14. Conteúdo de água no perfil do solo medida pelo método TDR nas parcelas sob os tratamentos de manejos de drenagem convencional (Dr) e Drenagem controlada (DC), no período agrícola de trigo (nov/jun 2000).....	69
15. Conteúdo de água no perfil do solo medida pelo método TDR nas parcelas sob os tratamentos de manejos de drenagem convencional (Dr) e subirrigação (SI), no período agrícola da soja (jun/nov 2000) respectivamente.....	70

1. RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a variação temporal de água, no perfil do solo quando aplicado diferentes tipos de manejos do lençol freático. A relação entre o método analítico do balanço de água no perfil do solo com o teor de água no solo, medido pelo método de campo TDR, feito com o objetivo de verificar se o modelo de simulação adotado prevê corretamente a umidade do solo.

As mensurações da umidade do solo pelo método de campo (TDR) e o método analítico do balanço de água (simuladas pelo DRAINMOD) foram feitos para cada operação do manejo do lençol freático (drenagem convencional, drenagem controlada e subirrigação), nos diferentes períodos agrícolas, da costa Leste do Estado da Carolina do Norte, (USA) mais propriamente na Estação de Pesquisa Tidewater, em Plymouth, NC.

Em cada período agrícola foram cultivados, milho, trigo e soja. Isto permitiu a relação entre métodos de determinação do conteúdo de umidade no solo, nos diferentes tratamentos ou manejo do lençol freático e a produção das culturas específicas de cada período. O método de campo (TDR) foi realizado para uma profundidade de 0,75 m, e o método do balanço de água no perfil do solo (BAS), determinou o teor de água no perfil do solo, desde a superfície até o dreno, o mesmo que se encontrava a 1,20 m de profundidade. Ambos os métodos influenciados pelo manejo do lençol freático. (drenagem convencional, drenagem controlada e subirrigação), com suas respectivas profundidades.

Os resultados obtidos mostram o conteúdo de água no solo variando de acordo com os parâmetros climáticos, entre eles precipitação e evapotranspiração potencial. Os tratamentos de manejo adotados para cada período agrícola, responderam adequadamente à variação de água no perfil do solo. Não houve diferença significativa entre a quantidade de água retida no perfil do solo no método do balanço de água no perfil do solo (para os períodos agrícolas do milho e trigo, e soja, respectivamente). Da mesma forma não houve diferença entre os tratamentos para os dados de umidade obtidos pelo TDR.

Houve correlação entre umidade medida pelo TDR e água retida no perfil do solo medida pelo método do BAS, nos períodos agrícolas do trigo e soja.

2. SUMMARY

The aim of this research was to access the temporal change on water of the soil profile when used different management of the water table. The relationship between analytical method for water content measurement and the water balance was done to verify the calibration of the DRAINMOD simulation model. The measurements of water content on the soil profile both to water balancer or TDR was done to free drainage (Dr), controlled drainage (DC) and sub irrigation (SI) for different times and crop season at the Tidewater Research Station, Plymouth, East Cost of North Carolina (USA).

Corn, wheat and soybean were cultivated in different period under SI, Dr or DC management propertied for each season. Each period was measurement the water content in the profile of soil agreement with water balance analytical method and TDR field method.

The results from water content for all season indicate a good correspondence with potential evapotranspiration and precipitation and for each management did not have any difference between the retained water on the soil profile, or to humidity determined for field method (TDR).

The association seemed to results from the TDR and retained water on the soil profile indicates that the DRAINMOD had a good prevision for water management during the season studied.

3. INTRODUÇÃO

A quantificação da umidade no perfil do solo, especialmente na zona insaturada, tem recebido importante consideração, principalmente em áreas cujas condições de umidade são causadas pelo lençol freático raso. Estas características são as principais razões do desenvolvimento e uso de sistemas de suprimento e remoção de água, ou seja, subirrigação e drenagem respectivamente.

Na mensuração da umidade no perfil do solo dispomos de métodos de campo e métodos analíticos. Entre os métodos de campo podemos citar: o gravimétrico; tensiometria; distribuidor de nêutrons e refletômetro de microondas (TDR). Como método analítico podemos citar o método de balanço de água no solo. Este método analítico pode estimar também a taxa de infiltração, a taxa de drenagem e a evapotranspiração, razão pela qual é amplamente usado nos modelos de simulação.

Os modelos de simulação são teoremas matemáticos que empregam técnicas numéricas para resolver equações diferenciais. Mesmo sendo estes modelos matemáticos e numericamente corretos, necessitam ser verificados e calibrados com dados e métodos de campo, porque a sua precisão requer a necessidade de dados de entrada para serem avaliados.

Na Costa Leste dos Estados Unidos da América, as precipitações na época de inverno e o excesso de evapotranspiração no verão, são significativos durante estes períodos do ano, causando elevação do lençol freático e déficit hídrico respectivamente. Onde tal situação, afeta severamente a produção agrícola, numa área correspondente mais ou menos a metade da costa plana do Atlântico.

O lençol freático raso e a drenagem natural pobre criar uma excessiva condição de umidade no solo que limita severamente as atividades no campo, retardando o plantio, restringindo o crescimento da cultura e, conseqüentemente, a produção. Nestas regiões úmidas, as chuvas ocorrem principalmente no inverno e início da primavera, seguida por intermitentes períodos secos durante a fase de crescimento das culturas. As necessidades de irrigação são proveitosas para o crescimento das culturas.

Regiões úmidas com características de chuva durante o inverno e início do período de crescimento (fim da primavera), como também de períodos de seca no verão, requerem melhorias no manejo de água. Em áreas de apropriada topografia e tipo de solo, o manejo da água oferece muitas vantagens. Os sistemas de manejo de água, para manutenção do lençol freático, são previstos segundo modelos de simulação computadorizada, como é o caso do DRAINMOD. No entanto, mesmo estes modelos sendo hoje amplamente utilizados, há a necessidade de dados de campo, por que o modelo se baseia no método

analítico do balanço do conteúdo de umidade no perfil do solo, para determinar a umidade no solo.

O objetivo do presente trabalho foi determinar a variabilidade temporal do teor de água no solo, pelo método analítico do balanço de água no perfil do solo e pelo método de campo do TDR. As mensurações da umidade do solo no campo e o método do balanço de água foram feitos para cada operação de manejo do lençol freático (drenagem convencional, drenagem controlada e subirrigação).

Os componentes do método do balanço de água no perfil do solo foram simulados, pelo DRAINMOD, para os diferentes períodos agrícolas na costa Leste do Estado da Carolina do Norte (USA) mais propriamente na Estação de Pesquisa Tidewater, em Plymouth, NC. Em cada período agrícola foram instaladas as culturas de milho, trigo e soja. Isso permitiu a relação entre métodos, diferentes tratamentos e a produção das culturas específicas de cada estação.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Considerações Gerais

Tanto o crescimento populacional como o desenvolvimento industrial tem afetado a agricultura e o meio ambiente (Healy, 1985), já que os setores agrícolas do município e do estado de Carolina do Norte, juntamente com o setor industrial, tem usado águas profundas, em diferentes áreas, por isso o armazenamento e o manejo adequado de águas superficiais e subsuperficiais tem hoje uma importância crítica para a produção agrícola em países desenvolvidos (Doty et al. 1985), buscando um potencial para a aplicação em países subdesenvolvidos com problemas semelhantes.

As condições de solos úmidos, causados por lençol freático raso, são as razões principais para o desenvolvimento e uso dos sistemas de drenagem em solos úmidos.

Na costa leste dos Estados Unidos, precipitação e evapotranspiração ocorrem em excesso durante período significativo do ano, e causam elevação do lençol freático até a zona radicular. Por outro lado, condições de lençol freático raso restringem severamente a produção agrícola em aproximadamente metade da costa plana do Atlântico (Shimohammadi, et al. 1992).

As áreas agrícolas das planícies da costa leste dos Estados Unidos, têm sido influenciadas por altas chuvas, ocasionando alagamentos, e temporadas de seca indesejadas. Nessas regiões, os períodos de alagamento são intercalados por longos períodos de estiagem, que deixam o solo em déficit hídrico, atingindo a produção das culturas. Esta característica potencialmente implica na degradação do ambiente em áreas sensíveis, áreas essas exemplificadas por terras alagadas, terras baixas, e pântanos com vegetação de brejo.

Nas regiões úmidas, com estas características, é necessária a utilização de técnicas de manejo específicas para cada período considerado: época de alagamento intercalada por estiagem nas parcelas cultivadas, resultando o solo com déficit de água constante e acarretando estresse hídrico para a cultura. No entanto, a necessidade da utilização racional de todas as águas num sistema agrícola requer uma agricultura mais sofisticada, com a utilização de técnicas de manejo de água mais requintadas do que a irrigação ou drenagem tradicionais.

O manejo do lençol freático oferece ótimas possibilidades para o controle das inundações de áreas cultivadas, além de permitir a conservação e qualidade da água, quando comparado ao sistema de drenagem convencional (Thomas et al. 1990). Os sistemas de manejo do lençol freático podem incorporar drenagem, restrições de drenagem (drenagem controlada), e subirrigação, em uma sofisticada operação para otimizar condições de solo e água para o crescimento da cultura. Tais sistemas de manejo são aplicados no campo

e usam gradualmente as nascentes com várias estruturas de controle de água e procedimentos operacionais (Evans et al. 1990).

O manejo do lençol freático é especialmente recomendado, para áreas planas, associadas a períodos de alagamento intercalados por períodos secos, persistindo lençóis freáticos altos, por períodos longos. No entanto, o impacto ambiental do controle do lençol freático depende da prática usada e como ele é manejado, bem como condições do solo, da cultura e de fatores climáticos (Skaggs & Breve, 1995). Assim o potencial de melhoramento da qualidade de água ocorre quando restos de nutrientes no campo permitem ser captados e reduzidos (Evans et al. 1989)

No subsolo, na região denominado zona saturada, o lençol freático preenche todos os poros com água. Quando em solos úmidos, o lençol freático é rebaixado por meio de drenagem o perfil do solo apresenta a região superior insaturada. Esta região insaturada apresenta nos poros água e ar. A água contida na zona insaturada geralmente é consequência da infiltração de água precipitada e da ascensão, por capilaridade, da capa freática.

O processo do movimento de água, na parte insaturada do perfil do solo, representa um problema importante no estudo de irrigação, drenagem, evaporação da água do solo, água captada pelas raízes, transporte de sais e fertilizantes. A zona insaturada é também de fundamental importância para o crescimento das plantas. A condição de água na parte superior do perfil do solo tem uma influência significativa sobre a trafegabilidade, como apresentado em trabalhos de campo em geral (Kabat et al. 1994).

Neste contexto, o uso de modelos de simulação das condições de água no solo é de grande valor. Um modelo de simulação de drenagem para uma zona insaturada e

produção da cultura, poderá, por exemplo, ser capaz de descrever os efeitos de um projeto de drenagem sobre a dinâmica da água no solo, bem como relacioná-lo com a produção da cultura. O fluxo da água no solo é também um fator diretor no transporte dos solutos, neste caso responsável pela mudança da situação química do solo. Assim a propriedade de um modelo de simulação pode prever e efetuar diferentes projetos de drenagem sob balanço de água e sal, envolvendo também a produção da cultura.

Muitos modelos de simulação têm sido desenvolvidos para simular condições de água adequada para o crescimento fisiológico das culturas, e melhorar seus rendimentos em campo. Alguns destes modelos são CERES-MAIZE (Ritchie, 1986) para milho; CERES-WHEAT (Ritchie & Otter, 1985) para trigo; SOYGRO (Wilkerson et al. 1983) para soja. A coleção de modelos de simulação denominada CERES simula o crescimento e rendimento de várias outras culturas. A estrutura e dados de entrada para os modelos CERES são similares aos modelos específicos para cultura, e são descritos detalhadamente por Hanks & Ritchie (1991). As condições de crescimento variam entre modelos, mas todos prevêem a inclusão da temperatura, dados de precipitação, comprimento do dia, radiação fotossintética, fertilidade e condições de água no solo.

O modelo de simulação do manejo de água DRAINMOD (Skaggs, 1978), simula as condições de água em solos com elevado lençol freático e tem sido testado e usado em áreas agrícolas americanas, bem como internacionalmente. O modelo considera precipitação, infiltração, escoamento superficial, drenagem, armazenamento e perda de água por percolação profunda, para desempenhar o balanço de água no perfil do solo (Skaggs, 1999; Skaggs & Cheschie, 1999).

Numerosos informes relatam como o excesso de água afeta a zona radicular e posteriormente a sobrevivência da planta, seu crescimento e produção. Nestes processos considerados inclui-se a troca do dióxido de carbono do solo com o oxigênio da atmosfera, reações de redução e oxidação, e em subsequência difusão de gases metabólicos, disponibilidade de nutrientes e acumulação de CO₂, etileno e outras substâncias tóxicas e subprodutos reduzidos, tais como nitrito, e metais altamente solúveis como Fe ou Mn e sulfato hidrogenado.

Estas e outras condições podem afetar diretamente ou indiretamente a produção das culturas, através de processos tais como a germinação das sementes, restringindo o crescimento e alongação das raízes, causando a morte das células das raízes, o murchamento da planta, o encurvamento do caule principal, abscisão, crescimento lento, acumulação de matéria seca, etc., podendo, algumas vezes, provocar a morte da planta (Evans 1999).

Modelos de simulação computadorizados são usados como ferramentas para imitar o comportamento real dos sistemas ou postulados. O mais importante e interessante é a simulação de sistemas dinâmicos. Estes modelos de simulação são usualmente realizados na forma de programas de computador e são também referências para outros modelos.

A quantificação da umidade no perfil do solo, especialmente na zona insaturada, tem recebido considerações importantes quando são aplicados os sistemas de suprimento e/ou remoção de água, subirrigação e drenagem, respectivamente, especialmente em áreas aonde se procura maximizar o potencial de produtividade de uma cultura.

A justificativa de uma boa distribuição de umidade no perfil do solo reflete numa drenagem adequada, com o objetivo principal de providenciar uma ótima

trafegabilidade em áreas úmidas na época de plantio e colheita. A redução do conteúdo excessivo de água na zona radicular providencia aeração adequada após as chuvas ou irrigações (Evans, 1999).

A prática inadequada da drenagem é caracterizada por uma quantidade excessiva de água no solo, a qual expulsa o ar dos poros e limita a atividade biológica da cultura. Este impacto de excesso de água vem sendo estudado por muitos pesquisadores, entre eles Clement (1921), Wesseling (1974) e Potwardhan et al. (1988).

A consequência de uma drenagem inadequada foi exaustivamente estudada no século passado. Mundialmente há milhares de citações relevantes, mesmo assim o conhecimento do assunto é ainda incompleto. O problema é complexo porque há uma interdependência entre solo, cultura, clima e toda a biota considerada (Evans, 1999).

Nestas regiões, a precipitação excessiva e alta taxa de evaporação e evapotranspiração são características, causando elevação do lençol freático nas estações de primavera e verão. Nestas épocas as culturas estão sob estágio fisiológico crítico, e o estresse hídrico pode comprometer sua produtividade. Neste caso, o fornecimento de água é necessário para suprir este déficit hídrico causado pelas condições climatológicas. Para estas situações aplicam-se os seguintes três tipos de manejo: 1) *Drenagem Livre ou chamada também de Drenagem Convencional*; 2) *Drenagem Controlada* e 3) *Subirrigação* (Shirmohammadi, 1992).

Áreas de plantio caracterizadas por solos com taxa de drenagem pobre são abundantes ao longo da costa Atlântica e Golfos dos Estados Americanos. Segundo Pavelis (1987) estas áreas compreendem aproximadamente 20 milhões de acres (49,5 milhões de ha). Nestas regiões, a determinação da data ótima de plantio das culturas foi um dos

primeiros trabalhos de pesquisa a ser realizado, permitindo a otimização do rendimento das culturas, o qual era baixo quando a época de plantio era retardada, devido aos problemas acarretados pelos períodos chuvosos, que ocorrem no início da primavera. Neste período a evaporação é baixa, não sendo suficiente para remover o excesso de água no solo. Essa água de precipitação deve, portanto, ser removida pelo manejo de drenagem, abaixando assim o lençol freático numa altura ótima para o desenvolvimento da cultura.

As chuvas são, portanto, uma das maiores preocupações, mas segundo Healy (1985), nas regiões úmida da costa plana leste dos USA, onde se presume fazer remoção constante de água, também ocorre situação de períodos prolongados de seca. A variação periódica nas condições meteorológicas acarreta culturas periodicamente sofrendo com períodos das secas, o que também reduz substancialmente seu rendimento. Neste período, uma drenagem intensa, realizada pelo sistema já projetado para dar condições de traficabilidade durante períodos extremos de chuva, tende a remover mais água do que o necessário.

Estes problemas e preocupações são resultados da transição da drenagem convencional para sistemas de manejo do lençol freático que providenciam drenagem durante períodos chuvosos, mas também eliminam o excesso de drenagem porque usam estruturas de controle para manejo do nível do lençol na saída dos tubos de drenagem (Doty et al. 1982; Skaggs, 1972). O manejo de drenagem convencional é usado para remover o excesso de água do campo de plantio por meio de sistema de drenos subsuperficiais, que deságuam num canal coletor. Quando esta estrutura, ou seja, o canal coletor, é usado para regular a taxa de drenagem, colocando-se uma comporta a uma altura predeterminada, o sistema funciona como drenagem controlada.

Outra situação de manejo é quando se eleva a altura da comporta do canal de dreno próximo a superfície do solo, e bombeia-se água dentro deste canal, fazendo a água retornar através do sistema de drenos subsuperficiais, ao campo de cultivo. O nível do lençol freático é então elevado, realizando-se assim a operação de subirrigação. Essas situações de manejo de água no solo mantêm o lençol freático como representada esquematicamente na Figura 1 (adaptado de Evans, 1985).

Estas três operações ou manejos, quais sejam drenagem convencional (Dr), drenagem controlada (DC) e subirrigação (SI), são aplicadas eficientemente nos períodos agrícolas da região leste do estado de Carolina do Norte (USA). Nestas regiões pratica-se a rotação de culturas e cultivo mínimo, focalizando a prática da conservação do solo, maximizando assim o potencial de produtividade das culturas adotadas. Também nestas regiões, no período de primavera/verão (maio a outubro), cultiva-se o milho, sob as operações dos manejos de drenagem convencional e subirrigação. No período de inverno/primavera (dezembro-maio) cultiva-se trigo sob as operações de manejo de drenagem convencional e drenagem controlada. No próximo ano, período de verão/outono (junho a novembro) cultiva-se a soja, como cultura de rotação, sob as operações dos manejos drenagem convencional e subirrigação.

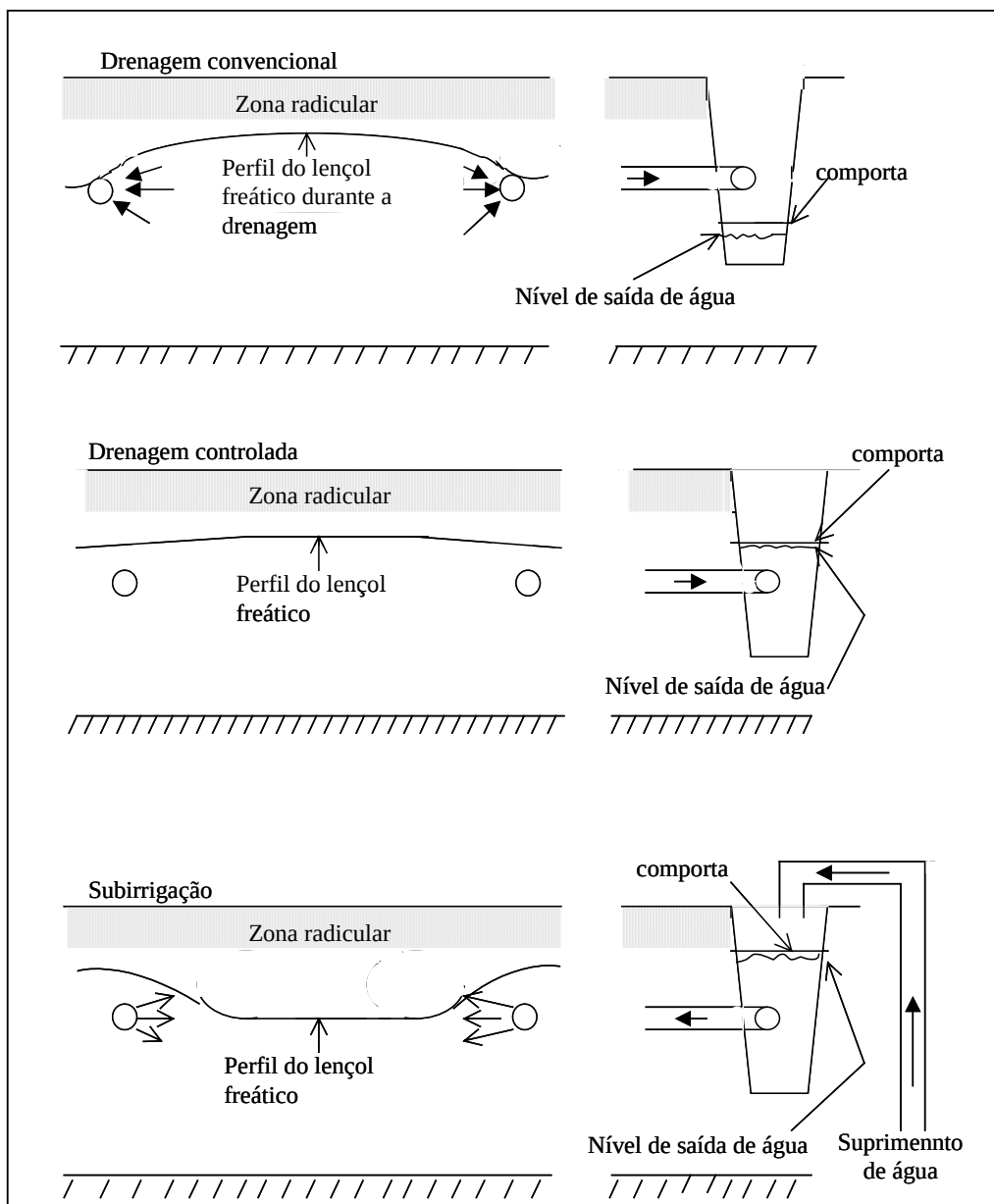


Figura 1 Sistemas de manejo do lençol freático: drenagem convencional ou livre, drenagem controlada e subirrigação.

4.2. Modelo de Simulação e Método do Balanço de Água no Solo

O modelo de simulação DRAINMOD foi desenvolvido especificamente com o propósito de delinear e avaliar os múltiplos componentes da drenagem e dos sistemas de manejo de água. Dados de entrada incluem propriedades do solo, parâmetros da cultura, parâmetros de sistemas de drenagem, clima e dados de irrigação. Este modelo faz o balanço da água no solo considerando períodos que podem variar de dados diários a dados coletados para cada hora do dia.

Para uma visualização de campo, podemos observar a Figura 2 que mostra os componentes do balanço de água no solo. Por meio de cálculos são determinados as taxa de infiltração de água, a evapotranspiração (ET), o escoamento superficial, a subirrigação, a perda por percolação profunda, a profundidade do lençol freático e o status da água no solo (Skaggs, 1999). Todas as medidas são feitas para uma variação de tempo considerada (dia-a-dia ou hora-a-hora). Além disso, para fins de cálculos assume-se ainda que a água do solo está distribuída em duas zonas: zona úmida, que se estende do lençol freático até a zona de raiz, e possivelmente da zona de raiz à superfície; e uma zona seca. A distribuição do conteúdo de água na zona úmida é assumida como sendo a condição de equilíbrio de drenagem no perfil do solo (Skaggs et al. 1991).

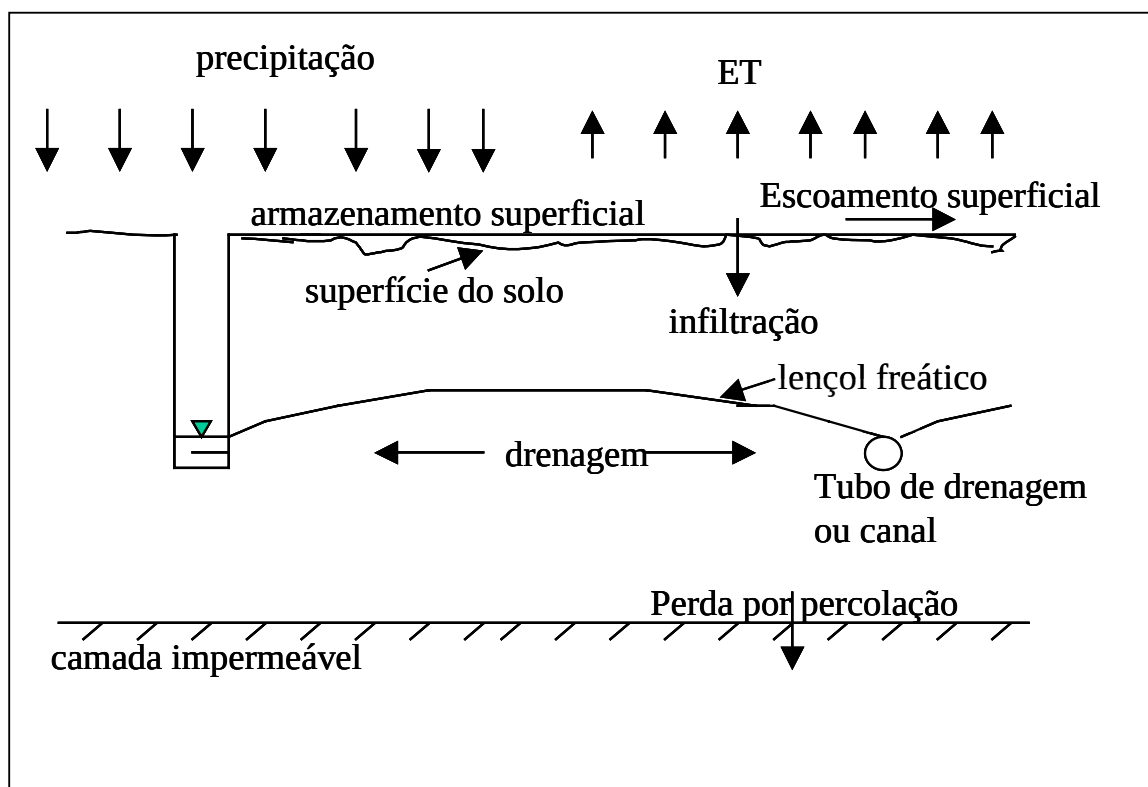


Figura 2 Esquema do sistema de manejo de água com tubos ou canais de drenagem e componentes considerados no balanço de água no solo.

Os resultados de investigações sobre efeitos do estresse hídrico, devido a condições de falta ou de excesso de água, na produção de culturas de grande importância econômica permitem também o uso de modelos de simulação, para relacionar os sistemas de manejo e o rendimento de culturas específicas (Skaggs, 1999).

Para análise do balanço de água no solo é necessário calcular a drenagem da área que supostamente requer drenagem, a qual é caracterizada por grande quantidade de água fluindo para fora da área de cultivo sobre condições naturais. Removendo o excesso de água drenável, temos duas vantagens: evitar alagamentos pela manutenção

artificial da profundidade do lençol freático, e a remoção da água excessiva da zona radicular. Além disso, sais levados pela irrigação podem diminuir a concentração em excesso de nutrientes, que poderá ser prejudicial às culturas.

O cálculo do excesso de água drenável é um problema em áreas que requerem melhorias e irrigação. As condições naturais nestas áreas são diversas e diferentes fontes de água podem ser envolvidas no cálculo. Faz-se necessário então realizar trabalhos de campo destacando o mapa geral do regime do lençol freático bem como estudar o regime de sais nos balanços de água. Um correto entendimento destes regimes permitirá à engenharia de drenagem entender como podem ser afetados pelos trabalhos de drenagem.

Os fatores envolvidos no cálculo do excesso de água drenável são derivados da análise do total de água do balanço da área em estudo. Este balanço é definido pela equação geral da hidrologia, a qual é basicamente uma representação da lei de conservação de massas quando se aplica no ciclo hidrológico. De uma forma simples temos:

$$AE = AS + \Delta S \quad (1)$$

em que, AE e AS representam a água que entra e a água que sai do sistema, respectivamente, e ΔS representa a mudança do armazenamento de água no campo considerado.

O método do balanço de água tem quatro características básicas que são: (1) pode ser avaliado por outro subsistema do ciclo hidrológico, para qualquer área, e qualquer período de tempo; (2) serve para avaliar se todos os fluxos e componentes armazenados envolvidos tem sido considerados quantitativamente; (3) calcula um componente

desconhecido do balanço, desde que os outros componentes sejam conhecidos com suficiente exatidão; (4) pode ser apreciado como um modelo do processo hidrológico completo em estudo, isto é, pode ser usado para predeterminar que efeito impõe a troca sobre certos componentes, que terão sobre outro componente do sistema ou subsistema.

Os principais componentes do balanço de água são: o tempo de permanência de água no perfil do solo, que freqüentemente é avaliado por uma media de anos, salinidade e alagamentos, que não são da mesma duração ou freqüência. Em algumas regiões são permanentes, em áreas marginais, as quais são depressões topográficas, com um lençol freático alto permanente, (resultante da combinação de fluxos superficiais e subsuperficiais). Em outros, são temporários (são áreas acidentalmente de altas chuvas ou em irrigações que recebem grandes quantidades de água superficial unicamente durante a estação de irrigação). Em ambos os casos, o aumento do lençol freático, para um nível inaceitável, é resultante da drenagem natural da área, a qual não pode competir com a recarga excessiva do reservatório da capa freática.

O campo de fluxo é outro componente do balanço de água do solo. Na superfície de uma área podemos escolher dois tipos de fluxo, tais: campo de fluxo que compreende a parte física (como a área de captação da bacia e mapa da capa freática); e campo de fluxo que compreende unicamente as partes físicas (tais como esquemas de irrigação e áreas do lençol freático subsuperficiais).

Nas áreas de climas úmidos, o armazenamento de água muda de acordo com os ciclos de chuvas, os quais são medidos em estações meteorológicas localizadas na área de plantio. O escoamento ou fluxo da água na área é medido na saída do sistema de dreno, uma vez que a camada rochosa está próxima da superfície do solo nas saídas dos

respectivos tubos, permitindo o fluxo da capa freática. O balanço de água total é calculado pela equação:

$$PP - \Delta S = ET \quad (2)$$

em que, PP é a precipitação e ΔS a água que sai do sistema (solo) e ET representa a evapotranspiração.

Em estudos com drenagem é absolutamente essencial entender o regime de água na zona insaturada, a qual é retirada na superfície do lençol freático. É nesta zona que as condições devem ser favoráveis para o crescimento das culturas. Alguns componentes do estudo do balanço de água no solo na zona não saturada incluem a determinação da água armazenada no solo; a avaliação do balanço de água no perfil do solo e a relação entre o balanço da zona saturada subsequente (zona abaixo do lençol freático), além de fatores hidrometeorológicos; infiltração, evapotranspiração, e perda por percolação profunda e movimento da capa freática.

A base para os modelos de simulação em computador é o balanço de água no perfil do solo. As taxas de infiltração, drenagem, evapotranspiração e distribuição da água no perfil do solo podem ser computadas para obter mínimas em equações diferenciais não lineares (Freeze, 1971). Para uma estreita faixa do solo numa unidade de área o qual se estende da camada impermeável à superfície a relação básica do modelo do balanço de água, para um intervalo de tempo Δt , pode ser escrita pela equação:

$$\Delta Va = D + ET + DS - F \quad (3)$$

em que, ΔVa representa a troca de volume de ar (cm), D é drenagem lateral (cm) (ou subirrigação) da seção, ET é evapotranspiração (cm), DS é perda por percolação (cm), e F é infiltração (cm) dentro da seção num determinado Δt . Os termos do lado direito da equação são computados em termos de elevação do lençol freático, propriedades do solo, local e parâmetros do sistema de drenagem, cultura e estágio de crescimento da cultura, e condições atmosféricas.

A quantidade de escoamento e armazenamento de água sobre a superfície é computada no balanço de água da superfície para cada um dado intervalo de tempo, pode ser descrito como:

$$PP = F + \Delta S + RO \quad (4)$$

em que, PP é precipitação (cm), F é infiltração (cm), ΔS é a variação do volume de água armazenada na superfície do solo (cm), e RO é o escoamento (cm) durante o intervalo de tempo determinado. O intervalo de tempo básico usado nas equações descritas acima é uma hora.

Quando não ocorre chuva, as taxas de drenagem e ET são lentas tanto que a posição do lençol freático se move lentamente com o tempo. Neste caso a equação 1 é baseada sobre um Δt de um dia. Quando a drenagem é rápida, mas não ocorre chuva, Δt é igual a 2 horas. Inversamente, intervalos de tempo de 5 minutos ou menos são usados para computar F quando as taxas de chuva excedem a capacidade de infiltração.

Resultados sobre o conteúdo de água no solo numa coluna vertical de solo, sob drenagem e evaporações simultânea, são descritos no trabalho de Skaggs (1974), o qual indica que, quando o lençol freático está a 0,4 m da superfície, a distribuição do conteúdo de água nos solos aqui considerados é independente da taxa de evaporação, menor que $4,8 \text{ mm.dia}^{-1}$. Quando a taxa de evaporação da superfície foi de $0,0 \text{ mm/dia}$, o lençol freático caiu para 0,4 m de profundidade após um dia de drenagem; sendo que este registrou a mesma profundidade em menos de um dia (0,74 dia), quando a taxa de evaporação foi de $4,8 \text{ mm.dia}^{-1}$.

A distribuição do conteúdo de água acima do lençol freático foi a mesma para ambos casos, ou seja, para taxas intermediárias de evaporação de $2,4 \text{ mm.dia}^{-1}$. O trabalho também mostrou a distribuição de água no solo quando o lençol freático alcança uma profundidade de 0,7 m, e que a taxa de evaporação é independente da distribuição de água no solo, exceto para a região próxima a superfície do solo, onde são registradas taxas altas de evaporação ($4,8 \text{ mm.dia}^{-1}$).

O balanço de água no solo é utilizado como método analítico para inferir condições de água no perfil de solo (Kabat, 1994). O método do balanço de água no solo estima parâmetros como a taxa de infiltração de água no solo, a drenagem e a evapotranspiração, razão pelo qual é amplamente usado nos modelos de simulação em computador (Skaggs, 1999).

4.3. Método de Análise de Umidade do Solo: TDR

Existem diferentes métodos de campo amplamente usados na medição da umidade ou conteúdo de água no solo. Dos mais importante podemos destacar o distribuidor de nêutrons, a tenciometria e a refletometria de microondas (TDR) além do método gravimétrico.

Os principais constituintes do solo são partículas sólidas, água e ar, os quais podem ser expressos em fração ou em percentagem em relação ao volume do solo. O conteúdo de água no solo pode ser mensurado tanto com métodos alterados como inalterados. Uma das vantagens do método inalterado é que pode se medir repetidas vezes no mesmo local. Esses métodos são mais vantajosos quando combinados com leituras automatizadas, com microcomputadores registrando leituras em tempo integral.

Segundo Kabat (1994), os métodos para condições de campo são: distribuidor de nêutrons, o regulador de raios gama e o método de refletometria de microondas (TDR). Outro método a se considerar é o gravimétrico, o qual mede o conteúdo de água no solo com base no peso ou volume em amostras alteradas, sendo o mais amplamente usado.

O método de distribuição de nêutrons é baseado no movimento rápido de nêutrons emitidos por uma fonte radioativa, os quais se chocam com núcleos do solo, perdendo energia e retornando a um coletor que conta parte dos nêutrons que perderam energia por reflexão termal. O hidrogênio perde nêutrons muito mais do que os constituintes do solo e, uma vez que o hidrogênio é o principal componente da água, as quantidades de nêutrons são fortemente relacionadas ao conteúdo de água numa amostra de solo.

Os reguladores de raios gama medem a densidade de solos úmidos, assumindo-se que a densidade do solo seco não muda no período considerado. A densidade de solos úmidos muda unicamente com o conteúdo de água. Então, se um raio gama é emitido (por uma fonte de Césio 137, por exemplo), através do solo, eles são atenuados (reduzem em intensidade), cuja atenuação aumenta com a densidade de solo úmido (Bertuzzi et al. 1987).

O método de refletometria de microondas baseia-se nas propriedades dielétricas do solo. O tempo de propagação do impulso viaja ao longo de uma onda dirigida e medida. Este tempo depende das propriedades dielétricas do solo, em torno da onda dirigida e, portanto sobre o conteúdo de água no solo.

O método do TDR pode ser usado para muitos solos sem calibração, porque a relação entre a constante dielétrica aparente e volume de água depende do tipo de solo, densidade, temperatura e conteúdo de sal (Topp & Davis, 1981). Topp et al. (1980) relataram que o volume medido do conteúdo de água é de $\pm 0.02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. O TDR vem sendo mais utilizado nos últimos anos, principalmente porque este método dispensa calibrações.

Este método se completa quando combinado à automatização da leitura dos dados em tempo integral (Heimovaara & Bouten, 1990). Como vantagens podemos citar: a boa resolução na profundidade; respostas rápidas; pequena deflexão ao medir a frequência; é um instrumento seguro e pode ser combinado com um coletor automático de dados. Além disso, a umidade do solo pode ser medida mesmo com água na superfície do solo e dá com exatidão a média do conteúdo de água no solo a diversas profundidades.

Atualmente, a disponibilidade de hastes com baixa influência específica, dispensa a necessidade de calibração para diferentes tipos de solos. Como desvantagens temos hastes e sistemas caros para coletar dados, resultando num alto custo,

principalmente para áreas grandes, além de dificuldades na instalação dos eletrodos em solos rochosos ou muito compactos.

As hastes padronizadas do TDR são compostas de 2 a 3 varas paralelas de metal (Topp and Davis 1982b; Zegelin et al.1989). Estas hastes de varas contínuas, quando instaladas horizontalmente, são adequadas para o perfil de conteúdo de água numa coluna de solo em laboratório. Mais comumente, estes eletrodos, como condutores de ondas, são inseridos verticalmente na superfície do solo, que se estendem para profundidades requeridas. Uma serie de hastes colocadas verticalmente em diferentes comprimentos podem ser usados para construir a curva de retenção de água no perfil do solo.

O conteúdo de água de um intervalo de profundidade é determinado com dois eletrodos iguais, estendendo-se desde o topo até a ponta do par de eletrodos. Assumimos que não haja variabilidade horizontal no conteúdo de água do perfil do solo. Deste modo, a diferença entre o comprimento e peso médio do conteúdo de água em torno do eletrodo, não podem ser atribuídos a nenhuma relação de intervalo de profundidade.

Knight (1992) examinou a sensibilidade espacial de eletrodos de varas contínuas, mostrando que a área, no plano perpendicular ao longo dos eixos dos eletrodos, é dependente do diâmetro das varas e da separação entre eles. O exemplo de área é independente do conteúdo de água, uma vez que o conteúdo de água espacialmente é uniforme. Ferre et al. (1996) estende a expressão analítica de Annan (1977) para examinar a influência do ar e água preenchida nos espaços e no PVC em torno dos eletrodos.

As variações de temperatura e diferentes texturas no solo podem influenciar as medidas do conteúdo de umidade do solo. O TDR usa uma constante dielétrica de materiais para medir o conteúdo de umidade no solo, a qual decresce com a diminuição da

temperatura (Weast,1986). No entanto Topp et al. (1980) não observaram nenhuma relação significativa entre medidas de água no solo e temperatura em solos argilosos. Segundo Person & Berndtsson (1998), em solos orgânicos argilosos a temperatura influencia pouco as mensurações de conteúdo de umidade do solo.

Todas essas prerrogativas sobre a medida do teor de água do solo pelo TDR o indicam como um método que produz uma medida exata da umidade do solo, podendo, portanto, ser utilizado como medida padrão para uma área aonde se objetiva a mensuração dos níveis de água do solo em sistemas com culturas específicas.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Condições Experimentais

Um campo agrícola localizado na costa plana do Estado de Carolina do Norte foi instrumentado para monitorar a hidrologia e o manejo do lençol freático. Diferentes manejos do lençol freático (drenagem convencional, drenagem controlada e subirrigação) foram implementados nas parcelas de estudo do experimento. Este campo é a estação de pesquisa “Tidewater Research Station”, situada na cidade de Plymouth, Estado da Carolina do Norte (USA). Possui uma área experimental de 13,8 ha devidamente instrumentada com um sistema de drenagem superficial e subsuperficial, cujo sistema consiste de tubos de 101 mm de diâmetro, espaçados de 23 m e enterrados a uma profundidade de 1.10 m. A área experimental comporta de 8 unidades ou parcelas experimentais.

Os solos foram classificados como “Portsmouth silte arenoso”. Valores de densidade encontram-se na faixa de $1,09 \text{ g.cm}^{-3}$ na superfície e $1,61 \text{ g.cm}^{-3}$ na profundidade de 0,46 m. Valores de porosidade estão na faixa 0,43 na superfície e 0,31 na profundidade de 1,12 m. O total do conteúdo do carbono orgânico é de aproximadamente de 4% da superfície a 0,25 m. De 0,25m para 0,50 m, o conteúdo total de carbono orgânico declina para 0,25%. Os valores de pH foram mais elevados na superfície, aproximadamente 5,5, declinando para 4,0 na profundidade de 0,76 m. O pH da água está na faixa de 4,5 na profundidade de 0,6 m mudando para 6,2 em profundidades maiores que 1,0 m. A condutividade hidráulica é baixa na camada argilo-silte-arenosa, localizada num perfil aproximadamente à altura dos drenos subsuperficiais (0,8 para 1,1 m.). Este fluxo baixo de drenagem reduz a efetividade dos drenos.

5.2 Instrumentação dos Métodos BAS e TDR

A instrumentação para medir a umidade do solo através dos métodos TDR (método de campo) e o método analítico do Balanço de Água no Solo (BAS), seguiu o planejamento do desenho estatístico proposto para blocos completamente aleatorizados, com dois tratamentos (subirrigação e drenagem convencional) e quatro repetições (8 parcelas no total). Este desenho estatístico aplicou-se em todos os períodos de cultivo para o milho, o trigo e a soja.

A coleta de dados com precisão é um dos requisitos principais para qualquer projeto de pesquisa de campo. A determinação da análise subsequente é dependente da exatidão dos dados obtidos. Projetos de pesquisa onde se faz manejo do lençol freático em

grandes áreas requer coleta de dados automatizados (com micro computadores de campo), que permite fazer medidas em tempo integral e espacial das variáveis dependentes.

Pesquisas com “database” e modelos de simulação nos projetos de pesquisa de campo tem sido desenvolvidos para transferir dados de um local para outro (Munster, et al 1994). Os computadores, como ferramentas importantes, tem tornado possível o uso desses modelos de simulação para análises hidrológicas e de qualidade de água, entre eles podemos destacar as pesquisas que envolvem o manejo do lençol freático (Skaggs et al. 1992). No entanto, estes modelos precisam de dados que os validem, devendo, portanto ser calibrados com dados de campo, sendo este um dos objetivos desse trabalho. As primeiras investigações sobre o manejo do lençol freático são reportadas por Fox et al. (1956) e Skaggs et al. (1972). Doty & Persons (1984) utilizaram drenos subsuperficiais para estudos do lençol freático, onde as estruturas de campo incluíam sistemas de registro de dados diários.

Os tratamentos de manejo da água, praticados na área experimental, estão em função do clima, solo e períodos agrícolas. Os tratamentos foram: (i) drenagem convencional (Dr), (ii) drenagem controlada (DC) e ou (iii) subirrigação (SI). As práticas de manejo do lençol freático de subirrigação e drenagem controlada são utilizadas principalmente em solos com drenagem natural pobre e elevado lençol freático. Nesses solos, é uma vantagem utilizar subirrigação e drenagem controlada como o mesmo sistema, reduzindo custos (Skaggs, 1999).

Na região onde se localizou o experimento ocorrem altas taxas de precipitação, mas a demanda da evapotranspiração é característica de parte significativa do ano, principalmente nas estações climáticas de primavera e verão. No período chuvoso ocorrem situações de elevação do lençol freático na zona radicular, requerendo a remoção do

excesso de água pelo processo de drenagem convencional. A demanda de água devido a evapotranspiração requer o suprimento de água via subirrigação.

O método de campo do TDR foi instrumentado com sondas projetadas segundo Thomsen (1994) que consistem de um par de hastes galvanizadas de 6,4 mm de diâmetro e o comprimento de acordo com a profundidade desejada. Estas hastes foram introduzidas no solo vertical e paralelamente com um espaçamento entre as hastes de 5 cm. Cada repetição de cada tratamento comportou de um par de hastes de 75 cm de profundidade, nos tratamentos e repetições (ou seja, no tratamento de subirrigação, parcelas 1, 3, 4, e 7; no tratamento de drenagem convencional, parcelas 2, 5, 6 e 8), com exceção das parcelas 4 e 5 que foram equipadas com um jogo de hastes nas profundidades de 15, 30, 45 e 60 cm.

As leituras foram feitas com o aparelho TEKTRONIX modelo TDR 1502C com Cabo Metálico. Estas leituras deram entrada as seguintes equações (5, 6) propostas por Toop et al. (1980) para o cálculo do conteúdo volumétrico de água.

$$MC = 4,3 \times 10^{-6} (K^3) - 5,5 \times 10^{-4} (K^2) + 2,92 \times 10^{-2} (K) - 0,053 \quad (5)$$

$$K = 0,076 (X/L)^2 \quad (6)$$

Em que, MC = Conteúdo de umidade (cm^3 de água / cm^3 de solo), X = leitura no TDR e L = profundidade da sonda.

Os instrumentos para medir os componentes da equação analítica de umidade ou conteúdo modular do volume de água no solo pelo método do Balanço de Água no Perfil do Solo foram implantados em 1990. Tais instrumentos deram e dão suporte a outros

projetos monitorados pelo modelo de simulação DRAINMOD. Tais instrumentos são descritos por Skaggs (1999) e esquematizados nas Figuras 3, 4, e 5.

Basicamente o método do balanço de água no solo utiliza os dados climáticos de um posto meteorológico instalado ao lado do campo experimental. A precipitação foi coletada diariamente e a evapotranspiração potencial calculada pelo método de Penman modificado (Doorenbos & Pruitt, 1977).

O principal componente do modelo é a relação de volume de água que entrou e saiu do sistema, ou seja, águas que foram adicionadas por subirrigação ou precipitação e águas que foram drenadas. Estas águas foram medidas por meio de aparelhos instalados no tanque central.

Estas medidas foram feitas em tempo integral (às 24 horas do dia) e armazenada em micro computadores localizados no experimento. A mesma estratégia foi seguida para o tratamento de subirrigação e em todos os períodos de cultivo com exceção do cultivo de trigo, onde os tratamentos foram de drenagem convencional e drenagem controlada.

No tratamento de drenagem controlada, no tanque central foram instalados microcomputadores com programas diferentes ao de subirrigação e drenagem convencional, que controlou e registrou somente a água que saiu, não se adicionando nada ao sistema.

Na área de estudo (parcelas experimentais) foram plantadas três culturas no período agrícola compreendidos nos anos de 1999 e 2000, com as seguintes características:

- 1) Milho, como primeira cultura de rotação no ano de 1999;

- 2) Trigo, no final de 1999 e início do ano 2000;
- 3) E soja no final do ano 2000.

Estas culturas são comuns na região, abrangendo aproximadamente um milhão de hectares no Leste do Estado da Carolina do Norte. Como histórico, no início dos estudos (1990), nestas áreas as repetições ou parcelas 1,2 e 3 receberam $900 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de superfosfato triplo (0-48-0). Ao longo do tempo, a fertilização por fósforo foi reduzida durante 10 anos, a aplicação de superfosfato triplo foi feita para estabelecer índices de fósforo ao longo dos anos de plantio.

O milho, variedade *Dekalb 668*, foi a primeira cultura em rotação (junho de 1999), e como é de costume, na região foi plantada em junho e colhida no início de novembro de 1999. Não foram empregadas as operações de preparo do solo, e foi realizado o plantio direto. Dois meses antes do plantio foi aplicado calcário dolomítico na proporção de $2,47 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($1 \text{ t} \cdot \text{acre}^{-1}$), de acordo com a análise de solo. No plantio foi aplicadas a composição de adubo 9-23-30 na relação de $3,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($300 \text{ lb} \cdot \text{acre}^{-1}$) e uma solução 30% de Nitrogênio, na concentração de $102,76 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($11 \text{ gal} \cdot \text{acre}^{-1}$). Na aplicação por cobertura foi aplicada uma solução de Nitrogênio de 30% na concentração de $186,7 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($20 \text{ gal} \cdot \text{acre}^{-1}$). A aplicação de nitrogênio foi dividida; a primeira foi aproximadamente uma semana após o plantio e a segunda no estágio de nodulação (6 semanas após o plantio).

O trigo (variedade Coker 9704) foi a cultura plantada logo após o milho, no mês de novembro de 1999. No plantio foi aplicada a composição de adubo de 9-23-23 na proporção de $300 \text{ lb} \cdot \text{acre}^{-1}$ ($370,7 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) e Manganês na proporção de $10 \text{ lb} \cdot \text{acre}^{-1}$ ($12,3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). Como adubação em cobertura foi aplicada solução de Nitrogênio na proporção de 26

gal/acre ($243,2 \text{ l.ha}^{-1}$). A aplicação em cobertura foi 8 semanas após o plantio, quando a temperatura subiu acima dos 10°C , favorecendo o perfilhamento.

No segundo ano (2000) a soja foi plantada como segunda cultura de rotação. A soja, variedade Asgrow, foi plantada sem preparo de solo e imediatamente após a colheita do trigo (junho-novembro/2000). Esta cultura não recebeu adubação e foi colhida em meados do mês de novembro de 2000.

Os rendimentos foram determinados para cada manejo de água ou tratamento. Na cultura de milho demarcou-se uma área de 5m por 23m entre os drenos. Seguiu-se o mesmo modelo de área para as culturas de trigo e soja.

5.3. Condições Gerais de Campo Para os Sistemas de Manejo

O campo experimental (13,8 hectares) devidamente instrumentado para estudar o movimento e conteúdo da água subterrânea foi utilizado para os experimentos aqui descritos. O campo experimental está localizado na estação *Experimental Tide Water* localizada próximo à cidade de Plymouth, na costa oeste do Estado de Carolina do Norte (aproximadamente 300 km da North Carolina State University, Raleigh-NC-USA).

As mensurações da umidade do solo pelo método de campo (TDR) e o pelo método analítico do balanço de água (simuladas pelo DRAINMOD) foram feitas para cada operação de manejo (drenagem convencional, drenagem controlada e subirrigação) nos diferentes períodos agrícolas.

Em cada período agrícola foram plantadas as culturas de milho, trigo e soja. Isso permitiu a aplicação dos diferentes tratamentos apropriados para cada estação

climática (inverno chuvoso e verão com déficit hídrico). Neste contexto, a utilização do método do TDR foi realizada para os diferentes períodos agrícolas ou estações climáticas, bem como a aplicação do método do balanço de água no perfil do solo.

A estratégia geral do manejo de água foi implementada do mês de junho de 1999 até outubro de 2000 (Tabela 1). No período do *cultivo de milho* as parcelas **1, 3, 4 e 7** foram *manejadas* com *subirrigação* e as parcelas **2, 5, 6 e 8** foram manejadas com *drenagem convencional* ou *drenagem livre*. No período do *cultivo de trigo*, as parcelas **1, 3, 4 e 7** foram manejadas com *drenagem controlada*, e as parcelas **2, 5, 6 e 8** com manejo de *drenagem convencional*. E no período do *cultivo da soja* as parcelas **1, 3, 4 e 7** foram manejadas com *subirrigação* e as parcelas **2, 5, 6 e 8** foram manejadas com *drenagem convencional*.

Tabela 1 Culturas e manejos de água para as diferentes estações agrícolas, Estação Experimental TideWater, NCSU- Carolina do Norte, USA.

PERÍODO ANO	CULTURA	MANEJO DE ÁGUA	PARCELAS
Jun/Nov 99	MILHO	SUBIRRIGAÇÃO	1, 3, 4 e 7
		DRENAGEM CONVENCIONAL	2, 5, 6 e 8
Nov/99-Jun/00	TRIGO	DRENAGEM CONTROLADA	1, 3, 4 e 7
		DRENAGEM CONVENCIONAL	2, 5, 6 e 8
Jun/Nov00	SOJA	SUBIRRIGAÇÃO	1, 3, 4 e 7
		DRENAGEM CONVENCIONAL	2, 5, 6 e 8

A área de pesquisa foi instrumentada para estudos do manejo do lençol freático, desde 1988. A área é rodeada por um canal de aproximadamente 2,0 m de profundidade. Tubos plásticos de drenagem (com 101 mm de diâmetro) foram instalados com espaçamento de 22,9 m e de 0,8 a 1,1 m de profundidade. A efetividade destes drenos foi limitada pela baixa condutividade hidráulica da camada do solo em que se encontram os drenos.

Novos drenos foram instalados em 1990 e 1991, a uma profundidade de 1,2 a 1,4 m da superfície do solo, com um espaçamento de 11,4 m entre tubos. A área foi dividida em oito parcelas experimentais, cada uma com 1,7 ha (Fig 3) (Munster et al. 1994).

Foram instaladas válvulas, nas linhas de dreno antigas, permitindo operar o sistema com espaçamentos de 22,9 e 11,4 m; portanto, 3 ou 6 linhas de dreno podem drenar cada casa ou parcela (1 linha central e 2 linhas de bordadura ou 2 linhas centrais e 4 linhas de bordadura). Portanto, os espaçamentos dos drenos nas parcelas foram mantidos constantes (11,4) m. como mostra na Figura 3, além de uma vista geral da área de experimento.

Os solos da área experimental foram classificados como Portsmouth franco arenoso (típico Umbraquilt; franco areia fina). Estes tipos de solos são pobres em drenagem natural, e são formados em franco aluvial e sedimentos marinhos. O horizonte Ap espesso de 0,3 m, de coloração escuro, franco areia fina, com conteúdo de matéria orgânica na faixa de 3 a 5%. Varias camadas de areia fina e franco estendem-se até um franco areia argilosa localizada em 0,5 a 0,9 m de profundidade.

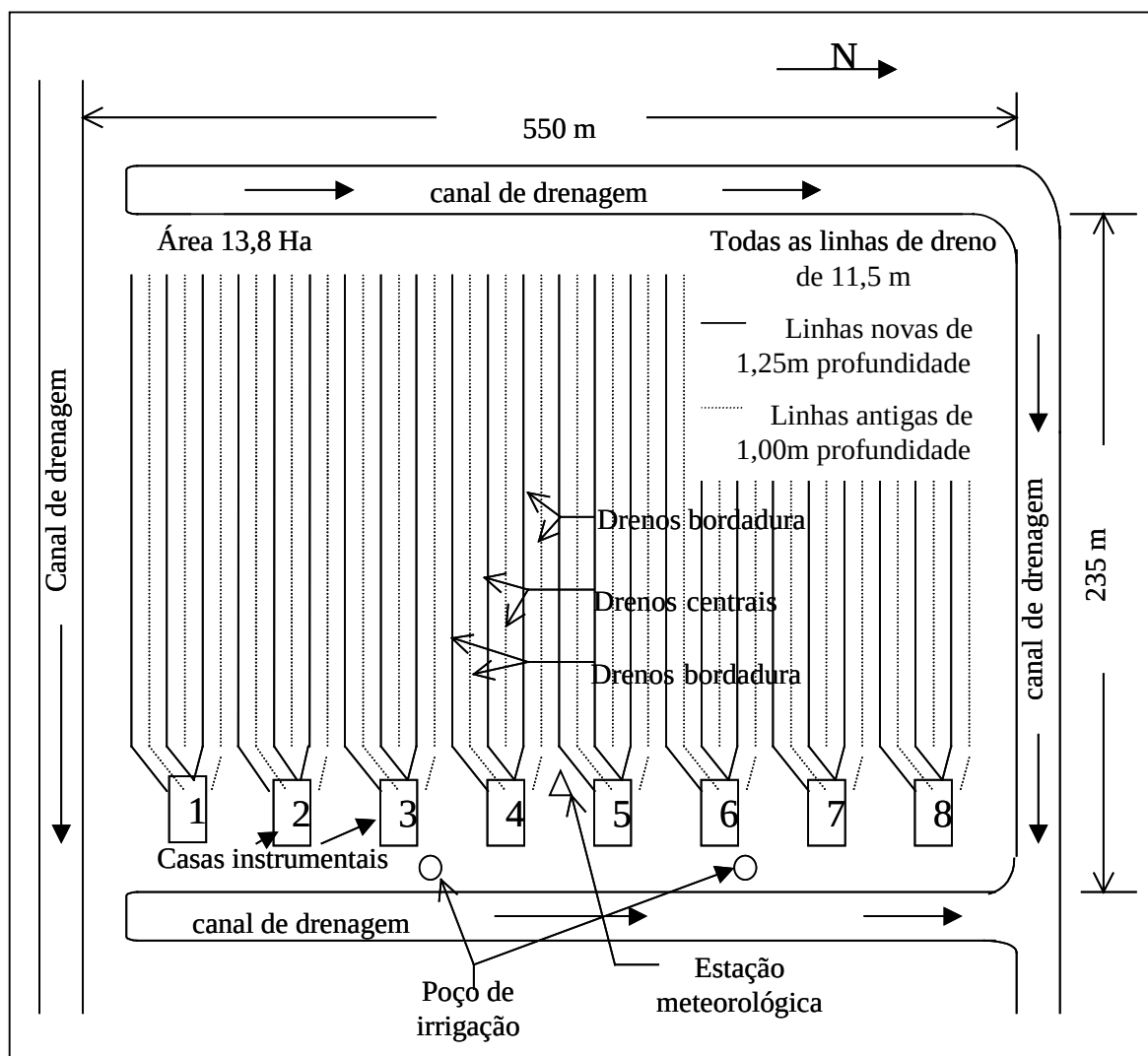


Figura 3 Layout experimental para o estudo do manejo de água no lençol freático em Plymouth, NC.

A camada franco areia argilosa é limitada por um horizonte composto de camadas finas alternadas de areia ou areia franca e silte. Dependendo da localização no campo, este horizonte está limitado de 1,0 a 1,2 m por uma camada de areia argilosa. Areia

grossa misturada com bolsões de franco areia e argila é encontrado de 1,2 ate 2,4m. Num depósito compacto de argila marinha, aproximadamente a 6,1m, observa-se uma espessa e restrita infiltração vertical do perfil de 2,4m.

Cada parcela experimental tem um depósito subterrâneo e uma casa devidamente instrumentada (Figura 4). Cada depósito subterrâneo intercepta a saída dos tubos de drenagem de 6 drenos adjacentes subsuperficiais, bem como os drenos que coletam o escoamento superficial. Cada depósito subterrâneo contém quatro cilindros receptores de PVC, com 0,61m de diâmetro, que funcionam como tanques de coleta. Os tanques centrais e laterais (de borda) são de 1,8m de altura e os dois tanques de coleta de escoamento superficiais têm 0,9m de altura.

Estes quatro tanques de coleta interceptam a água que vem do campo ou parcela experimental. O tanque central recebe água de dois drenos subsuperficiais centrais, cada tanque de escoamento superficial recebe água de cada um dos coletores superficiais, e os tanques laterais, ou marginais, recebem água de quatro drenos subsuperficiais de fora (drenos marginais). Todos os quatro tanques coletores são equipados com bombas hidráulicas e bóias de controle que automaticamente acionam as bombas hidráulicas dos tanques coletores com saída para os canais de saída (Figuras 4 e 5).

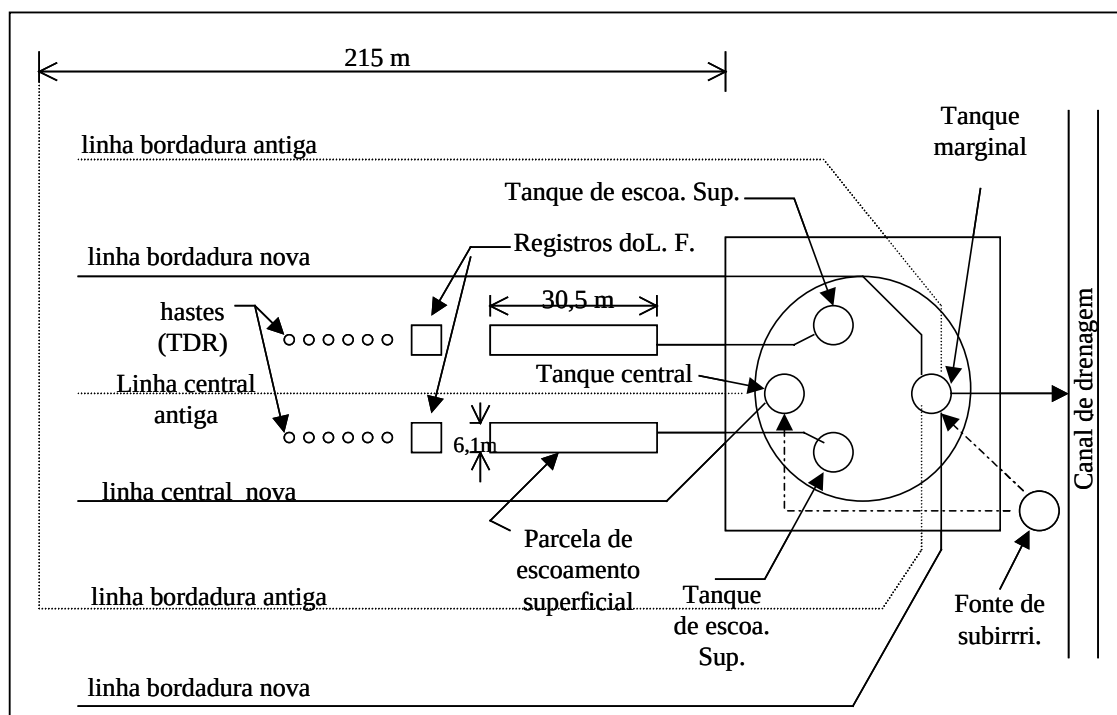


Figura 4 Esquema da disposição dos equipamentos de manejo para as parcelas experimentais.

A função das linhas marginais de drenagem é prevenir que os tratamentos de manejo do lençol freáticos não sejam influenciados pelas condições de solo água da parcela adjacente. Os dois drenos marginais a cada lado da linha central de dreno funcionam para isolar hidraulicamente a área drenada da influência da parcela experimental adjacente.

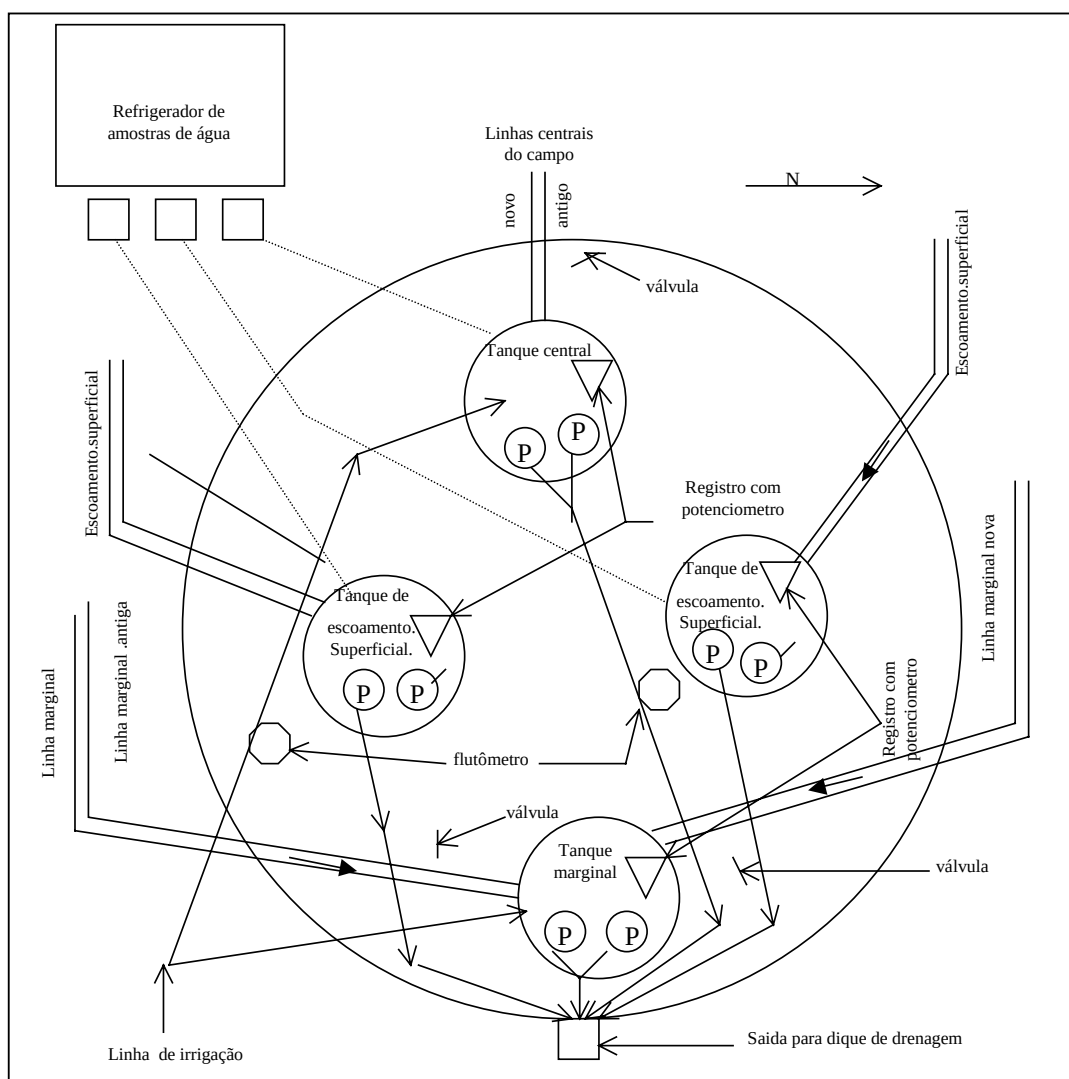


Figura 5 Esquema experimental da instalação para o sistema de manejo drenagem controlada nas parcelas experimentais de campo.

Três tratamentos de manejo do lençol freático foram implementados usando os drenos subsuperficiais, como já descrito. Para o tratamento de drenagem livre ou convencional, as bombas foram colocadas para permitir que o nível de água nos tanques receptores sempre se mantivesse abaixo do nível de água nos tubos de drenagem do campo. No tratamento de drenagem controlada, as bombas trabalham para remover a água quando o

nível da água nos tanques receptores excede a faixa de controle, o qual é mais alto que o tubo de dreno.

As bombas funcionam quando o nível da água fica excedente. O ponto de controle é quando bomba para de funcionar, isto ocorre quando o nível de água no tanque alcança o ponto de controle. Nenhuma água é bombeada para dentro do tanque para manter o nível ou ponto de controle na drenagem controlada, limitando assim as condições de campo, onde uma comporta ou dique de drenagem serve para bloquear a drenagem até que o nível da água no dique suba até a elevação da comporta.

No tratamento de subirrigação, o nível da água no tanque receptor foi mantido num ponto de controle acima da saída dos drenos no campo. A água de irrigação vem de um poço de irrigação e é bombeada dentro do tanque para substituir a água utilizada ou perdida, via subirrigação. Quando ocorrem chuvas, a água drenada é bombeada para fora do tanque para manter o nível controle.

O nível controle muda segundo a estratégia do manejo do lençol freático. Para determinação do exato momento da elevação do nível que depende do sistema radicular da cultura plantada, pesquisas anteriores foram realizadas. Durante o período experimental aqui considerado, os dados de drenagem e subirrigação foram coletados e processados por micro computadores localizados em cada casa associada a cada tratamento considerado.

Cada parcela experimental tinha dois poços de 100 mm de diâmetro equipados com sensores automáticos que registram a flutuação do lençol freático. Um dos poços localizado entre duas linhas de dreno, uma central e outra marginal. Ambos poços são equipados com bóia ou flutuadoras, com seus respectivos pesos, e um sistema de polia

conectado a um potenciômetro (*Omni Data Pod*) montado sobre uma plataforma (Stevens Redorder).

Os registros de profundidades foram continuamente armazenados em dois pontos de cada parcela. A profundidade do poço de irrigação (0,91 m), e os dois poços superficiais de irrigação (a 0,23 m) foram localizados no lado oeste do campo (Fig. 4).

A área do experimento foi equipada com uma estação meteorológica completa, (Campbell CR-10), equipada com dois pluviômetros adicionais. Os parâmetros meteorológicos, medidos na área de experimento, foram: precipitação pluviométrica, temperaturas do ar e solo, velocidade dos ventos e sua direção, e radiação solar. Dados de chuva foram coletados de três pluviôgrafos automáticos e dois manuais.

Pluviômetros múltiplos permitiram comparações entre registros de chuvas totais para documentar corretamente a funcionalidade dos pluviômetros e determinando consistência nos dados de chuva. A evapotranspiração potencial foi calculada usando a temperatura do ar, a radiação solar, e os dados de velocidade do vento coletados nas estações meteorológicas. Os cálculos foram feitos pelos seguintes métodos: *Thorntwaite*, *Jensen-Heise*, *Turc*, *Penman-Monteith* referencia grama, e *Penman-Monteith* referencia alfalfa. Vide Jensen et al. (1990) para detalhes do método.

A precisão da coleta dos dados foi um objetivo principal do projeto de campo. A validade da análise subsequente depende, portanto, da precisão dos dados de campo. Projetos de pesquisa em grande escala, que utilizam o manejo do lençol freático, requerem um sistema de coleta automático dos dados, para medir respostas espaciais e tempo. Os microcomputadores foram uma ferramenta importante adaptado para coletar dados precisos do campo na área de pesquisa da estação de Plymouth.

Os tanques receptores, que interceptam os drenos superficiais e subsuperficiais, foram instrumentados para quantificar as vazões de saída. Adicionando-se poços monitorados, os mesmos foram instalados próximos às parcelas e equipados com instrumentos para medir o nível da água. Os dados dos poços monitorados com instrumentos foram armazenados e submetidos preliminarmente a análises nos micro computadores de campo.

Dois instrumentos são usados para medir volumes de drenagem: potenciômetros e flutômetros ou bóias. Os potenciômetros usados do tipo Bourns (35405-001-103) são aparelhos simples e baratos que podem sair de zero para dois volts de energia e dez voltas de revolução.

O nível de água de cada tanque de drenagem é medido com um potenciômetro que é contado e registrado na plataforma tipo Stevens. Os potenciômetros são girados pelas roldanas para registrar, permitindo a bóia registrar e a roldana acionar para rodar o potenciômetro. Para um percurso 0,305 m da bóia ou flutômetro (0,305 m de mudança do lençol freático) o potenciômetro rodava uma revolução completa. A taxa e volume de fluxo foram determinados pelas voltas dos potenciômetros, como descrito na seção de “programa de coleta de dados”.

Outro instrumento usado para medir a taxa de fluxo e volume é o sensor de fluxo Signet Industrial MK 515 Roda de Paletas. Estes flutômetros emitem um sinal quando o ímã da roda de paletas é movido, passando pela bobina no corpo principal do flutômetro. Os flutômetros são bobinados para um circuito de alta amperagem, o qual condiciona os sinais para converter a frequência de voltagem. A saída do bobinado é para um relógio ou cartão TC 24 (cartão registrador) por um aparelho de tempo real. Este cartão

registrador é localizado numa expansão do computador, que pode manter e sair com 16 bits contando de outros cinco aparelhos simultaneamente.

Os flutômetros foram instalados em cada tubo de descarga que estavam conectados para uma bomba de saída no tanque de controle. Os flutômetros foram também conectados a um tubo de PVC de uma polegada de diâmetro, que supria água de irrigação ao tanque de controle (Figura 5).

Os potenciômetros *Bourns* foram também utilizados para monitorar os poços que mediam a altura do lençol freático que foram montados e a parafusados dentro de aparelhos em caixas sobre os poços, estando os mesmos associados a pesos. Estes potenciômetros foram diretamente anexados para bóias e roldanas.

Cada casa tinha computadores, que foram usados para coletar, processar, e armazenar os dados de campo. Estes computadores foram montados no laboratório usando componentes da *Blue Earth*, modelo 4-85 (MONKATO.MN 56001).

5.4 Determinação das Propriedades do Solo

5.4.1 Coleta e Preparação de Amostras de Solo

Amostras de solo foram coletadas no campo para determinar textura, densidade, porosidade, conteúdo de carbono, conteúdo de água, pH, condutividade hidráulica vertical e horizontal. Os valores de cada parâmetro serão apresentados mais adiante com seus respectivos métodos descritos.

Amostras de solo foram analisadas em laboratório para determinar as propriedades do solo para cada parcela experimental. Para estas análises de laboratório foram obtidas amostras do estrato de solo. Estas amostras de estrato de solo foram coletadas no campo usando-se um coletor de estrato de 76 mm de diâmetro. O estrato de solo foi coletado nos locais onde se monitoravam os poços. A monitoração nos poços foi desde a parte superficial, de 0,15 em 0,15 m ao longo do poço com a intenção de localizar as camadas como foram determinados os estratos de solo.

Os estratos de solo foram obtidos usando-se uma operação hidráulica, instalando um perfurador de poços num trator de 76 mm de diâmetro que foi até 0,91 m de profundidade. O solo foi extraído de dentro de tubo de PVC de 102 mm de diâmetro, tendo sido cortado em duas partes iguais. Estes estratos de solo foram então subdivididos em pequenas seções de 76 mm para 152 mm de comprimento, baseados na textura, cor e obviamente nas camadas. Estes pequenos estratos foram então revestidos com parafina no campo para manter a forma original da amostra e conteúdo de umidade. As amostras de solo para cada extrato foram então transportadas para o laboratório do Departamento de Solos da North Carolina State University-Raleigh-USA, para serem analisadas para as propriedades do solo.

As propriedades de solo que caracterizam as camadas impermeáveis no local da pesquisa foram determinadas em testes de campo e em laboratório. Estas propriedades incluem condutividade da amostra saturada, curva de retenção de água no solo, densidade do solo, porosidade, conteúdo de matéria orgânica, textura, pH do solo e conteúdo de umidade. Os valores destas propriedades são vitais para o manejo e simulação do movimento da água subterrânea e transporte de nutrientes e poluentes.

5.4.2 Condutividade Hidráulica

Dois tipos de testes foram empregados para estimar valores da condutividade hidráulica do solo saturada para a área de pesquisa. O teste para condutividade foi conduzido no campo a nível constante, mas o principal teste foi conduzido no laboratório usando amostras de solo coletadas como descrito anteriormente. A condutividade hidráulica nas amostras de solo foi determinada pelo teste de nível constante, como descrito por Dirksen (1975). Este teste mantém constante a carga do nível de água sobre uma amostra de solo saturado durante o teste. O volume de água que flui através da amostra durante o teste é medido. A condutividade hidráulica saturada pode ser calculada usando a seguinte equação:

$$K_{sat} = \frac{Q}{\left\{ \left(\frac{dh}{dl} \times A \times T \right) \right\}} \quad (7)$$

em que, Q é o volume de água que fluiu através da amostra durante um tempo T, dh é a diferença de carga hidráulica através da amostra, dl é o comprimento da amostra, A é a seção da área da amostra e T é a duração do teste.

As amostras de solo obtidas para o teste de condutividade hidráulica no laboratório foram delimitadas para uma profundidade de aproximadamente 1,0 m. As amostras foram todas obtidas numa direção vertical. Os testes de laboratório fornecem, portanto resultados da condutividade hidráulica vertical.

Há varias limitações associadas com este método. Geralmente as amostras são pequenas, 51 mm para 102 mm de diâmetro, e não indeformadas. Usualmente é

difícil obter uma “representatividade” em pequenas amostras que descrevam exatamente as atuais condições de campo. Também durante o procedimento para obter uma amostra indeformadas ocorre algum grau de deformação. Para este estudo, um sonda de solo foi introduzida dentro do solo para obter amostras. Durante este procedimento, a sonda no solo pode compactar as amostras de solo que estão sendo coletadas.

Outra limitação para o uso das sondas é que, após extração da sonda, a amostra freqüentemente não está em perfeita forma cilíndrica. Neste estudo, foram cortadas mostras não cilíndricas, no comprimento para obtenção de tamanhos pequenos, de forma poligonal ou irregular. A determinação da área da amostra foi então introduzida como outra fonte de erro potencial.

A secção da área da amostra foi determinada por decalque da borda da sonda numa folha de papel. A área da amostra foi calculada usando o programa de computador (CAD) que registra graficamente a borda da amostra.

Os testes de campo foram conduzidos nas parcelas experimentais usando diâmetros de 51 mm. Estes testes foram conduzido de acordo com Hvorslev (1951). Primeiro um volume de água é extraído do poço usando uma bomba e uma bóia. O tempo é registrado, em seguida o aumento da água no poço é medida de acordo com o tempo. O tempo usado (T) é então determinado por partes do tempo usado no percurso, até a normalização do nível da água. A condutividade é calculada pela equação:

$$K_{sat} = A (F \times T) \quad (8)$$

em que, A = representa a seção da área do poço, T = a duração do tempo e F = o fator da forma.

O fator da forma (F) foi determinado (Hvorslev, 1951) para seis tipos de poços instalados. O fator da forma para um “poço de solo uniforme” é idêntico para a configuração dos poços da estação experimental localizada em Plymouth. Uma limitação inerente à construção do fator da forma é que a condutividade saturada vertical tem que ser predeterminada, ou seja, a taxa de condutividade saturada horizontal para a vertical deverá ser conhecida ou estimada. A condutividade vertical média determinada em laboratório foi usada por os poços menores que 1,0 m de profundidade. Para profundidades de 1,00 m, a taxa da condutividade horizontal para a vertical foi assumida como 1,0 desde que o tipo dominante de solo abaixo de 1,0 m seja textura areia.

Os resultados médios para dados de condutividade hidráulica estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Média da condutividade hidráulica nas parcelas experimentais, para diferentes profundidades de coleta de amostras de solo.

PROFUNDIDADE	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA ($K_{SAT \text{ HORIZONTAL } v-m.d^{-1}a}$ e $K_{SAT \text{ VERTICAL } H-m.dia^{-1}}$)	
	HORIZONTAL	
0,00m-0,10m		0,06
	VERTICAL	0,06
0,10m-0,30m	HORIZONTAL	0,19
	VERTICAL	0,19
0,30m-0,50m	HORIZONTAL	0,70
	VERTICAL	0,70
0,50m-0,70m	HORIZONTAL	1,50
	VERTICAL	1,83

5.4.3 Textura do Solo

A textura do solo (Tabela 3) foi determinada num total de 107 amostras coletadas nas parcelas de pesquisa (total de 8 parcelas). O tamanho da parcela foi analisado como descrito por Gee & Bauder (1986). Os parâmetros medidos foram percentagem de areia, silte e argila, em cada amostra. Cada amostra solo da Estação de Pesquisa aqui considerada foi examinada e classificada pelo Dr. Ray Daniels, do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Estadual da Carolina do Norte.

Tabela 3 Dados de textura do solo nas parcelas experimentais, para diferentes profundidades de coleta de amostras de solo.

PROFUNDIDADE MÉDIA (m)	TEXTURA	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)
0,76-0,81	a, Fa e aF	78,20	10,20	11,60
0,86-0,91	a, Fa e aF	78,80	10,40	10,8

a = areia; Fa = franco arenoso; aF = areia franca.

5.4.4 Densidade do Solo

A densidade do solo (Tabela 4) é uma propriedade básica definida como a massa de solo seco por unidade de volume de solo (g.cm^{-3}). O método para determinar densidade do solo é descrito por Blake e Hartge (1986). As amostras de solo obtidas para testes de laboratório da condutividade foram secas em estufa até a obtenção do peso constante. Quando secas, as amostras foram pesadas e o resultados foram então divididos pelo volume da amostra, determinada durante os testes de condutividade.

5.4.5 Porosidade

A porosidade (Tabela 5) é definida como o volume de espaços de ar (volume de vazios) por unidade de volume de solo ($\text{mm}^3 \cdot \text{mm}^{-3}$). O método aqui usado para determinar porosidade foi o mesmo descrito por Danielson e Sutherland (1986).

Tabela 4 Valores médios da densidade do solo nas parcelas experimentais, para amostras de Solo coletadas a diferentes profundidades

PROFUNDIDADE MÉDIA (m)	DENSIDADE DO SOLO MÉDIA (g/cm³)
0,05	1,09
0,15	1,16
0,25	1,59
0,36	1,54
0,46	1,61
0,56	1,59
0,66	1,40
0,75	1,54

Tabela 5 Valores médios da porosidade do solo nas parcelas experimentais. Dados para amostras de solo coletadas a diferentes profundidades

PROFUNDIDADE MÉDIA (m)	POROSIDADE (V_v.V_t⁻¹)
0,05	0,43
0,15	0,44
0,25	0,35
0,36	0,34
0,46	0,32
0,56	0,33
0,66	0,32
0,75	0,32

5.4.6 Carbono Total

O carbono total foi determinado pelo procedimento estabelecido no método descrito por Nelson & Sommers (1982). Este método pressupõe a ausência de fontes de carbono mineral nos solos pesquisados, local que apresenta um aquífero superficial até 2,5 m de profundidade. Foi feita a determinação de carbono total orgânico. Os valores médios para o carbono total orgânico (%) estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 Valores médios do conteúdo de carbono total do solo nas parcelas experimentais. Dados para amostras de solo coletadas a diferentes profundidades

PROFUNDIDADE MÉDIA (m)	CARBONO TOTAL ORGANICO (%)
0,05	3,60
0,15	3,91
0,25	3,72
0,35	1,86
0,45	0,75
0,55	0,87
0,65	0,53
0,75	0,23

A tabela 6 mostra que o carbono total orgânico está a aproximadamente 4% da superfície até 0,25m de profundidade. De 0,25 para 0,50 m o carbono total orgânico cai de 4% para 0,25%, de aqui em diante tende a diminuir.

5.4.7 Conteúdo de Água Residual

O conteúdo de água no solo (Tabela 7) baseado no peso foi determinado para cada amostra, pelo método gravimétrico. O conteúdo de água baseado no peso é a proporção da água na amostra para o peso de uma amostra de solo seco. O conteúdo de água em volume é geralmente mais usado, e é calculada multiplicando-se a densidade aparente pelo conteúdo úmido baseado no peso. Portanto, o conteúdo de umidade em volume expressa como o volume de água por volume de solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). A exatidão do conteúdo de água volumétrico é dependente da exatidão do valor da densidade aparente. O conteúdo de água residual mostrado na Tabela 7, foi determinado no laboratório submetido a uma pressão de 15 bar (Klute 1986)

Tabela 7 Valores médios do conteúdo de água residual do solo nas parcelas experimentais. Dados para amostras de solo coletadas a diferentes profundidades

PROFUNDIDADE MÉDIA (m)	UMIDADE DO SOLO (Vv)	ÁGUA RESIDUAL (%Ps)
0,06	0,40	0,12
0,19	0,38	0,14
0,30	0,38	0,12
0,41	-	0,13
0,51	-	0,13
0,61	-	0,11
0,74	-	0,13

Vv = (cm^3/cm^3); Ps = bar

5.4.8 pH do Solo

O pH do solo, para cada amostra, foi determinado, usando-se aparelho apropriado para medidas no campo. O pH do solo em estudo é maior próximo à superfície do solo (5,5) e declinou para valores próximos a 4 na profundidade de 0,75m.

5.4.9 pH da Água

O pH de cada amostra de água foi obtido usando-se aparelho apropriado para medidas no campo. Valores para o pH da água estavam na faixa de 6,5 (para águas dos tanques controle de drenagem e/ou subirrigação).

5.5 Curva Característica de Água no Solo

Após os testes de laboratório para condutividade saturada, as amostras de solo indeformadas foram testadas para características de solo/água. Este teste de laboratório foi o descrito por Klute (1986). Inicia-se a determinação com uma amostra solo saturada, que é então submetida a vários níveis de pressão até aproximadamente 100.000 Pa (1 bar). O volume de água que é drenado em cada grau de pressão é medido. O conteúdo de umidade é então relacionado à pressão correspondente, e a relação é aplicada para confeccionar a curva característica de umidade.

Depois de completado o teste para pressão até 100.000 Pa (1 bar), as amostras foram transferidas para um aparelho do tipo pressão estufa que é capaz de aplicar

pressões acima de 1.500.000 Pa (15 bar). O teste foi conduzido da mesma forma com 100.000 Pa (1 bar), nas amostras indeformadas de solo. O conteúdo de água no solo calculado em 1.500.00 Pa (15bar) de pressão é considerado como a água residual da amostra. O conteúdo de água residual é a quantidade de água que não pode ser removida das partículas de solo pela força da gravidade e osmose das células. Assumindo-se que o ponto de murcha é submetido a 15 atm e a água retirada por gravidade é a 0,3 atm. Na Figura 6 apresentamos a curva de retenção de umidade a diversas profundidades.

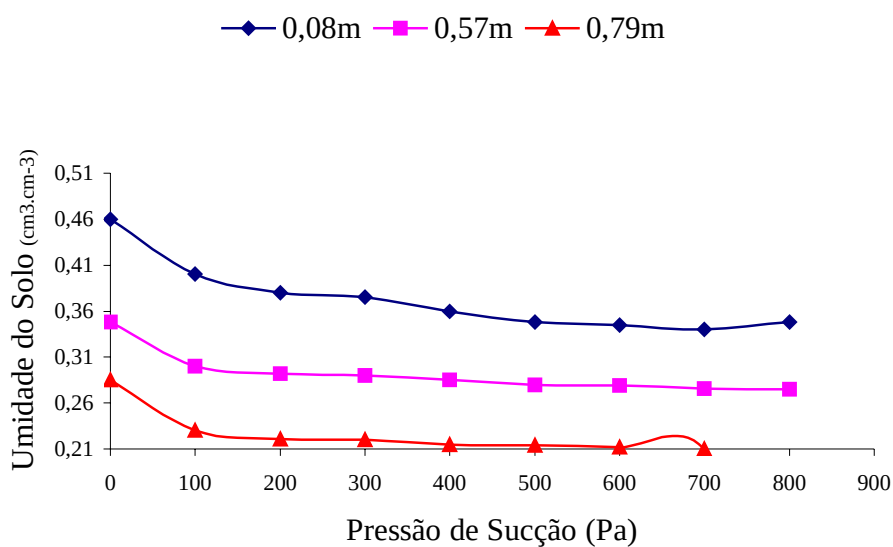


Figura 6 Curva característica de umidade do solo nas parcelas experimentais para diferentes profundidades.

5.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados referentes à quantidade de água, determinado pelo TDR, e pelo balanço de água no solo para cada tratamento: subirrigação, drenagem convencional ou drenagem controlada, foram comparados (grupos 2 tratamentos com 8 parcelas, e fatores TDR e BAS) segundo análise de variância (ANOVA), após teste de Bartlett para homogeneidade de variância de médias. Para dados com variância não homogênea, segundo o teste de Bartlett ($p < 0,05$), a comparação das médias foi realizada segundo estatística não paramétrica (KRUSKALWALLIS).

A análise de correlação de Pearson ou correspondente não paramétrico, Spearman, foi feita entre dados obtidos do TDR e BAS para cada tratamento. Para cada análise considerou-se diferença significativa quando $p < 0,05$. Todas as comparações estatísticas foram realizadas pelo “software GraphPad InStat” (Copyright © 1990-1993, Dr. Cipolla Neto, Universidade de São Paulo).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Componentes do balanço de água no solo

No período de verão e outono de 1999, foi plantada nas parcelas experimentais a cultura de milho, a mesma submetida aos tratamentos de manejo de lençol freático como: (i) drenagem convencional (Dr) e (ii) subirrigação (SI). Esses tratamentos foram previstos devido às condições do solo e clima da época do ano. Durante o cultivo do milho, a taxa de evapotranspiração potencial (ET) foi superior a precipitação (PP), sendo, portanto, justificável o suprimento de água, via manejo de subirrigação, em média de 2,5 mm durante quase todo o período, isto concomitante com pouca retirada de água pelo processo de drenagem (Figura 7).

Os dados apresentados na Figura 7 mostram a situação dos parâmetros de precipitação e evapotranspiração para o período considerado onde mostra uma ET de 4,5

mm.dia⁻¹ e precipitações de períodos curtos. Podemos observar também a coerência do comportamento do lençol freático a cada evento da precipitação nos tratamentos.

Os manejos realizados devem permitir a manutenção de água no perfil do solo, uma vez que, durante os períodos de precipitação alta, a água foi retirada das parcelas sob drenagem e drenagem controlada, seguindo a variação da altura do lençol freático. Os resultados referentes à água adicionada no sistema e a altura do lençol freático (Figuras 7, 8 e 9) indicam claramente como o comportamento da água drenada segue a variação da altura do lençol freático.

O objetivo principal da drenagem é, portanto, remover o excesso de água do sistema resultante quando há alta precipitação. O manejo de subirrigação, por outro lado, é usado para suprir água ao sistema até a zona radicular, quando há demanda de evapotranspiração (Skaggs, 1999). A utilização da subirrigação cumpre então o papel de adicionar água ao sistema, permitindo assim a manutenção de água no perfil do solo.

Podemos observar, no cultivo do milho, que os dados referentes à altura do lençol freático (Figura 7) mostram exatamente a manutenção dos níveis de água, exceto em picos de precipitação (dia 205 e últimos dias do período agrícola). O tratamento de SI manteve uma profundidade não menor que 0,70 m, ao passo que o tratamento de drenagem mantém sempre a 1 m de profundidade. Nas estações de inverno e primavera, na área experimental planta-se o trigo, cultura própria para este clima (plantado no início do mês de dezembro de 1999 e colhido no mês de maio de 2000). Este período de precipitações (PP) frequentes e pouca evapotranspiração, como mostra a Figura 8, propicia a prática dos tratamentos de *drenagem controlada* e *drenagem convencional*, pela falta de evapotranspiração e excesso de água no sistema radicular.

A drenagem controlada tem sido aplicada em campo para conservar a água e aumentar o rendimento de culturas (Person et al. 1987, Skaggs 1999). É também um método eficiente para reduzir perdas de nutrientes pela planta, decorrente de uma drenagem excessiva (Evans et al. 1991). A drenagem controlada reduz a intensidade da drenagem subsuperficial, aumentando a altura do lençol freático. Também podemos observar o comportamento coerente da altura do lençol freático com os dados de água drenada em ambos tratamentos (Figura 8), com tratamento de drenagem convencional sempre rebaixando o lençol freático próximo de 1 m de profundidade e o tratamento de drenagem controlada mantendo em torno de 0,60 m (Figura 8).

Nestas regiões, nas estações seguintes ao período de trigo, planta-se a soja, cultura esta de rotação com milho, em plantio direto no mês de junho e colhida no início de novembro de 2000. Neste período, face às condições climáticas e o tipo de solo foram aplicados os tratamentos iguais aos da cultura do milho, estação correspondente do ano 1999: subirrigação e drenagem convencional.

Na (Figura 9) apresentamos o comportamento da PP, que neste ano apresentou-se com mais intensidade e frequência que no ano de 1999, provocando a elevação do lençol freático e drenagens constantes, tanto no tratamento de drenagem (Dr) como no tratamento de subirrigação (SI). No tratamento de subirrigação, devido à alta taxa de precipitação, foi realizada a remoção de água pelo manejo de drenagem controlada (Figura 8). O comportamento da água drenada dentro do tratamento de subirrigação também seguiu a variação da altura do lençol freático. Nestes momentos ocorreu pouco suprimento de água no tratamento de subirrigação.

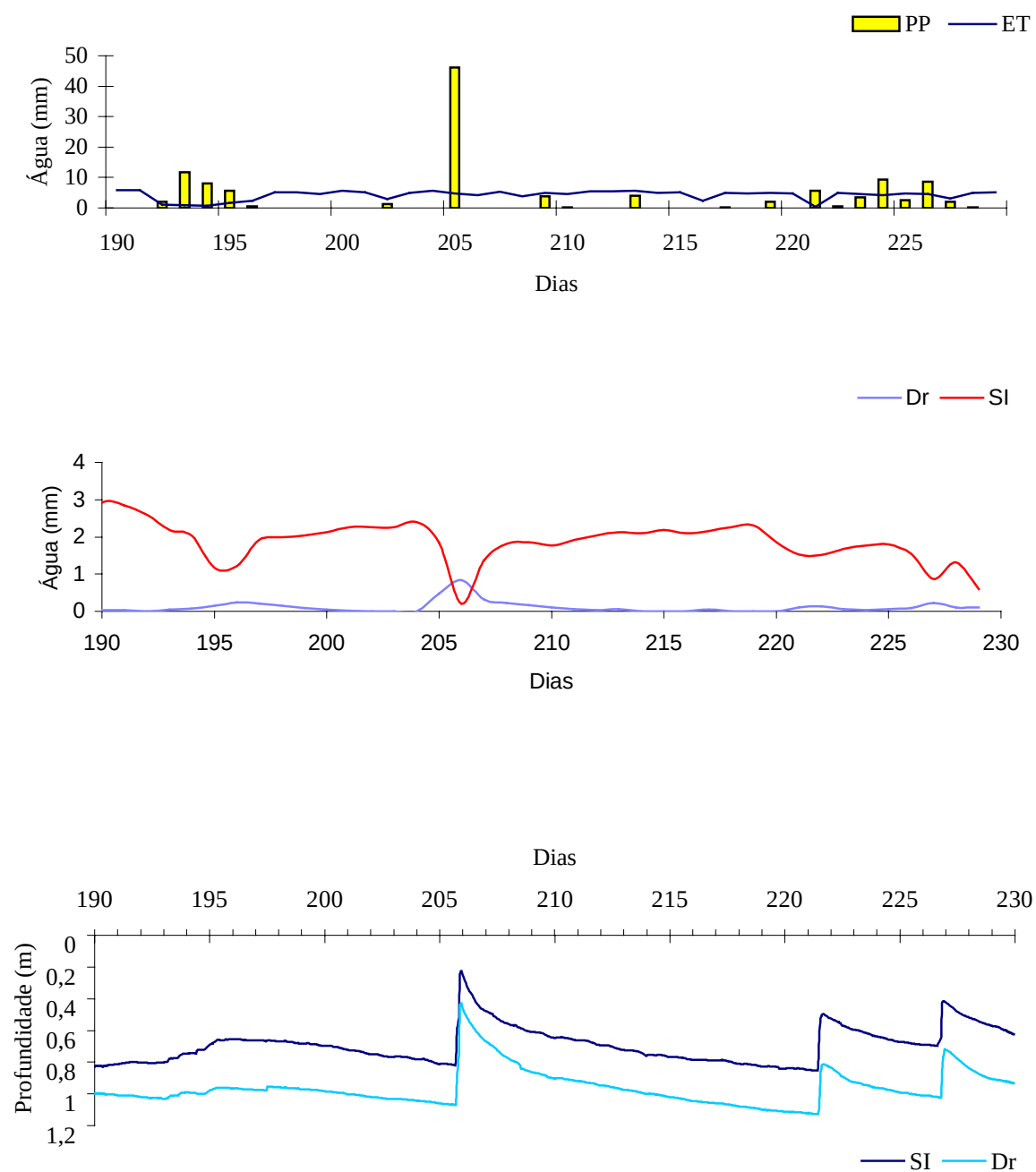


Figura 7 Variação temporal na precipitação (PP) e evapotranspiração potencial (ET), volume de água drenada no tratamento de drenagem convencional (Dr), volume de água suprida no tratamento de subirrigação (SI) e profundidade do lençol freático nos tratamentos de Dr e SI, para o período agrícola do milho (Jun/Nov 1999).

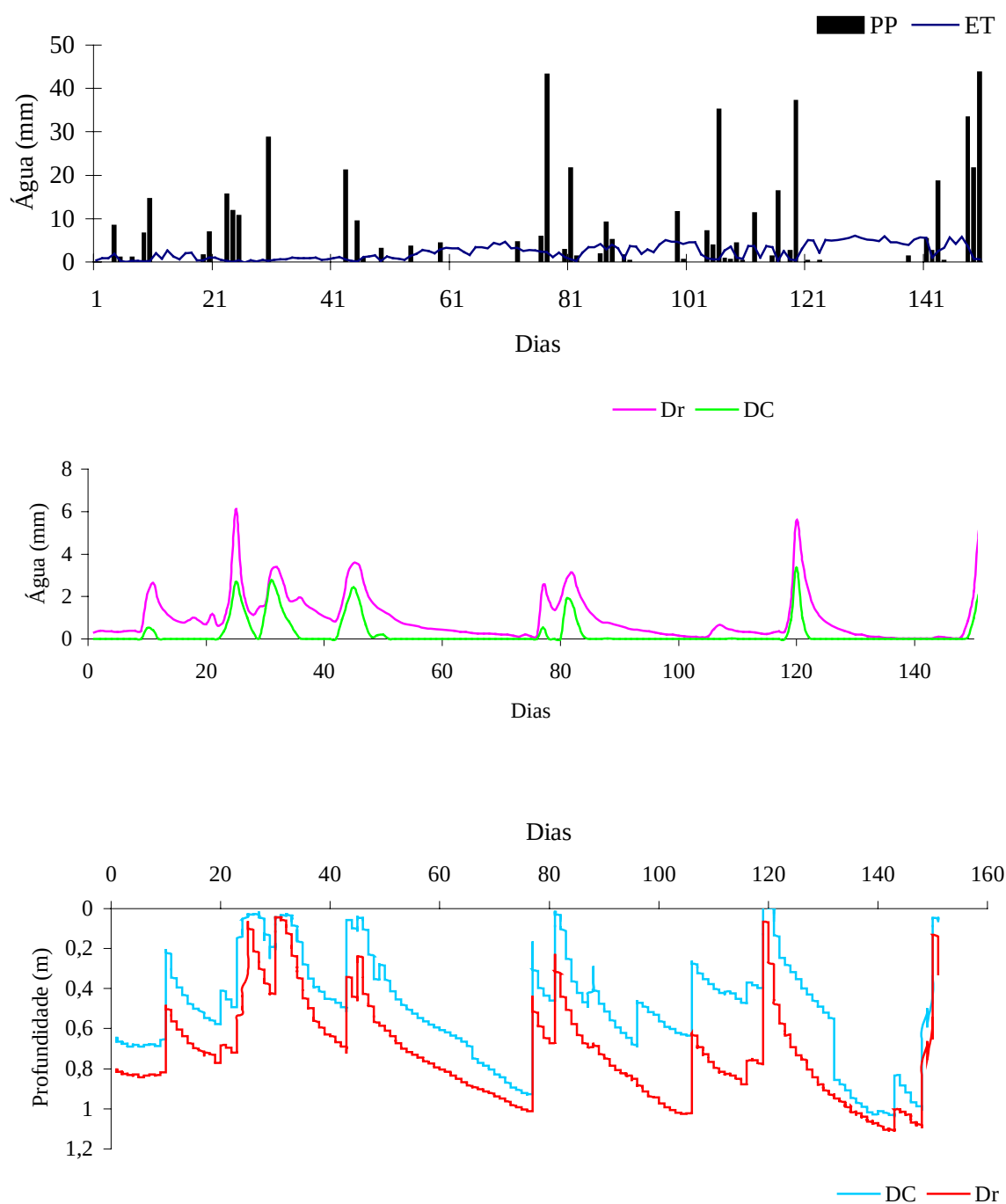


Figura 8 Variação temporal da precipitação (PP) e evapotranspiração potencial (ET), volume de água drenada no tratamento de drenagem convencional (Dr), volume de água drenada no tratamento de drenagem controlada (DC) e profundidade do lençol freático nos tratamentos de Dr e DC para o período agrícola do trigo (Nov/Jun 2000).

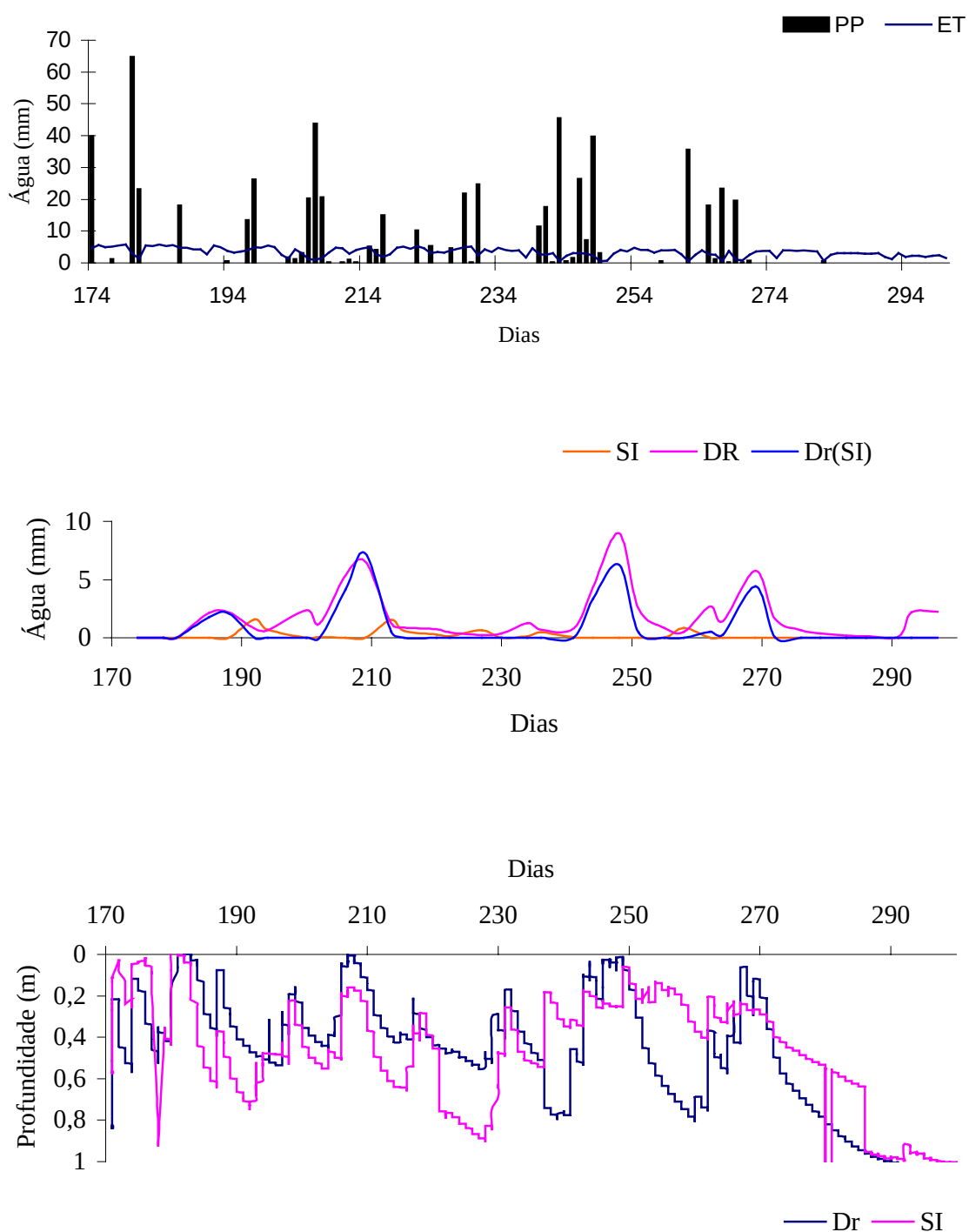


Figura 9 Variação temporal da precipitação (PP) e evapotranspiração potencial (ET), volume de água, drenada no tratamento de drenagem convencional (Dr), drenada no tratamento de subirrigação (Dr(SI)) e volume de água suprida no tratamento de subirrigação (SI). Profundidade do lençol freático nos tratamentos de Dr e SI para o período agrícola da soja (Jun/ Nov 2000).

6.2. Balanço de Água no Perfil do Solo (BAS).

Modelos foram previstos inicialmente para descrever eventos de drenagem, geralmente de curta duração. Esses modelos geralmente consideram um único processo, como a drenagem sob condições de chuva estável e lençol freático raso (drawdown) numa situação limite (Skaggs 1999b). No entanto, situações limites variam temporalmente na natureza, devido a mudanças meteorológicas.

Um grande número de modelos de computador tem sido desenvolvido para simular a performance diária da drenagem dos sistemas de controle de água no solo (Skaggs, 1999b). Esses modelos de simulação são baseados no método do balanço da água no perfil do solo (Skaggs, 1976), como é exemplo o modelo utilizado neste estudo para simular os múltiplos componentes do balanço, quais sejam: PP, ET, DR, SI ou DC.

Os dados determinados pelo método do balanço de água no perfil do solo, nos diversos períodos agrícolas ou experimentos com o milho, trigo e soja, estão nas Figuras 10, 11 e 12, respectivamente. No experimento de milho (período de verão e ou outono) nos últimos 50 dias do seu ciclo fisiológico (florescimento a maturação), os valores determinados foram negativos em média 5 mm (Figura 10). Esses valores são devidos a escassez de chuvas e alta demanda de evapotranspiração.

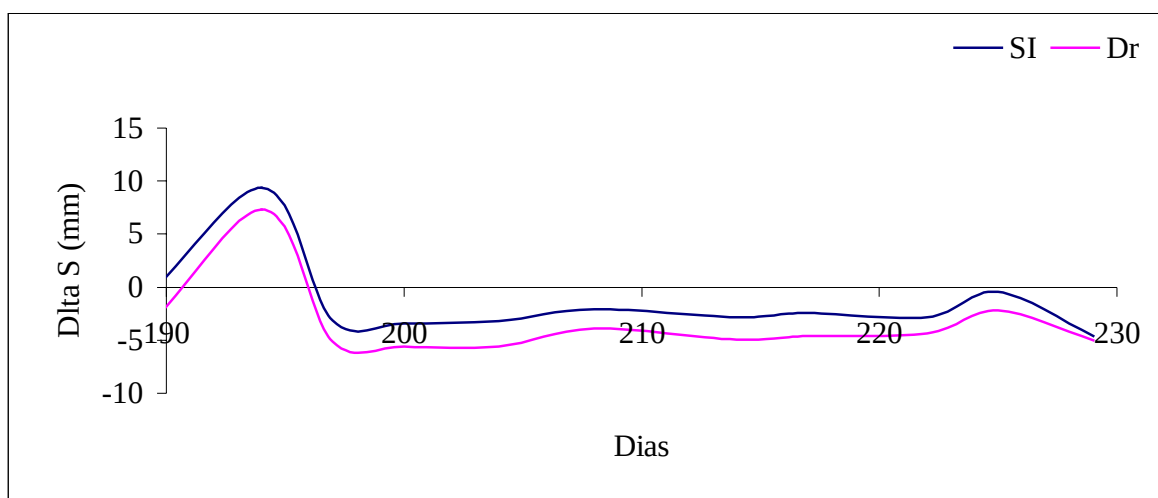


Figura 10 Balanço de água no perfil do solo (ΔS). Resultados médios das parcelas sob tratamento de subirrigação (SI) e drenagem convencional (Dr), período agrícola do milho (junho -Novembro / 99).

No experimento de trigo, cultura típica para plantio da época inverno a primavera, foi um período característico de muita chuva e pequenos períodos de demanda de evapotranspiração, mais propriamente na estação de primavera, como mostra Figura 7. Neste período aplica-se muito bem o tratamento de drenagem controlado ou drenagem convencional para remover excesso de água no perfil do solo, como já discutido. Esses manejos, mantendo o lençol freático a uma altura não muito próxima da zona radicular, drena o excesso de água que pode causar prejuízo por retirada de nutrientes disponíveis para a planta.

Também neste período (inverno-primavera), o balanço hídrico do solo resultou negativo, principalmente nos períodos onde a remoção de água por drenagem e/ou evapotranspiração excedeu a precipitação. Portanto, como a precipitação foi muito freqüente ao longo do ciclo, o balanço resultou positivo na maior parte do ciclo da cultura (Figura 11).

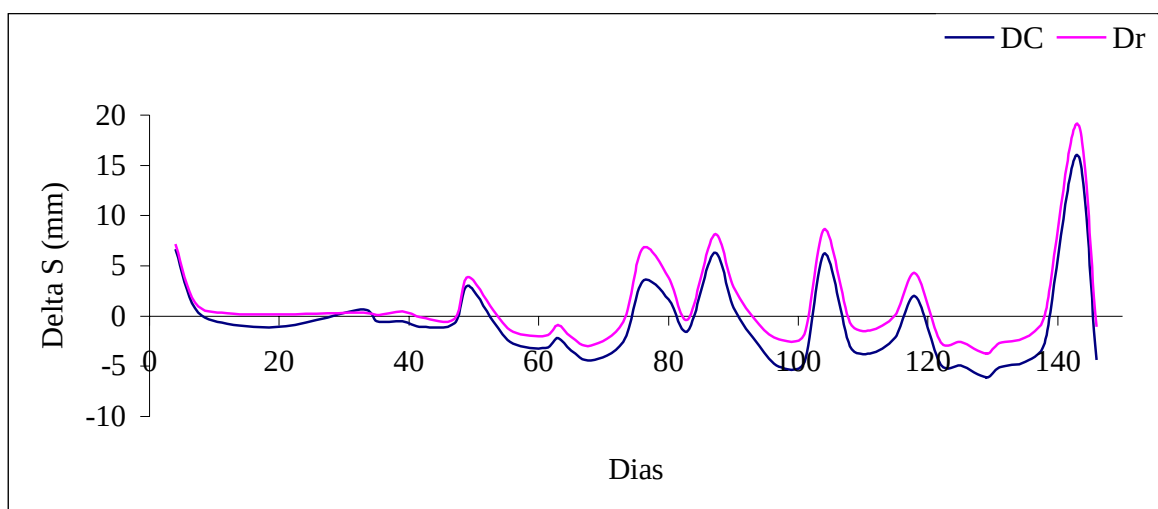


Figura 11 Balanço de água no perfil do solo (ΔS). Resultados médios das parcelas sob tratamento de drenagem controlada (DC) e drenagem convencional (Dr), período agrícola de trigo (janeiro – junho /2000).

No experimento de soja, de verão a outono do ano de 2000, foi plantada como rotação, na região, no lugar do milho. Este período foi diferente nas condições climáticas com relação ao ano anterior (cultura de milho), apresentando precipitações regulares em todo o período, com exceção do mês de setembro que não houve precipitações. Este advento favoreceu a maturação dos grãos. Novamente os resultados do balanço hídrico para os tratamentos aqui adotados foram positivos (Figura 12), com dados negativos para dias com alta demanda de água.

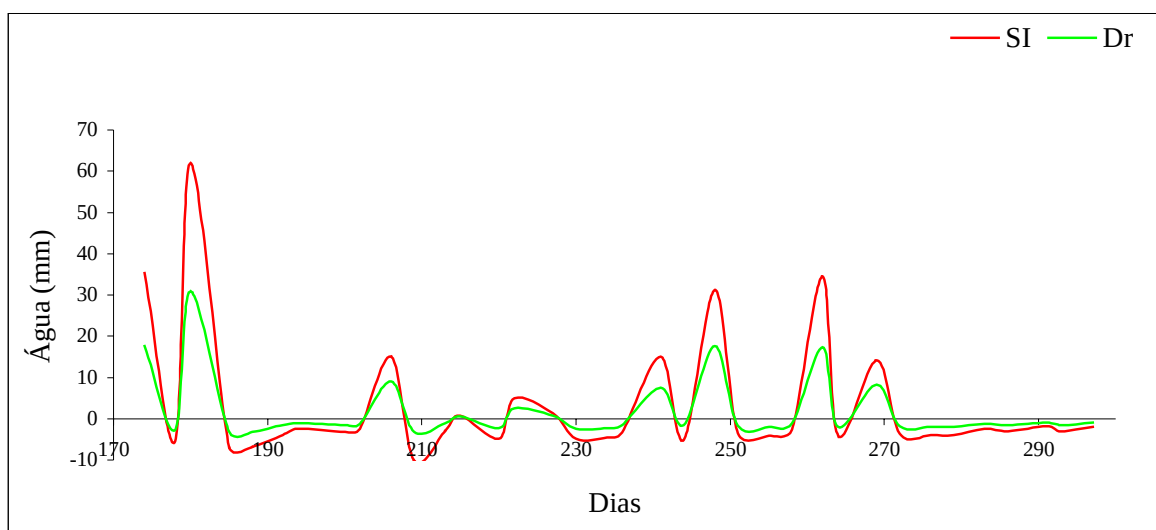


Figura 12 Balanço de água no perfil do solo (ΔS). Resultados médios das parcelas sob tratamento de Subirrigação (SI) e drenagem convencional (Dr), período agrícola de soja (junho – novembro /2000).

Os resultados apresentados nas figuras 10, 11 e 12 seguem a proposta do cálculo do balanço de água no perfil do solo segundo o modelo de simulação DRAINMOD, que assume a distribuição da água do solo em duas zonas: (i) uma zona úmida que se estende acima do lençol freático até a zona radicular, e possivelmente através desta zona até a superfície; e (ii) uma zona seca. Presume-se que a distribuição da água na zona úmida seja drenada para determinar um equilíbrio no perfil, e que a distribuição da pressão acima do lençol freático é essencialmente hidrostática.

Quando a taxa máxima do movimento de água ascendente é determinada como uma função da profundidade do lençol freático, e esta não é suficiente para suprir a demanda de ET, então a água é removida da zona radicular onde está armazenada, criando uma zona seca (Skaggs & Tang, 1976). Diante do exposto podemos comentar que os resultados do método balanço hídrico no solo (BAS) nos experimentos realizados (milho, trigo

e soja), apresentam valores do volume de água que passaram pela zona radicular de acordo com a demanda da ET.

Os valores negativos para o BAS nada mais são do que a perda de água do solo, o qual passa a requerer mais ascensão por capilaridade da água do lençol freático. Segundo Kabat et al. (1992) a profundidade do lençol freático influencia a quantidade de água que passa através do sistema radicular.

Lindón et al. (1999), num estudo de drenagem em citros realizado em solo da província de Valencia, na Espanha, utilizaram o mesmo método de balanço de água no perfil do solo. Seus resultados também foram constituídos de valores negativos, principalmente em períodos de alta taxa de ET. Esses valores chegaram a -43 mm no período de abril a setembro para ET total de 555 mm. Martin et al. (1991) atestam que as chuvas afetam significativamente o volume de água armazenado na zona radicular, o que determina a quantidade de água drenada ou requerimento de irrigação.

Os resultados determinados pelo método do balanço de água no solo apresentam dados do volume de água que passou pela zona radicular de acordo com a demanda da ET. Deste modo, estes valores negativos expressam a quantidade de água que o solo perdeu, isto de acordo com a profundidade do lençol freático do momento (Figura 9). Os resultados aqui determinados para BAS estão coerentes com os apresentados por Skaggs (1980), onde a taxa de evaporação foi de $4,8 \text{ mm.dia}^{-1}$ e profundidade do lençol freático de 0,7 m. O conteúdo de volume de água no solo varia de 0,3 a $0,12 \text{ (cm}^3.\text{cm}^{-3})$ à medida que se aproxima da superfície do solo.

6.3. Método do TDR

Segundo Kabat (1994), o conteúdo de água no solo pode ser medido utilizando-se amostras destrutiva ou indestrutiva (esta última de campo). Uma das vantagens do método de amostra indestrutivas é que se pode ser repetir as medidas inúmeras vezes e num mesmo local, assim temos o TDR.

O método do TDR pode ser usado para diversos tipos de solos, mesmo os sem calibração, devido à relação entre a constante dielétrica e conteúdo de água volumétrico, as quais dependem do tipo de solo, densidade, temperatura e conteúdo de sais (Topp & Davis 1985). Estes mesmos autores, também atestaram que o TDR apresenta valores muito próximos do conteúdo de água no solo, comparado com os resultados obtidos pelo método gravimétrico. Segundo Keam et al. (1999) e Ferré et al. (1996), cada par de hastes ou sondas guias usados para as medir, terá uma leitura média do conteúdo de água no perfil do solo que inicia na superfície até a ponta da haste introduzida no solo.

Os dados determinados pelo método de campo do TDR para o período agrícola de milho, estão representados na Figura 13. Durante este período, face às condições climáticas, podemos observar uma diferença nítida do conteúdo de água no solo dos tratamentos de drenagem convencional (Dr) em torno de 240 mm, com exceção do final de período, enquanto o tratamento de subirrigação (SI) apresentou um conteúdo de água no solo acima de 270 mm.

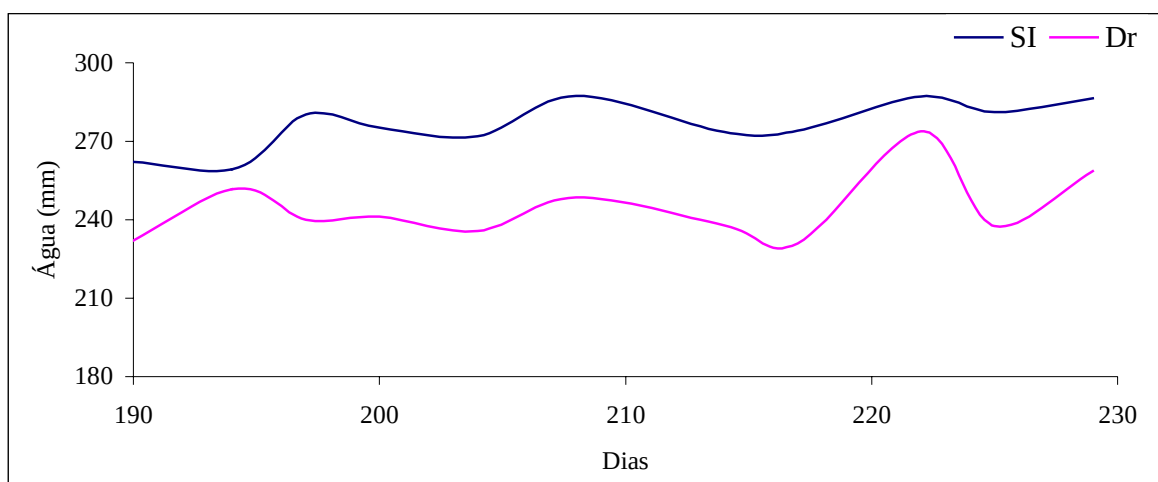


Figura 13 Conteúdo de água no perfil do solo medido pelo método TDR nas parcelas sob os tratamentos de manejo de drenagem convencional (Dr) e subirrigação (SI), no período agrícola do milho (jun/nov 1999).

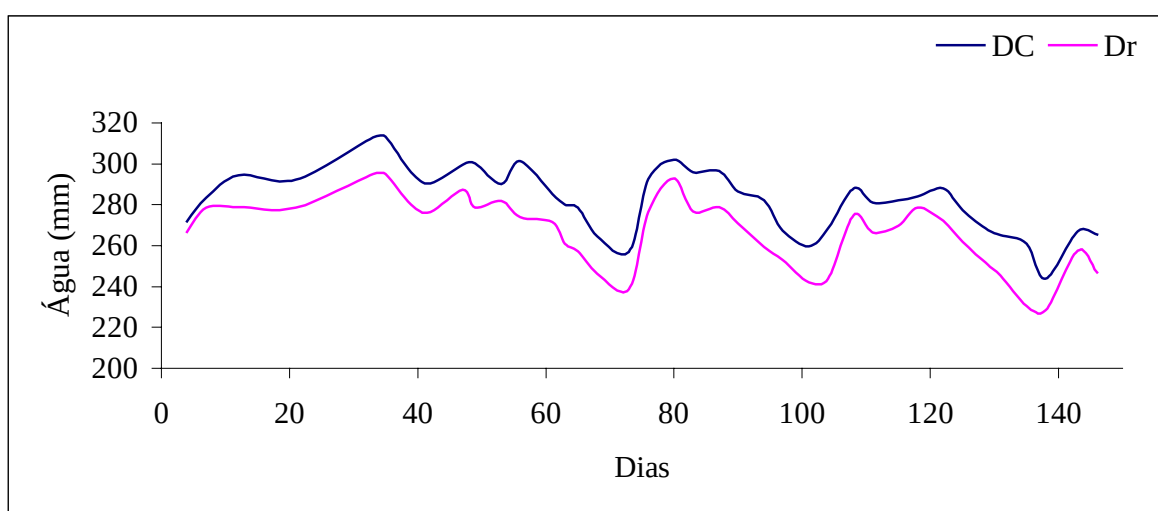


Figura 14 Conteúdo de água no perfil do solo medido pelo método TDR nas parcelas sob os tratamentos de manejo de drenagem convencional (Dr) e Drenagem controlada (DC), no período agrícola de trigo (nov/jun 2000).

No período da cultura do trigo (Fig.14), plantada nas estações de inverno e primavera, cultura apropriada para este clima, o método do TDR neste período registrou água do perfil do solo no tratamento de drenagem controlada (DC), nos primeiros 60 dias próximos de 290 mm, isto em face de ocorrência de precipitações (Fig.7), acompanhada da mesma forma o conteúdo de água no solo do tratamento de drenagem convencional (Dr). Também podemos observar como os teores de água no solo diminuem nos últimos 60 dias.

O conteúdo de água no perfil do solo, determinado pelo método do TDR, no período agrícola da soja, está apresentado na Figura 15. Uma vez que o conteúdo de água do solo é dependente dos fatores climáticos (PP, ET), os resultados aqui presentes refletem o período chuvoso característico da época estudada. Em função disto, o conteúdo de água nos dois tratamentos tiveram valores próximos e acima dos previstos. No caso do tratamento de subirrigação (SI), nos períodos mais chuvosos, os valores muito acima aos do tratamento de drenagem determinou a necessidade de drenagem, como já discutido anteriormente.

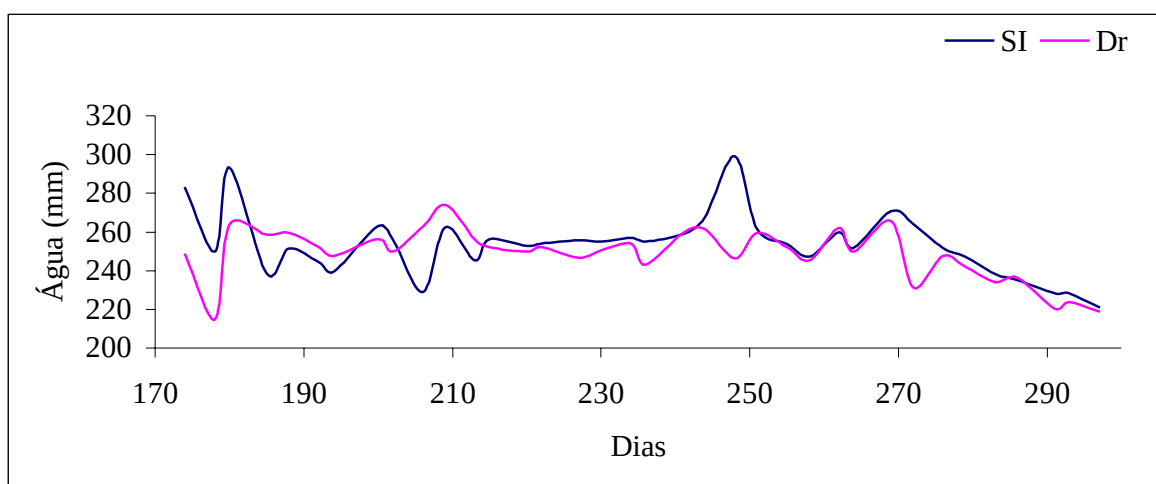


Figura 15 Conteúdo de água no perfil do solo medido pelo método TDR nas parcelas sob os tratamentos de manejo de drenagem convencional (Dr) e subirrigação (SI), no período agrícola da soja (jun/nov 2000).

Todas as observações sobre a medida do teor de água do solo pelo TDR o indicam como um método que produz uma medida exata da umidade do solo, podendo, portanto, ser utilizado como medida padrão para uma área aonde se objetiva a mensuração dos níveis de água do solo em sistemas com culturas específicas. Segundo Person (1998), num estudo sobre o efeito da temperatura na determinação do conteúdo de água no solo pelo método do TDR, a temperatura afeta muito pouco, e o valor determinado para o conteúdo de água de $0,194 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, para um solo de textura franco arenosa.

6.4 Analise estatística

Os dados referentes à quantidade de água no solo, apresentado para o método do TDR, bem como os resultados do balanço hídrico (Tabelas 8, 9 e 10) mostram que a média diária de quantidade de água nas parcelas não difere entre os tratamentos de drenagem e subirrigação. Isso indica que as quantidades de água supridas ou retiradas do sistema foram previstas corretamente pelo modelo de simulação adotado (DRAINMOD).

Tabela 8 Média $\pm$ desvio padrão do conteúdo de água no solo (TDR) e balanço hídrico (BAS) para milho sob os tratamentos de subirrigação (SI) e drenagem convencional (Dr).

PARÂMETRO	TRATAMENTOS	
	SI	Dr
TDR	272 $\pm$ 17 ^{Aa}	242 $\pm$ 14 ^{Aa}
BH	-2 $\pm$ 4 ^{Ba}	-3,7 $\pm$ 3,6 ^{Ba}

A média de cada parâmetro resultante da análise do TDR e do BAS foi comparada para cada tratamento (Estatística não paramétrica de Kruskal-Wallis; KW= 40,17, $p < 0,0001$). O contraste entre os pares de média foi feito pelo teste de comparação múltipla de Dunn.

Nota-se que para cada período agrícola considerado há diferença significativa para contraste de valores obtidos pelo TDR e pelo BAS dentro de cada tratamento (comparação feita por letras maiúsculas, Tabelas 8, 9 e 10). Como já discutido anteriormente, os dados negativos de BAS, indicam maior saída de água devido às altas demandas de evapotranspiração, podendo indicar déficit hídrico do solo. No entanto, os altos desvios padrões observados para os valores de BAS refletem as variações dos parâmetros climáticos ao longo de todo o período considerado, para todos os períodos e culturas adotados. Notar nas figuras 6, 7 e 8 a variação temporal nos dados climáticos e componentes do BAS.

Tabela 9 Média $\pm$ desvio padrão do conteúdo de água no solo (TDR) e balanço hídrico (BAS) para o experimento de cultivo do trigo sob os tratamentos de drenagem convencional (Dr) e drenagem controlada (DC).

PARAMETRO	TRATAMENTO	
	Dr	DC
TDR	266 $\pm$ 17 ^{Aa}	282 $\pm$ 16 ^{As}
BAS	-3 $\pm$ 4 ^{Ba}	1 $\pm$ 4 ^{Ba}

A média de cada parâmetro resultante da análise do TDR e do BAS foi comparada para cada tratamento (estatística não paramétrica de Kruskal-Wallis; KW= 117,78 p < 0,0001). O contraste entre os pares de média foi feito pelo teste de comparação múltipla de Dunn.

Tabela 10 Média $\pm$ desvio padrão do conteúdo de água no de solo (TDR) e balanço hídrico (BAS) para o experimento de cultivo da soja sob os tratamentos de drenagem convencional (Dr) e subirrigação (SI).

PARAMETRO	TRATAMENTO	
	SI	Dr
TDR	253 $\pm$ 17 ^{Aa}	248 $\pm$ 14 ^{Aa}
BAS	3 $\pm$ 15 ^{Ba}	3 $\pm$ 15 ^{Ba}

A média de cada parâmetro resultante da análise do TDR e do BAS foi comparada para cada tratamento (ANOVA F= 3182,5 p < 0,0001). O contraste entre os pares de média foi feito pelo teste de comparação múltipla de Tukey-Kramer.

Em estudo recente, Laderl (1998), fez a estimativa dos componentes do método de balanço de água, e correlacionou os resultados com o conteúdo de água medido pelo método do TDR numa floresta da Dinamarca. Este estudo apresentou dados, de três anos, para uma profundidade de 1,0 m do lençol freático. Os valores do conteúdo de água no solo foram em torno de 175 mm nos meses de dezembro a janeiro e em torno de 75 mm no mês de junho. Também no estudo de Laderl, (1998), o balanço de água no solo resultou em valores negativos, como é consequência de alta demanda de evapotranspiração potencial.

Ladekarl (1998) avaliou também se o método analítico do balanço de água no perfil do solo (ΔS) pode prever realmente condições do conteúdo de água no solo. Para testar este objetivo, foi realizado um teste de correlação entre os dados de conteúdo de água, calculado pelo método do balanço por modelos de simulação, e o conteúdo de água no solo, medida pelo método do TDR.

Seguindo esta idéia, a presença de correlação positiva entre os dados obtidos pelo TDR e os resultantes do BAS indica que os modelos, baseados principalmente em dados de evapotranspiração, são muito apropriados como ferramenta para estimar as mudanças de conteúdo de água no solo. Vale ressaltar que esses dados são importantes como dados de calibração para o modelo de simulação DRAINMOD.

Tabela 11 Coeficiente de correlação de Pearson ou de correspondente não paramétrico-correlação de Spearman, para dados de TDR versus dados do balanço hídrico (BAS) nos diferentes períodos agrícolas e tratamentos compreendidos entre junho de 1999 e novembro de 2000.

	SI	Dr	DC	Tipo de Teste Estatístico
MILHO (n=12)	r= -0,16 p= 0,599	r=0,09 p=0,762	-----	Regressão Linear
TRIGO (n=38)	r=0,473 p=0,003	-----	r= 0,419 p= 0,009	Correlação de Spearman
SOJA (n=12)	r= 0,595 p= 0,0001	r=0,392 p=0,01		Regressão Linear

Diferenças estatísticas foram consideradas significativas quando $p < 0,05$

A análise de correlação de Pearson, ou correspondente não paramétrico, cujos resultados estão apresentados na Tabela 11, indica que o método do BAS está prevendo as condições de umidade do solo, como previsto pelo modelo de simulação DRAINMOD. Isto com exceção do período agrícola do milho.

A Tabela 12 mostra os componentes do método do balanço de água no solo, como para os métodos estudados (balanço de água no solo e TDR), em todos os períodos agrícolas compreendidos entre o segundo semestre de 1999 e o ano de 2000. Esses dados indicam que apenas no período do cultivo do milho o BAS foi negativo. Esses resultados podem indicar que para as parcelas sob subirrigação ou drenagem convencional houve maior estresse hídrico, resultando em déficit de água no solo.

6.5 Rendimento das culturas

No entanto, para uma discussão mais conclusiva em relação a estas afirmativas, devem ser considerados dados de rendimento de cultura associado, sob um controle rigoroso de variáveis outras que não o manejo de água. Trabalhos, como os de Cooper et al. (1992) mostraram que o rendimento da cultura do milho, sob subirrigação e drenagem convencional, é dependente da altura do lençol freático. Estes autores obtiveram rendimento em torno de 4262,44 a 5059,69 kg.ha⁻¹ para uma altura de 40,64 cm.

Os dados obtidos na estação experimental de Plymouth, NC (Tabela 13), para o milho estão coerentes com os citados por Cooper e colaboradores, indicando que os tratamentos permitiram condições de água para um bom rendimento da cultura. Isso indica que os dados negativos apresentados para o BAS (Tabela 12) não representam um déficit hídrico capaz de reduzir a produção do milho. Por outro lado, não há dados que indiquem se valores próximos aos determinados para BAS, no caso do milho (Tabela 12) sejam realmente uma condição limitante para o crescimento e/ou o rendimento da cultura.

O rendimento do trigo, também condiz com dados ótimos para os tratamentos adotados (Tabela 13). Por outro lado, não se pode concluir efetivamente se os valores positivos para o BAS resultantes nos experimentos de trigo e soja criam ou não condições de estresse por excesso de água, afetando também o rendimento final.

Tabela 12 Componentes do cálculo de método do balanço de água no solo (ΔS) em mm por período da cultura.

Período	Tratamento	PP	ET	Dr	SI	Dr (SI)	DC	ΔS
MILHO	SI	119,38	215,39	-----	83,53	0,013	-----	-12,49
	Dr	119,38	215,39	5,28	-----	-----	-----	-101,29
TRIGO	DC	504,70	349,44	-----	-----	-----	3,22	152,04
	Dr	504,70	349,44	70,19	-----	-----	-----	85,07
SOJA	SI	623,57	429,93	----	6,99	31,15	-----	169,48
	Dr	623,57	429,93	325,62	-----	-----	-----	131,98

SI-Tratamento de Subirrigação; Dr-Drenagem Convencional DC-Drenagem Controlada; PP precipitação; ET-Evapotranspiração potencial; Dr(SI)-Drenagem no tratamento de subirrigação e ΔS -volume de água pelo método do balanço hídrico .

Tabela 13 Rendimento das culturas cultivadas para cada tratamento de manejo do lençol freático.

RENDIMENTO		
CULTURA	TRATAMENTO	kg.hectare ⁻¹
MILHO	SI	5405,53
	Dr	4.433,27
TRIGO	Dr	3.782,99
	DC	3.456,95
SOJA	SI	1858,00
	Dr	2188,61

Como podemos observar na Tabela 12, o método do balanço de água no perfil do solo (ΔS), apresenta dados negativos no período agrícola do milho (1999). E, segundo estudos na mesma região realizados por Fausey et al., (1995) durante os últimos 31 anos, a média do balanço de água no solo foi em torno de $-158,75$ mm, onde 50 % tiveram déficit de mais de 150 mm de água.

De acordo com os rendimentos mostrados na Tabela 13, a cultura de milho com irrigação obteve um rendimento de $5405,53 \text{ kg.ha}^{-1}$ e sem irrigação $4433,27 \text{ kg.ha}^{-1}$, com uma profundidade média do lençol freático de 0,50 m (Figura 6), e trabalhos executados por Doty et al. (1984) observaram aumento de 23 % para rendimento da cultura do milho em consequência da elevação do lençol freático. Também Fausey (1995), num estudo de 5 anos (1986 a 1989), determinou um rendimento médio 4865 kg.ha^{-1} com subirrigação e $3201,5 \text{ kg.ha}^{-1}$ sem subirrigação. Assim podemos comparar também com resultados de Skaggs et al. (1995), que determinou rendimentos máximos para o milho plantado sob espaçamentos dos drenos de 20 m e profundidade do lençol freático de 48 cm para subirrigação e 45 cm para drenagem controlada.

O manejo adequado do lençol freático para aumentar sua altura reduz a concentração do nitrato acima de 50 % , o que aumenta significativamente o rendimento da cultura de soja (Madramootoo et. al. 1992). Para uma rotação de culturas tradicional milho/soja, há um ganho de 22% na produção de milho nestes solos (Portsmouth) sob o manejo de subirrigação, comparado com a drenagem convencional (Murugaboopathi et.al. 1995). Num estudo dos fatores susceptíveis nas culturas, Evans et. al. (1986) detectou que a cultura de milho é mais susceptível no fim da fase vegetativa e estágio de polinização.

O resultado da análise de correlação feita entre os dados obtidos pelo método de campo (TDR) e os do BAS mostram uma associação entre umidade e água retida no perfil do solo. Essa resposta foi característica nos períodos de cultivo do trigo e soja, para todos os tratamentos adotados na época de plantio de cada cultura. Essa resposta associativa, embora não denote uma verdadeira relação causal, indica que o modelo de simulação DRAINMOD prevê corretamente as quantidades de água que entram no sistema, por processos de subirrigação, ou que saem do sistema, via drenagem convencional ou drenagem controlada.

7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

- 1) A variabilidade temporal no teor de umidade do solo, avaliado pelo método do balanço e/ou pelo método de campo TDR, seguiu as variações temporais das condições climáticas durante os períodos estudados, principalmente para ET e PP. Esta variabilidade respondeu adequadamente aos tratamentos de manejo adotados, subirrigação, drenagem convencional ou drenagem controlada.
- 2) A resposta de cada tratamento de manejo foi como o previsto, com variação obtida para água drenada ou subirrigada em dias com alta demanda de precipitação e evapotranspiração respectivamente, em todos os períodos analisados.

- 3) Não houve diferença significativa entre as quantidades de água retidas no solo (BAS) ou entre a umidade do solo determinada pelo TDR, o que indica que os tratamentos de manejo empregados para cada estação climática foram eficientes para manter condições adequadas de trafegabilidade no solo.
- 4) O BAS resultou negativo apenas nos tratamentos de subirrigação e drenagem convencional na época do cultivo do milho, indicando perda de água nas parcelas experimentais devido à altas demandas de evapotranspiração. Nos experimentos com trigo e soja, os valores positivos do BAS são resultantes da alta taxa de precipitação no período estudado.
- 5) O modelo adotado tem uma calibração adequada para as situações climáticas e de solo, para a estação experimental Tidiwater (Plymouth, NC).
- 6) Os resultados obtidos para o rendimento da cultura, indicam, finalmente, que as técnicas de manejo da altura do lençol freático foram eficientes para a manutenção de quantidades de água para o crescimento e desenvolvimento das culturas adotadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

- ANNAN, A.P. Time domain reflectometry- Air-gap problem for parallel wire transmission lines, p. 59-62. In: Report of activities. Part. B. Rep. 77-IB. *Geol. Surv. Can.*, Ottawa, on, Canada, 1977.
- BAKER, J. M. ALLMARAS R.R.. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry. *Soil. Sci. Soc. Am J.*,v. 54,: p.1-6, 1995.
- BERTUZZI, P., BREECKLER, L., GABILLY. Y., GAUDU, J.C. 1987. Calibration, field-testing, and error analysis of a Gamma-ray probe for in situ measurement of dry bulk density. **Soil Sci.**, v. 144-6, p. 425-36, 1990.
- BLAKE, G. R., K.H. HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.) *Method of soil analysis. physical and mineralogical method*. Madison WI: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p.363-75.

- CHIANG, C. T., S. BROUGHTON, R. S., FOROUD, N. Drainage rates and water table depth. *J. Irrig. Drain. Div*, v. 104, p.413-33, 1978.
- CLEMENT, R.F. **Aeration and air content:** the role of the oxygen in root activity. Washington: Carnegie institute, 1921. p.123-45. (Carnegie Institute. Publication, 315).
- COOPER, R. L., FAUSEY, N.R., STREETER, J.G. Crop management to maximize the yield response of soybean to a subirrigation/drainage system. Drainage and water table control. International Drainage Symposium, 6,1992, Nashville. Nashville: American Society of Agricultural Engineers, 1992. p.466-73.
- DANIELSON, R.E., SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, A. (ed.) *Method of soil analysis. physical and mineralogical method*. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part. 1, p. 443-61, 1986.
- DIRKSEN, C. Determination of soil water diffusivity by sorptivity measurement. *Soil Sci. Soc. Am. Poc.*, v. 39, p 22-7, 1975.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrig. And Drain. Pap*, n.24, p.7-30, 1997.
- DOTY, C. W., GILLIAM, J.W., PARSONS, J. E. Stream water level control affect water supply and quality. *Pap. Am. Soc. Agro. Eng.*, n.86-2581, p.1-17, 1986.
- DOTY, C. W., PARSON, J. E., NASSEHZADEH-TABRIZI, A., SKAGGS, R. W., BARD, A. W. Deep ditch over drainage affect water table depth and crop yield. In: *America. Society. Civil. Engineer*. Environmentally sound water and soil management. Mew York, 1982, p.55-81.

- DOTY, C.W., PARSON, J. E., BADR, A.W., NASSEHZADEH-TABRIZI, A., SKAGGS, R.W. Water table control for water resource projects on sandy soil. *J. Soil Water Consev.* V. 40, p.360-4, 1985.
- DOTY, C.W., PARSONS, J.E., NASSEHZADEH-TABRIZI, A., SKAGGS, R. W., BADR, A. W. Stream water levels affect field water tables and corn yield. *Ttrans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, 27, p.1300-6, 1984.
- EVANS, R. O., CUMMINGS, J. R., GILLIAM, J. W. Controlled Drainage am best management practice in North Carolina. *Pap. Am. Soc. Agro. Eng.*, n.89—2695, p.18, 1989.
- EVANS, R. O., SKAGGS, R. W., REYNOLDS, W. N. Operating controlled drainage and sub irrigation systems. North Carolina: The North Carolina Agricultural Extension Service. 1985. p.356 (11/85/2M/VH).
- EVANS, R.O., SKAGGS, R.W., SNEED, R.E. Normalized crop susceptibility factors for corn and soybean to excess water table stress. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.33, p.1153-61, 1990.
- EVANS, R.O., SKAGGS, R.W., SNEED, R.E. Stress day index model to predict corn and soybean yield under high water table conditions. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.34 p. 1977-5, 1991.
- EVANS, S.O., SKAGGS, R.W., SNEED, R. E. Crop susceptibility factors and Stress Day Index to relate Crop Response to Excessive and Deficit soil water. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng)*, v. 86 p.2053-85, 1986.
- FAUSEY, N. R., COOPER, R. L. Subirrigation response of soybeans grown with height yields potential management. In. AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL ENGINEERES Subirrigation and controlled drainage. Madison: Lewis Publication, 1995. p.225-46.

- FELLER., H. FELDE, G. G. The measurement of dielectrics in the time reflectometry. *J. Phys. Chem.*, v.73, p.616-23, 1969.
- FERRE, P.A., RUDOLPH, D.L., KACHAMOSKI, R.G. Spatial averaging of the water content by time domain reflectometry: Implications for Twin rod probes with and without dielectric coating. *Water Resour. Res.*, v.32, p.271-9, 1996.
- FERRE, P.A., RUDOLPH, D.L., KACHANOSKI, R.G. Water content response of a profiling time domain reflectometry probe. *Soil. Soc. Soc. Am J.*, v.62, p.825-73, 1995.
- FOX, R.L., PHELAN, J.T., CRIDDLE, W.D. Design of subirrigation systems. *Agric. Eng.* v.37, p.103-8, 1998.
- FREEZE, R.A. Three dimensional , transient, saturated- unsaturated flow in a groundwater basin. *Water Resour Res.*, v.7, p.347-66, 1971.
- GEE, G.W., BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) *Method of soil analysis. physical and mineralogical*. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p. 383-11, 1986.
- HANK, J., RITCHIE, J. T. **Modeling plant and soil systems**. Madison: Editora, 1991. 57p. (Agronomy. Monograph, American Society Agricultural, 31).
- HEALY, R, G. **Competition for land in the America South**: agriculture, human settlement, and the environment. Washington: The Cons. Found., 1985. 333p.
- HEIMOVAARA, T.J., BOUTEN, W. A computer-controlled 36-channel time domain reflectometry system for monitoring soil water content. *Water Resour. Res.*, v. 26, p. 2311-16, 1990.

- HERKELRATH, W.N., HANBURG, S.P., MURPHY, F. Automatic real time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, v.27, p.857-64, 1991.
- HVORSLEV, M. J. Time and soil permeability in ground water observation. *Bull. Water Ways Exp. Stn. Crops Engineers*, n.36, p.1-50, 1951.
- KABAT P., BEEKMA, J. Water in the unsaturated zone. In: ILRI. *Drainage principles and applications*. 16, ed. Wageningen: Editors, 1994. p.383-432.
- KABAT, P., VAN DEN BROEK, B.J., FEDDES, R.A. SWACROP. A water management and crop production simulation model. *ICID*, v.41, n.2, p.61-84, 1992.
- KACHANOSKI, R.G., VAN BERTOLDI, I.J., WARD, A., HAMLEN, C. Measurement of soil water content during three-dimensional axial- symmetric water flows. *Soil. Sci. Soc. Am J.*, v. 54, p. 645-9, 1990.
- KEAM, R.B., HOLDEM, J.R., SCHOONEES, J.A. Soil moisture profile estimation from surface measurements at multiple frequencies. *Aust. J. Soil Res.*, v.37, p.1107-21, 1999.
- KLUTE, A., DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity. In KLUTE, A. (ed.) *Laboratory methods of soil analysis. physical and mineralogical method*. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p.687-34.
- KNIGHT, J.H. Sensitivity of time domain reflectometry measurement to lateral variation in soil water content. *Water Resour. Res.* v.28, p.2345- 52, 1992.
- LADEKARL, U.L. Estimation of the components of soil water balance in a Danish oak stand from measurements of soil moisture using TDR. *For. Ecol. Manag.* v.104, p.227-38, 1998.
- LINDÓN, A., RAMOS, C., RODRIGO, A. Comparison of drainage estimation methods in irrigated citrus orchards. *Irrig. Sci.*, v.19, p.25-36, 1999.

- MADRAMOOTOO, C.A., BROUGHTON, S., PARADOPOULOS, A. water Table effects on Soybean Yield and moisture and Nitrate Distribution in the soil profile. *Trans. ASAE*, (American Society Agricultural Engineers) n.13, p.116-24. 1992.
- MALICKI, M.A., PLAGGE, R., RENGGER, M., WALCZAK, R.T. Application of time domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores. *Irrig. Sci.*, v.13, p.65-72, 1992.
- MARTIN, D. L., GILLEY, J. R., SKAGGS, R. W. Soil water balance and management. *Soil Sci. Soc. Am.*, v. 677, p.199-235, 1991.
- MURUGABOOPATHI, C., SKAGGS, R.W., EVANS, R.O. Subirrigatio for Corn and soybean production for North Carolina Soil. In. American Society Agricultural Engineers *Subirrigation and controlled drainage*. Madison: Lewis Publication, 1995. p. 37-61.
- MUSTER, C.L., SKAGGS, R.W., PARSONS, J.E., EVANS, R.O., GILLIAM, J.W., BRAVE, M.A. Simulating aldicarb transport in a drained field. *Trans. American Society Agricultural Engineers*, v.37, p.1817-24, 1994.
- NELSON, D.W., SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Methods of soil analysis. In: PAGE, A.L. *Chemical and microbiological properties*. Am. Soc. Agro. Madison: 1982. p.539-80.
- PATWARDHAN, A.S., NIEBER, J.L., MOORE, I.D. Oxygen, carbon dioxide, and water transfer in soil, mechanisms and crop response. *Trans. American Society Agricultural Engineers*, v.31, p.1383-95, 1988.
- PAVELIS, G. A. Farm drainage in the United State: *history, status, and prospects*. Washington: Pub. Department Agricultural, 1987, 170 p. Serie, 1455.

- PERSSON, M., BERNDTSSON, R. Texture and electrical Conductivity effects on temperature Dependency in time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.62, p.887-93, 1998.
- RITCHIE, J.T. The ceres-maize model. In: JONES, C.A., KINIRY, J.R. A simulation model of maize growth and development (*Zea mays* L.). Texas, CERES-Maize ed. 1986. 75p.
- RITCHIE, J.T., OTTER, S. Description and performance of ceres-Wheat. A user-oriented wheat yield model. In: ARS. Wheat yield project. ARS-38. Natl. Tech. Info. Serv., Springfield, VA, 1985, p. 159-175.
- SCHWAB, G. O. *Subsurface drainage with small perforated flexible tubes in mole drains*. 1951. 95 p. Ph.D. Subirrigation and drainagem-Iowa State College, Ames.
- SHIRMOHAMMADI, A., CAMP, C. R., THOMAS, D.L. Water table management for field-sized areas in the Atlantic Coastal Plain. *J. Soil Water Conserv.*, v.2, p.52-7, 1992.
- SKAGGS R. W., KRIZ, G.J. Water table control and subsurface irrigation in mineral and high organic coastal plain soil. *Rep. Water Resour. Res. Inst., University. North Carolina, Raleigh*, n. 67, 56 p., 1972.
- SKAGGS R.W. Evaluation of drainage-water table control systems using a water management model. In: *PROC. 3RD NATL. DRAINAGE. SYMP.* 1976, Chicago. Anais Chicago: ed ASAE, 1976, p.61-8.
- SKAGGS, R. W. A water management model for shallow water table soil. *Rep. Water Resour. Res. Inst. University North Carolina*, n.134, 44p. 1978.
- SKAGGS, R.W. A water management model for artificially drained soil. *Rep. Water Resour. Res. Inst. North Carolina Agri. Res. Serv. Tech. Bull. Raleigh*, n.267, 35p. 1980.

- SKAGGS, R.W. Design and management of drainage system. In: *PROC. 5TH. NATL. DRAIN. SYMP, CHICAGO, IL.*, Anais 14-15 December. Chicago: ASAE, St. Joseph, Mi, 1987a. p.57-65.
- SKAGGS, R.W. Drainage simulation models. In: SKAGGS, R.W. and VAN SCHILFGAARDE, J. *Agricultural drainage*. Madison: American Society of Agricultural, 1999^a p.469-500 (Agron. Monogra. 38).
- SKAGGS, R.W. Evaluation of Drainage-water Table Control systems using a water management model. In: *PROC. 3RD NATL. DRAIN. SYMP*, 1976, Chicago. Anais 13-14 December. ASAE, Joseph, Mi, 1976. p. 61-88.
- SKAGGS, R.W. Modeling water table response to subirrigation and Drainage. *Trans. American Society Agricultural Engineers*. v.33, p.169-75, 1991.
- SKAGGS, R.W. The effect of surface drainage on water table response to rainfall. *Trans. American Society Agricultural Engineers*. v.17, n.3, p.406-11, 1974.
- SKAGGS, R.W. Water table management: Subirrigation and Controlled Drainage. In: SKAGGS, R.W. *Agricultural Drainage*. Madison: American Society of Agricultural, 1999. p.695-18 (Agro. Monogrf. 38).
- SKAGGS, R.W., BREVE, M.A., GILLIAM, J.W. Predicting effect of water table management on lost nitrogen from poorly drained soil. *Europ. J. Agron.* v.5, n.4, p.441-51, 1995.
- SKAGGS, R.W., CHESCHEIR, G.M. Application of drainage simulation models. In: SKAGGS, R.W., VAN SCHILFGAARDE, J. (ed.) *Agriculture drainage*. Madison: American Society of Agricultural, 1998. p.529-56. (Agro. Monograph. 38)

- SKAGGS, R.W., TANG, Y.K. Saturated and unsaturated flow to parallel drains. *J.Irrig. Drain. Div. American Society Agricultural Engineers*, v.102, n.(IR2), p.221-38, 1976.
- SKAGGS. R.W. Modeling water table response to subirrigation and drainage. *Trans. American Society Agricultural Engineers*. V.34, p.169-71, 1991.
- STONE K, C., SOMMERS, R. C., WILLIAMS, G. H., HAWKINS, D. E. Water table management in the Eastern Coastal Plain. *J. Soil Water Conser.* v.1-2 , p.51-74, 1992.
- THOMAS, D. L., HUNT, P. G., GILLIAM, J. W. Water table management for water quality improvements. *J. Soil. Water Conser.* v.47, n.1, p.58-64, 1990.
- THOMSEN, A. Program autotdr for marking automated TDR measurement of soil-water content: user's guide. Version 01 ed. *Rep. Danish Inst. Of plant and Soil Science*, n.38, p.25-42, 1994.
- TOPP G. C., DAVIS, J.L. Measurement of soil Water using time-domain reflectometry (TDR). Field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.49, p.19-24, 1985.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L. Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Sci. Soc Am. J.* v.46, p.672-4, 1982b.
- TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmissions lines. *Water Resour. Res.* v.16, p.574-82, 1980.
- VAN SCHILFGAARDE, J. Transient design of drainage system. *Am. Soc. Civil Eng. Proc.* v.91, n.IR3, p.9-22, 1965.
- WEAST, R.C. *Handbook of physics and chemistry*. 67 ed., Boca Raton: CRC Press 1986. 305p.

- WESSELING, J. Crop growth and wet soil. In: VAN SCHILFGAARDE, J. *Drainage for agriculture*. Agro. Monogr. 17., Madison: ASA WI, 1974. p.39-90.
- WILKERSON, G. G., JONES, J. W., BOOTE, K. J., INGRAM, K.T., MISHOE, J.W. Modeling soybean growth for crop management. *Trans.ASAE (American Society Agricultural Engineers)*, v.26, n.1, p.63-73, 1983.
- YOUNG, T.C., LIGON, J.T. Water table and soil moisture probabilities with tile drainage. *Trans. ASAE (American Society Agricultural Engineers)*, v.15, p.448-51, 1972.
- ZEGELIN, S.J., WHILE, I., JENKINS, D.R. Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* v.25, p.2367-76, 1989.

APÊNDICE