Campus de São Carlos

**ESTUDO DE VÁRZEA
DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO
DA BACIA DO RIBEIRÃO DO FEIJÃO - SP**

Pós-Graduando: JOSÉ AMÉRICO BORDINI DO AMARAL

Orientador: PROF. DR. ARTHUR MATTOS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CAMPUS DE SÃO CARLOS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
HIDRÁULICA E SANEAMENTO

**ESTUDO DE VÁRZEA
DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO
DA BACIA DO RIBEIRÃO DO FEIJÃO – SP**

TESE DE DOUTORADO

PÓS-GRADUANDO: JOSÉ AMÉRICO BORDINI DO AMARAL

ORIENTADOR: PROF. DR. ARTHUR MATTOS

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 10.1.03.103
Ass.: <i>[Assinatura]</i>

SÃO CARLOS
JANEIRO DE 2003

DEDALUS - Acervo - EESC

31100043022

Class.	TESE
Cutt.	0309
Tombo	T043/03
Sysno	1310897

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A485e

Amaral, José Americo Bordini do
Estudo de várzea da planície de inundação da bacia
do Ribeirão do Feijão - SP/ José Americo Bordini do
Amaral. -- São Carlos, 2003.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área: Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Arthur Mattos.

1. Várzeas. 2. Planície de inundação. 3. Modelo de
simulação. 4. Ciclo hidrológico. 5. Hidrometeorologia.
6. Hidrologia. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOSÉ AMÉRICO BORDINI DO AMARAL**

Tese defendida e julgada em 20-12-2002 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **ARTHUR MATTOS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **FRANCISCO ARTHUR DA SILVA VECCHIA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

Profa. Tit. **ODETE ROCHA**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **CRISTIANO DOS SANTOS NETO**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

aprovado

Dr. **EDUARDO DELGADO ASSAD**
(Pesquisador - EMBRAPA-Campinas)

aprovado

Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

**ESTUDO DE VÁRZEA
DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO
DA BACIA DO RIBEIRÃO DO FEIJÃO – SP**

José Americo Bordini do Amaral

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil, área de Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arthur Mattos

São Carlos
2003

*A meus pais,
Americo e Delza*

道場訓

- 一、人格完成に努むること。
- 一、誠の道を守ること。
- 一、努力の精神を養うこと。
- 一、礼儀を重んずること。
- 一、血気の勇を戒むること。

*Os vários ensinamentos
e práticas do Zen são
somente para encorajá-lo a olhar
Individualmente
para dentro de si mesmo e
descobrir sua mente original,
de modo que possa
conhecer sua essência natural
e ficar em um estado de grande
paz e felicidade.*

Yuansou

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Arthur Mattos, pela sábia orientação.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, por ter proporcionado boas condições para que houvesse o desenvolvimento da tese.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica, pela bolsa de estudo concedida.

À FINEP, através da REHIDRO, pelas facilidades nas instalações a campo.

À Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, pelo uso de toda a infra-estrutura oferecida para finalização da tese.

Ao Professor Doutor Cristiano dos Santos Neto, da Universidade Federal de São Carlos, pela co-orientação.

A Professora Doutora Odete Rocha, da Universidade Federal de São Carlos, pelo estímulo e confiança no trabalho.

Ao Professor Doutor Pedro Américo Cabral Senna (*in memoriam*), pela amizade.

Ao Professor Doutor Ricardo Schaal, quando do estudo topográfico.

Ao Técnico José Roberto "Betão" Maramarque, pelo fundamental trabalho para a execução da tese.

Ao José Valdecir de Lucca, pelas análises de nutrientes.

Ao Emerson, por permitir a realização dos trabalhos em sua propriedade.

A Karla de Andrade e Silva, pelo auxílio com o infiltrômetro.

A Gloria Massae Taniguchi, pelo incentivo e ajuda.

A Lourival e Maria Alice, pela ajuda de irmãos, sempre.

Aos amigos: Ana, Bitar e Bia; Zezé, Presidente e Pedro; Graça; Partidão; Jeremias.

A meus irmãos de KARATE da Academia Santos, na pessoa do SENSEI Mario José dos Santos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	12
RESUMO	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	18
4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. MODELAGEM	19
3.1 GEOMORFOLOGIA	37
3.2 ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO	40
3.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	41
4. LIMNOLOGIA	43
5. CLIMATOLOGIA	60
6. MATERIAS E MÉTODOS	68
6.1 MODELAGEM	68
6.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRECIPITAÇÃO	71
6.3 MEDIDAS DA VAZÃO LÍQUIDA	72
7. ÁREA DE ESTUDO	74
7.1 GEOLOGIA REGIONAL	78
7.2 HIDROGEOLOGIA	79
7.3 GEOMORFOLOGIA	80
7.4 VÁRZEA DE ESTUDO	81
8. CONCLUSÕES	83
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	94

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Termos gerais de um ciclo hidrológico, onde: P = precipitação, ET = evapotranspiração, I = interceptação, Pn = precipitação efetiva, Si = escoamento superficial, So = escoamento superficial efluente, Gi = contribuição subterrânea, Go = recarga do aquífero, $\Delta V/\Delta t$ = mudança no armazenamento por unidade de tempo, T = nível fluviométrico.....22
- Figura 2 – Modelo de simulação do ciclo hidrológico na várzea da planície de inundação do ribeirão do Feijão24
- Figura 3 - Condições iniciais utilizadas no modelo de simulação (A) e sub-modelo de simulação para cálculo de evapotranspiração por PENMAN-MONTEITH (B).....25
- Figura 4 – Sub-modelos de simulação para: evaporação e topografia e georeferenciamento26
- Figura 5 - Variação da altura da lâmina d'água (m) no piezômetro P2 da várzea do local de estudo no ano de 2000, com sua linha de tendência e equação e coeficiente de regressão.....27
- Figura 6 - Variação da altura da lâmina d'água (m) da várzea do local de estudo no ano de 2000, com sua linha de tendência e equação e coeficiente de regressão, a partir dos valores gerados pelo modelo de simulação.....28
- Figura 7 - Variação da altura da lâmina d'água (m) nos piezômetros situados na várzea (P5 a P9)29
- Figura 8 - Variação da altura da lâmina d'água (m) nos piezômetros situados no terraço (P1 a P4).....30
- Figura 9 - Curvas-chave do ponto de captação de água do SAAE (A) e da seção de saída da área de estudo (B).....32
- Figura 10 - Variação da altura da lâmina d'água (cm) no piezômetro P7, no período de 22 a 27 de fevereiro de 2000 e linha de tendência com respectivas equação e coeficiente de correlação (R^2)34
- Figura 11 - Variação da altura da lâmina d'água (cm) no piezômetro P7, no período de 10 a 17 de março de 2000 e linha de tendência com respectivas equação e coeficiente de correlação (R^2)34
- Figura 12 - Variação altura da lâmina d'água (m), medida no linígrafo instalado na seção de saída da área de estudo, e a precipitação (mm) durante o ano de 200036
- Figura 13 - Variação da evapotranspiração potencial - ETo (mm.dia-1) no local de estudo para o ano de 200036

Figura 14 - Variações nas concentrações de oxigênio dissolvido – OD (mg.l^{-1}), amônio, nitrito, nitrato e fósforo total ($\mu\text{g.l}^{-1}$) no ribeirão do Feijão (na exutória do ponto de coleta da tese) no período de novembro/90 a fevereiro/92. Dados de RIOS (1993) e TEIXEIRA (1993).....	44
Figura 15 - Variações nas concentrações de oxigênio dissolvido – OD (mg.l^{-1}), amônio, nitrito, nitrato e fósforo total ($\mu\text{g.l}^{-1}$) no ribeirão do Feijão (em estação próxima ao lixão) no período de novembro/90 a fevereiro/92. Dados de RIOS (1993) e TEIXEIRA (1993)	44
Figura 16 - Variação dos nutrientes (nitrito, nitrato, amônio e fósforo total) no ribeirão do Feijão em agosto de 1996. Dados de SILVA-FILHO (1998)	45
Figura 17 – Modelo de simulação de remoção do nitrogênio em várzeas, proposto por JØRGENSEN (1994) (Equações: vide anexo)	47
Figura 18 – Modelo dinâmico do carbono, nitrogênio e fósforo e suas interações em várzeas de planícies de inundação, proposto por VAN DER PEIJL (1999)	49
Figura 19 - Variação espacial da temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão.....	52
Figura 20 - Variação espacial do oxigênio dissolvido - OD (mg.l^{-1}) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão.....	52
Figura 21 - Variação espacial do pH nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão.....	53
Figura 22 - Variação espacial da condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão.....	53
Figura 23 - Variação espacial das concentrações do nitrito (NO_2) (A), do nitrato (NO_3) (B) e do amônio (NH_4) (C) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão.....	54
Figura 24 - Variação espacial das concentrações do fósforo inorgânico (PO_4) (A), do fósforo total dissolvido (PTD) (B) e do ortossilicato (Si(OH)_4) (C) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão	55
Figura 25 – Ordenação dos locais e meses de amostragem (A) e das variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas (B) do ribeirão do Feijão através da Análise de Componentes Principais (Componente 1 x Componente 2)	58

Figura 26 – Ordenação dos locais e meses de amostragem (A) e das variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas (B) do ribeirão do Feijão através da Análise de Componentes Principais (Componente 1 x Componente 3)	59
Figura 27 - Temperatura do ar (°C) da Normal Climatológica em São Carlos. Fonte: INMET (1992).....	61
Figura 28 - Precipitação total, precipitação máxima em 24 horas e evaporação total (mm) da Normal Climatológica em São Carlos. Fonte: INMET (1992).....	61
Figura 29 - Variação diária da temperatura do ar (°C), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão, no período de setembro a dezembro de 1999.....	62
Figura 30 - Variação diária da precipitação (mm) na estação de coleta do ribeirão do Feijão, no período de setembro a dezembro de 1999	62
Figura 31 - Variação diária da temperatura do ar (°C), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão durante o ano de 2000	63
Figura 32 - Variação diária da precipitação (mm) na estação de coleta do ribeirão do Feijão durante o ano de 2000	63
Figura 33 - Variação diária da umidade relativa do ar (%), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão, no período de setembro a dezembro de 1999.....	64
Figura 34 - Variação diária da umidade relativa do ar (%), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão durante o ano de 2000	64
Figura 35 - Variação da pressão barométrica (mmHg), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão durante o ano de 2000	65
Figura 36 – Foto da estação climatológica automática, em primeiro plano. Ao fundo, vista parcial da mata ciliar do ribeirão do Feijão e da várzea	68
Figura 37 – Vista parcial do local de estudo.	69
Figura 38 – Foto do linígrafo instalado na margem direita do ribeirão do Feijão.....	70
Figura 39 – Localização da área de estudo, no estado de São Paulo	75
Figura 40 – Localização das instalações e pontos de amostragem na área de estudo e da região de contribuição.....	76

Figura 41 – Modelo digital do terreno da área de estudo. A cor vermelha indica 725m e a cor verde escuro 755m (Método utilizado: filtro de médias 3x3; *software* IDRISI).....77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Número de *EIGENVALUES* (fatores), seus valores e porcentagens da variância total e acumulada obtidos na Análise de Componentes Principais das variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas do ribeirão Feijão, em função dos meses e locais de amostragem..... 57

Tabela 2 – Correlação das variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas com os fatores 1, 2 e 3 (* corresponde aos valores mais significativos para cada fator)..... 57

AMARAL, J. A. B. do. **Estudo de várzea da planície de inundação da bacia de inundação do ribeirão do Feijão, São Carlos – SP.** São Carlos, 2002. 125p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A partir de setembro de 1999 até novembro de 2000 estudou-se a várzea da margem direita da planície de inundação do ribeirão do Feijão, com objetivo de verificação da várzea funcionando como filtro natural na contenção de matéria orgânica utilizando-se para esse estudo, um modelo de simulação desenvolvido com o *software* Stella. Foram coletados dados climatológicos oriundos de estação climatológica automática (temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, radiação solar, velocidade e direção do vento e pressão barométrica), em piezômetros instalados na várzea (em número de 9) e coleta de amostras de água no rio, dados limnológicos: físicos (temperatura da água, turbidez, oxigênio dissolvido, condutividade e profundidade); químicos (fósforo total, fósforo total dissolvido, silicato, nitrogênio total, nitrato, nitrito e amônia), além de dados obtidos pelo estudo da literatura e trabalhos próximos da área de estudo já publicados. A partir do estudo da inter-relação dos processos existentes na várzea de inundação do ribeirão do Feijão, elaborou-se modelo de simulação. As conclusões que se obtiveram indicam bom comportamento do modelo de simulação e, também, que estudos em escala de tempo mais reduzida sejam utilizados em trabalhos futuros para estudos de várzeas. Outra conclusão refere-se ao funcionamento da várzea como filtro natural, onde houve armazenamento de carbono (matéria orgânica). Constatou-se grande amplitude da variação diária da altura da lâmina d'água devido à evapotranspiração. Recomenda-se a preservação desse rio porque 40% da água de superfície que abastece a cidade de São Carlos é oriunda desse manancial.

Palavras-chave: várzeas – planície de inundação; modelo de simulação – ciclo hidrológico; hidrometeorologia – hidrologia

AMARAL, J. A. B. do. *Study of Feijão river wetland from its basin floodplain, São Carlos - SP.* São Carlos, 2002. 125p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

From September 1999 up to November 2000 a wetland of the right margin of Feijão river floodplain was studied with the objective to verify its activity as an natural filter to retain organic matter making use of a simulation model constructed with the help of the Stella software. Were collected climatological data from an automatic climatological station (air temperature, air moisture, rain, solar radiation, speed and wind direction and atmospheric pressure), from piezometers installed within the wetland (number of 9) and samples collected of river water, limnological data: physical data (water temperature, turbidity, dissolved oxygen, conductivity and depth); chemical data (total phosphorus, total dissolved phosphorus, silicate, total nitrogen, nitrate, nitrite and ammonium), moreover data obtained from literature and papers published of sites near the study area. From the interrelationship of processes occurring within the Feijão river floodplain wetland was constructed the simulation model. The obtained conclusions indicate the good simulation model behavior and show that time scales should be shorter in future wetland studies. Other conclusion refer to wetland conduction as a natural filter where occurred carbon storage (organic matter). Great amplitude of water table diary variation have been verified within the wetland due to evapotranspiration. Is possible to recommend the river preservation because 40% of the surface city supply is from this site.

Key-words: wetlands – floodplain; simulation modelling – hydrological budget; hydrometeorology – hydrology

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das várzeas e a análise de seu funcionamento são instrumentos fundamentais no auxílio à conservação dos recursos naturais. A utilização desse conhecimento, o desenvolvimento de modelos matemáticos para outras áreas alagadas, e o desenvolvimento de diferentes modelos que mostrem seu funcionamento, são imprescindíveis para o estudo de áreas alagadas assim como, atualmente, é prioritário para a pesquisa limnológica. A água não é um recurso ilimitado e tem se tornado cada vez mais escassa: 97,2% da água existente no planeta estão nos oceanos e apenas 2,8% são de água doce. No Brasil, cujos recursos existentes para a melhoria da infra-estrutura necessária para tratamento de água são limitados, sem nenhum ou com pouco saneamento básico, esses recursos deveriam ser utilizados para preservação e conservação dos mananciais de que ainda dispõe e dentre os quais, as várzeas desempenham papel fundamental para a manutenção desse equilíbrio.

Segundo SILVA-FILHO (1998), os estudos de ambientes aquáticos podem ser divididos em três fases:

5. Início do século 20 – Período em que predominavam os estudos descritivos, baseando-se na história natural.
5. Meados do século 20 – Continuam os estudos descritivos, concentrando-se na medida da produtividade primária e fluxo de energia.
5. Época atual – Estudos que conciliam conceitos físicos e biológicos em uma abordagem holística.

Devido à dificuldade em se relacionar causas e efeitos para posterior elaboração de um modelo mental, características biológicas do ser humano ZAMBOM (1999, *apud* VILLELA, 2000), fez-se opção pelo desenvolvimento e estudo de modelos utilizando-se a linguagem de Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*). Neste sistema, a interface gráfica e a linguagem apresentam-se de maneira amigável e permitem seu uso por pessoas de diferentes formações profissionais com diferentes graus de conhecimento matemático. A construção dos modelos serve para: definição de problemas, organização e compreensão dos sistemas e idéias, avaliação dos dados observados, propiciar o entendimento das ligações entre os componentes e permitem fazer-se simulações sobre os sistemas em estudo.

É relevante ter melhor conhecimento das áreas alagadas, pois desde tempos remotos sabe-se da importância dessas áreas para o sustento humano (JUNK *et al.*, 1989). Para a cidade de São Carlos, abastecida com água de superfície pelo ribeirão do Feijão, isto é verdadeiro. Atualmente, cerca de 40% da água consumida pelo cidadão são-carlense vêm deste manancial¹. Além da importância da conservação da bacia do ribeirão do Feijão, o manejo correto deste recurso também se faz necessário para a continuidade e qualidade do serviço de abastecimento de água.

Nesta região as várzeas desempenham papel fundamental para a manutenção da qualidade de água. A porcentagem da área alagada é elevada quando comparada a outros locais (SANTOS, 1993) e, apesar de contar com um aterro sanitário à montante, a água de superfície consumida pela população de São Carlos tem boa qualidade o que, em parte, se deve à presença das várzeas.

Outro fator importante a ser considerado é o custo que o tratamento exige quando a água se apresenta poluída. Os custos são diminuídos pela ação natural de limpeza da água pelas várzeas que atuam

¹ Dados obtidos junto ao SAAE (Serviço de Tratamento de Água e Esgoto) em São Carlos.

como “filtros naturais”. A manutenção da quantidade e qualidade da água utilizando-se racionalmente os recursos naturais reverte para o consumidor na forma de um serviço com menor preço e maior qualidade.

Pela visão holística, é interessante que se tenha o conhecimento quantitativo dos sistemas físicos e biológicos. A interação do uso da linguagem (modelagem) com o conhecimento do funcionamento desses sistemas propicia melhoria da qualidade de vida, através da possibilidade de otimização dos processos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral é a compreensão e análise dos processos que ocorrem na várzea e as inter-relações existentes com os corpos de água de que são oriundas ou formadas, por meio de estudos hidrológicos, climatológicos, limnológicos e de qualidade das águas da bacia do ribeirão do Feijão.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Propor modelo de simulação com o auxílio de *software* específico (STELLA), determinístico, com finalidade científica e de manejo;
- Apontar lacunas de conhecimento dentro dos compartimentos estudados e identificar os compartimentos prioritários para pesquisa;
- Interagir informações e contribuir para uma visão holística dessas áreas com os locais adjacentes.

3 MODELAGEM

A modelagem ecológica se originou com LOTKA-VOLTERRA e STREETER-PHELPS em 1920 e o uso mais abrangente dos modelos de manejo ambiental teve início nos anos 70 (JØRGENSEN, 1999).

A modelagem matemática de várzeas é um assunto difícil, devido às grandes variações existentes nos tipos de várzeas. STRASKRABA (1995) salienta que é difícil a tarefa de modelar a várzea porque é um ambiente bastante diversificado, sendo necessário o levantamento de muitas variáveis para sua correta avaliação.

CHAPRA (1997) refere-se ao desenvolvimento do estudo dos modelos para qualidade de água, passando de estudos hidrológicos para estudo da quantidade de poluentes, nos últimos 30 anos, apesar do desenvolvimento ser apreciável a partir do início do século. A partir da década de 60 do século passado, os estudos foram impulsionados com auxílio dos computadores, e os métodos que descrevem em detalhe os processos a serem modelados, foram bastante desenvolvidos.

RIGHETTO (1998) menciona o trabalho de modelagem com o auxílio dos computadores. O desenvolvimento dos computadores em sua velocidade de processamento, poder de armazenamento e desenvolvimento de *softwares*, acarreta o aparecimento de modelos ultracomplexos. Esta complexidade é possível ser alcançada pela execução de seqüências de instruções dos programas.

Há, ainda, a utilização de modelos, como proposto por MCDONALD & HARBAUGH (1988) para estudo hidrológico, conhecido como MODFLOW (distribuído pelo U.S. Geological Survey) e outros modelos.

MCKILLOP *et al.* (1999) referem-se a modelos que se adaptam à superfície ou subsuperfície, contudo esses processos ocorrem quase sempre associados.

Os primeiros trabalhos a respeito das várzeas foram resumidos por LUCKYANOV (*apud* STRASKRABA, 1995) e GOPAL *et al.* (1982 *apud* STRASKRABA, 1995). Vários autores têm resumido os recentes avanços no estudo de várzeas e modelagem, tais como: MITSCH *et al.* (1988) e PATTEN (1994).

De acordo com STRASKRABA (1995), os primórdios da modelagem se devem a componentes individuais, como modelagem do crescimento de plantas aquáticas e decomposição, modelagem do crescimento de árvores em ambiente alagado, oxigenação da água eutrofizada, hidrologia das águas alagadas e outros. No estudo de limnologia, os modelos menos desenvolvidos são os de áreas alagadas, devido à sua alta complexidade, com variadas proporções de interação com a água, sedimentos, plantas aquáticas e componentes terrestres e, ainda, porque a heterogeneidade das áreas de várzea é muito maior que a de lagos ou reservatórios. VAN DER PEIJL (1999) considera que os estudos com várzeas de planície de inundação são especialmente raros.

O programa utilizado para tratamento dos dados foi o STELLA versão 7.0.1, para sistema operacional Microsoft Windows, comercializado pela HPS (*High Performance Systems, Inc.*, 2001). Este é um programa que auxilia a produção de um modelo de simulação. O modelador constrói modelos de compartimentos gerais com o auxílio do STELLA (*Structured Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation*) e, isto permite representar sistemas complexos de maneira simples. O organograma, com o modelo proposto, foi desenhado na tela do computador e, então, as variáveis de estado, variáveis forçantes, condições de contorno, condições iniciais e constantes, foram dispostas. Depois desse estágio estudam-se as equações diferenciais e suas inter-relações com o sistema físico de onde

foram extraídas. O *software* STELLA utiliza na simulação dados oriundos de coletas na área de pesquisa.

É imprescindível e de relevante importância a obtenção de dados confiáveis e em número suficiente para avaliação do cenário real (NARASIMHAM, 1995). Os dados coletados foram os relacionados com transporte de massa referente à movimentação da água no ciclo hidrológico.

Segundo JØRGENSEN (1994) o procedimento para realização do modelo é o seguinte:

- Definição do problema e do sistema de estudo;
- Diagrama conceitual do sistema pretendido;
- Coleta de dados que servirão para a formulação;
- Formulação matemática dos processos;
- Análise de sensibilidade e exame dos submodelos;
- Calibração dos modelos;
- Validação dos modelos propostos.

Os coeficientes de conversão foram determinados de acordo com o proposto na modelagem e a análise baseada na seguinte equação (MITSCH & GOSSELINK, 1993):

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P_n + S_i + G_i - ET - S_o - G_o \pm T$$

onde:

V volume de água armazenado na várzea;

$\Delta V/\Delta t$ variação no volume de água na várzea por unidade de tempo (t);

P_n precipitação efetiva no solo;

S_i contribuição de superfície;

G_i contribuição de subsuperfície;

ET evapotranspiração;

S_o escoamento superficial;
 G_o saídas de subsuperfície;
 T mudanças devido à alteração do regime do rio.

Portanto, cada um dos termos da equação acima pode ser expresso em unidades de taxa ($m \cdot dia^{-1}$), lâmina d'água (m), por unidades de tempo (dias); ou em termos de volume por unidade de tempo ($m^3 \cdot dia^{-1}$). Entretanto, a unidade de tempo utilizada é o dia e a unidade de lâmina d'água é o metro, para todas as variáveis cujas notações podem ser descritas no modelo de simulação.

Exemplo de balanço hídrico e trocas existentes entre seus componentes:

Figura 1 – Termos gerais de um ciclo hidrológico, onde: P = precipitação, ET = evapotranspiração, I = interceptação, P_n = precipitação efetiva, S_i = escoamento superficial, S_o = escoamento superficial efluente, G_i = contribuição subterrânea, G_o = recarga do aquífero, $\Delta V/\Delta t$ = mudança no armazenamento por unidade de tempo, T = nível fluviométrico

JAY FORRESTER publicou, em 1961, o *Industrial Dynamics*. Nesta publicação encontram-se os fundamentos da linguagem *system dynamics* desenvolvida pelo autor. A partir da utilização dessa linguagem é que foi popularizado o uso dos programas para Modelagem de Simulação. Originalmente, tal linguagem era destinada à área de Engenharia mas, no decorrer do século passado, foi abrangendo as áreas de ciências ambientais e, finalmente, as ciências humanas e sociais ,e hoje em dia, é popular, nas escolas norte-americanas, para ensino de cálculo e matemática básica (RICHMOND, 2001). Aqui no Brasil tem aumentado o interesse pela linguagem, porém não é ainda de uso popular.

O modelo de simulação do ciclo hidrológico, utilizado nesta tese, para a várzea do ribeirão do Feijão, foi originalmente elaborado por VOINOV (1999) e VOINOV (2001) modificado para as condições de execução e pode ser visualizado nas Figuras 2, 3 e 4.

Figura 2 – Modelo de simulação do ciclo hidrológico na várzea da planície de inundação do ribeirão do Feijão

Figura 3 - Condições iniciais utilizadas no modelo de simulação (A) e sub-modelo de simulação para cálculo de evapotranspiração por Penman-Monteith (B)

Figura 4 - Sub-modelos de simulação para evaporação, topografia e georeferenciamento

Este modelo foi calibrado, procedeu-se à simulação e os resultados obtidos por esse desenvolvimento foram validados pelo método estatístico de NETER & WASSERMAN (1974), comparando-se as linhas das retas de regressão adicionadas para os dados de variação da altura do lençol freático: dados medidos e dados gerados pelo modelo, para o ano de 2000. Obtiveram-se curvas iguais, de acordo com esse método, quando da comparação da variação da lâmina d'água do piezômetro P6 (instalado na várzea) e os dados gerados pelo modelo de simulação, a nível de 95% de confiança.

A validação do modelo foi executada comparando-se os dados de variação da altura da lâmina d'água: dados medidos e dados calculados pelo modelo; duas retas de regressão foram comparadas pelo método de NETER & WASSERMAN (1974) (Figs. 5 e 6).

Figura 5 - Variação da altura da lâmina d'água (m) no piezômetro P2 da várzea do local de estudo no ano de 2000, com sua linha de tendência e equação e coeficiente de regressão

Figura 6 - Variação da altura da lâmina d'água (m) da várzea do local de estudo no ano de 2000, com sua linha de tendência e equação e coeficiente de regressão, a partir dos valores gerados pelo modelo de simulação

Em anexo tem-se o CD-Rom que contém a *Run-time version* do *Software* STELLA com o modelo proposto e, na Tabela 1 (em anexo) estão descritas as equações utilizadas no modelo de simulação e, nos "documentos", esclarecimentos sobre elas.

Foi utilizado, no modelo de simulação, valor de Índice de Área Foliar igual a 4, correspondente à cultura agrícola (algodão) em plena fase de crescimento com menos de 1m de altura (SILVA *et al*, 2000). Na várzea em estudo a altura média da vegetação foi estimada em 0,80m e esses valores foram considerados invariáveis durante todo o ano.

Solo, ar e água, constituem *continuum* ambiental e compõem os sistemas que suportam a vida na terra (SINGH, 1995). Apesar da maneira tradicional de divisão do estudo desses sistemas por compartimento, eles interagem e são complexos e interdependentes. Ainda segundo SINGH (1995), o meio ambiente natural necessita de proteção e entendimento das questões que as relacionam como um todo ou como um sistema.

Na Figura 8 tem-se a variação da altura da lâmina d'água nos piezômetros situados no terraço (P1 a P4) e, na Figura 7, nos piezômetros localizados na várzea (P5 a P9). A altura da lâmina d'água tem, como plano de referência (zero) a altura da cota do Piezômetro 2 (P2) na borda superior do tubo utilizado (filtro). Os piezômetros instalados no terraço, P3 e P4 e o instalado na várzea, P7, não seguiram o padrão de variação observado para os demais piezômetros. Esse comportamento, da variação da profundidade do lençol, pode ser explicado pela existência contígua aos piezômetros de um dique de basalto que influencia tal comportamento. Esse dique separa a Formação Botucatu da Formação Serra Geral. Na Figura 7, o piezômetro 7 (P7) demonstra comportamento diferente dos demais, cuja variação pode ser devida à grande variabilidade de solos existentes na várzea. A cota inicial é a altura máxima do filtro no piezômetro P2. Pela análise da Figura 7, percebe-se maior variação da altura do freático quando se aproxima do ribeirão do Feijão. A interferência do ribeirão na várzea também é notada por esse comportamento.

Figura 7 - Variação da altura da lâmina d'água (m) nos piezômetros situados na várzea (P5 a P9)

Figura 8 - Variação da altura da lâmina d'água (m) nos piezômetros situados no terraço (P1 a P4)

A análise de sistemas em Hidrologia consiste na aplicação de métodos quantitativos envolvendo problemas de sistemas complexos, buscando um instrumento mais apropriado para a compreensão dos mesmos (ANGELINI, 1995). Nas ciências físicas e biológicas objetiva-se conhecer o comportamento dos sistemas existentes na natureza para utilizá-los no desenvolvimento de ciência e tecnologia (VILLELA, 2000).

CARTER *et al.* (1979 *apud* MITSCH & GOSSELINK, 1993) listam os seguintes tópicos para pesquisa:

- ✓ necessidade de melhorar, refinar e, talvez, simplificar as técnicas existentes para medidas hidrológicas;
- ✓ necessidade pela coleta de dados precisos para todos os parâmetros de entrada e saída de várzeas típicas representativas e estimar os vários erros inerentes a várias técnicas de medidas;

- ✓ necessidade de quantificar a relação solo-água-plantas das várzeas e melhorar o conhecimento básico dessa relação;
- ✓ estudar em profundidade experimentos de longa duração de diferentes várzeas sob diferentes condições ambientais;
- ✓ continuar a desenvolver modelos baseados em dados hidrológicos de forma que se possa desenvolver melhor as capacidades preditivas e de análise.

A curva-chave determinada pelo SAAE mostra uma curva pouco inclinada, assim como a curva determinada na área de estudo (Fig. 9); isto ocorre devido ao ribeirão do Feijão ser rio de quarta ordem, de acordo com a classificação de STRAHLER. O coeficiente de correlação para o cálculo da curva-chave para a área de estudo, foi significativamente menor que o calculado para o ponto de captação de água do SAAE, em razão de haver um número muito maior de medições por período de tempo significativamente superior.

Na curva-chave do SAAE (Fig. 12 A) o ajuste dos pontos à linha de tendência é mais significativo que no local de estudo (Fig. 12 B) devido ao maior número de medidas que foram efetuadas.

Figura 9 - Curvas-chave do ponto de captação de água do SAAE (A) e da seção de saída da área de estudo (B)

No estudo constatou-se uma grande deficiência hídrica e, mesmo no período de maior estiagem, a vazão base permaneceu em cerca de $1,5\text{m}^3.\text{s}^{-1}$.

Diversos são os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. Contudo, o importante é se conhecer as limitações de cada método e os detalhes de seu desenvolvimento, a fim de permitir ao usuário a decisão quanto à conveniência de sua utilização em determinada situação

(ANDRADE-JÚNIOR, 2000). Segundo SEDIYAMA (1987) e de acordo com os princípios envolvidos no desenvolvimento, os métodos de estimativa da ETo podem ser agrupados em cinco categorias: a) empíricos; b) aerodinâmico; c) balanço de energia; d) combinados e e) correlação de turbilhões. Dentro da categoria dos métodos combinados destacam-se os métodos de PENMAN e o de PENMAN - MONTEITH, os quais integram os efeitos do balanço de energia com os do poder evaporante do ar. O método de PENMAN - MONTEITH constitui uma modificação do método de PENMAN original, com a inclusão dos parâmetros relativos à resistência aerodinâmica e resistência da cultura sendo, atualmente, recomendado pela FAO, como método padrão de estimativa, sempre que houver disponibilidade dos dados requeridos para o seu cálculo (ANDRADE-JÚNIOR, 2000). Segundo esses autores, cálculos comparativos entre esses dois métodos, efetuados em oito diferentes localidades, sugerem tendência de superestimativa da ETo pelo método de PENMAN em relação a PENMAN - MONTEITH. (ANDRADE-JÚNIOR, 2000)

A escolha do método (PENMAN-MONTEITH) foi baseada no tipo de dados climatológicos disponíveis e na precisão requerida para os cálculos e modelagem. A variação da água nos dias em que há grande insolação é significativa, levando-se em conta o aporte de água de subsuperfície.

No período de 22 a 27 de fevereiro de 2000 e de 10 a 17 de março de 2000, foi medida a variação da altura do lençol freático no ponto P7 por um linígrafo instalado na várzea (Fig. 10 e 11) período em que houve pouca nebulosidade e a diminuição da altura do freático deveu-se à evapotranspiração durante esse período, e a reposição de água foi devida, por sua vez, ao fluxo de água do aquífero Botucatu. A linha de tendência adicionada mostra o valor médio dessa variação. A variação instantânea foi bastante diferente da variação média durante o período. O coeficiente de correlação da equação adicionada varia de 64 a 71%, mostrando confiabilidade adequada.

Figura 10 - Variação da altura da lâmina d'água (cm) no piezômetro P7, no período de 22 a 27 de fevereiro de 2000 e linha de tendência com respectivas equação e coeficiente de correlação (R^2)

Figura 11 - Variação da altura da lâmina d'água (cm) no piezômetro P7, no período de 10 a 17 de março de 2000 e linha de tendência com respectivas equação e coeficiente de correlação (R^2)

Do linígrafo instalado na várzea foi possível utilizar-se os dados do mês de março e apenas de maneira parcial. Isto ocorreu por causa da

difficuldade de se afastar os animais silvestres e pela interferência do rebanho que era criado no local. Foram tentadas várias alternativas mas não se obteve êxito na coleta; entretanto, os dados coletados revelam que a variação da lâmina d'água na várzea é bastante significativa. A linha de tendência adicionada indicou um abaixamento da altura da lâmina d'água durante os períodos de registro da variação.

Os resultados das variáveis físicas, químicas, biológicas e de uso e ocupação do solo, permitiram verificar a ocorrência de fontes pontuais de contaminação na bacia estudada. Também foi possível observar-se a rápida recuperação (autodepuração) do sistema e verificar que o ribeirão do Feijão parece seguir as características teóricas do *continuum* fluvial (RIOS, 1993); entretanto, há diferença entre os valores esperados pela ocorrência das camadas areno-basálticas.

Nos períodos de 22 a 27 de fevereiro de 2000 e 10 a 17 de março de 2000, observou-se a variação da evapotranspiração potencial (ET_p) pelo método de PENMAN-MONTEITH, variando de 0,0 a 1,2mm.h⁻¹, aproximadamente (Figuras em anexo).

A altura da lâmina d'água, registrada na seção de saída da área de estudo mostrou, praticamente, a mesma tendência de variação da precipitação (Fig. 12) para o período. O tempo de concentração estimado para a bacia do ribeirão do Feijão pela seção de saída da área de estudo, é de até 24horas.

Figura 12 - Variação altura da lâmina d'água (m) medida no linígrafo instalado na seção de saída da área de estudo, e a precipitação (mm) durante o ano de 2000

A evapotranspiração potencial variou de 1 a 7mm.dia⁻¹. Esses valores apresentaram maior amplitude de variação nos meses de verão e menor durante o inverno, quando se verificou diminuição dos valores evapotranspirados (Fig. 13).

Figura 13 - Variação da evapotranspiração potencial - ETo (mm.dia⁻¹) no local de estudo para o ano de 2000

3.1 GEOMORFOLOGIA

RIOS (1993) e TEIXEIRA (1993) relatam que o ribeirão do Feijão segue o continuum fluvial, mas a descontinuidade originada pela alternância entre camadas arenosas e argilosas descaracteriza a proposta teórica que orienta esse fenômeno.

Segundo RIDDER (1977), “normalmente as planícies são formadas por sedimentos não consolidados ou debilmente consolidados, depositados horizontalmente ou simplesmente estruturados em camadas, pior ou melhor caracterizadas. Uma propriedade comum dessas camadas é ser de pouca espessura em relação à sua extensão horizontal”.

Conforme o mesmo autor, “a presença ou ausência de camadas com boas propriedades de transmissividade da água, de barreiras ou de dificuldades para o fluxo de água subterrânea e água superficial afeta, direta ou indiretamente, as condições da água freática ou nas proximidades da zona radicular. Portanto, os problemas de uma zona de drenagem estão estreitamente relacionados com suas condições geomorfológicas, pedogenéticas e geogenéticas”.

Genericamente, solos de várzea são encontrados nas planícies dos rios e lagoas, onde se desenvolvem sobre sedimentos que, por sua vez, apresentam heterogeneidade quanto à composição granulométrica e mineralógica e, por isso, os solos neles desenvolvidos apresentam grande variação de características de um local para outro, que se refletem na aptidão dos mesmos (KLAMT, 1991).

Para KLAMT (1991), o conhecimento das características e propriedades dos solos de várzea é essencial para a adoção de práticas de irrigação, drenagem, correção, fertilização e manejo geral, de forma a obter

altos níveis de produtividade a menor custo e com menores probabilidades de degradação desses solos e do ambiente onde estão situados.

Sendo o solo definido como sua seção vertical, de características peculiares ao local onde se desenvolve, o mesmo compreende a zona radicular mais o substrato, até uma camada impermeável.

Segundo BEERS (1978), sob o ponto de vista pedológico o solo pode ser dividido em camadas aproximadamente paralelas à sua superfície e estas camadas pedogenéticas são denominadas horizontes. Para o autor, nem todas as camadas diferentes do solo são horizontes, já que as camadas também podem ser geogenéticas como, por exemplo, os depósitos através da água e do vento. A morfologia do solo expressa em perfil pedogenético, reflete o efeito combinado dos seus diferentes fatores formadores que são os responsáveis pelo seu desenvolvimento.

U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering, citado por FORSITHE (1985), a "textura tem sido usada para diagnosticar algumas propriedades químicas, como a capacidade de troca catiônica e algumas propriedades físicas, como a retenção de umidade, a consistência e a infiltração. Sem dúvida alguma, tanto a natureza mineral do solo e sua estrutura, como sua textura, influem muito sobre as ditas propriedades".

No que diz respeito à densidade real, BEERS (1978) refere-se como a razão entre a massa das partículas pela unidade de volume das mesmas, geralmente expressa em g/cm³ de solo. Esta medida é representada pela seguinte equação:

$$D_r = \left(\frac{E_s}{V_p} \right)$$

onde:

D_r densidade real do solo;

E_s massa das partículas do solo (secas em estufa);
 V_p volume das partículas do solo.

Para REICHARDT (1985), a determinação da densidade real é feita pela pesagem de solo seco (M_s), isto é, após peso constante em estufa a 105°C, entre 24 e 48 horas e pela medida do volume (V_p), obtida por meio da variação do volume registrada quando a massa das partículas do solo é imersa em líquido.

PAIVANEM (1982) afirma que a densidade real dos solos de várzea estaria em torno de 1,5 g/cm³. BEERS (1978) diz que a matéria orgânica tem densidade real igual a 1,47 g/cm³ e que este parâmetro nos solos minerais tem a média aceitável de 2,65 g/cm³.

Quanto à densidade global do solo, FORSITHE (1985) e STANCATI *et al.* (1981) dizem que é a relação entre a massa das partículas do solo secas em estufa e o volume total, incluindo o espaço poroso. Esta medida é expressa pela seguinte equação:

$$B_g = \left(\frac{E_s}{V_t} \right)$$

onde:

B_g densidade global do solo (g/cm³);
 E_s massa das partículas do solo secas em estufa (g);
 V_t volume da amostra do solo (cm³).

BEERS (1978) afirma que a densidade global dos solos minerais não cultivados varia entre 1,0 e 1,6 g/cm³. Para o autor, quanto mais fina for a textura e maior for o conteúdo de matéria orgânica menor será a densidade global.

Segundo TROUT (1982), "os poros do solo são os vazios entre os grãos do solo. O ar e a solução líquida no solo são armazenados e se movem através desses poros. Embora a geometria deste espaço poroso seja importante na determinação do armazenamento da água no solo e do movimento desta, o volume poroso total também é um parâmetro importante e amplamente empregado. O volume de poros do solo variará em função do tamanho e forma das partículas do solo".

ABADE & NOGUEIRA (1983) consideram a porosidade total uma das propriedades mais importantes de um substrato, uma vez que representa a porcentagem de poros que podem ser ocupados pela água e o ar. Esta propriedade é calculada a partir das densidades real e global.

Para BEERS (1978), o volume do espaço poroso depende muito do arranjo das partículas sólidas e, que, geralmente, a porosidade total dos solos minerais varia entre 35% para os solos compactados e 60% para as camadas superficiais soltas de solo.

3.2 ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO

Segundo TROUT (1982), a quantidade de água armazenada no solo depende da sua porosidade, do tamanho e distribuição dos poros e varia com a pressão capilar da água nos poros. Conseqüentemente, um solo de textura fina armazena uma quantidade diferente de água a dada pressão capilar, se comparado com um solo de textura média ou grosseira, bem como armazena diferentes quantidades de água a variadas pressões capilares.

A relação entre a quantidade de água armazenada no solo e a pressão capilar de água, pode ser representada pela curva de retenção. Segundo LIBARDI (1995), duas regiões da curva são de interesse especial

para a agricultura: a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. A capacidade de campo é muitas vezes definida como o conteúdo de água retido a uma pressão de $1/3$ de bar, uma vez que a maioria dos solos alcança este teor próximo a 33KPa. No campo, este parâmetro é definido como a água que permanece no solo depois da água excedente ter sido drenada para a profundidade em que se encontra o lençol freático.

O ponto de murcha permanente é o conceito de umidade no qual as plantas atingem uma condição irreversível de murcha. Este ponto variará entre plantas e condições atmosféricas, mas depende, inicialmente, da energia da água no solo; é usualmente definido como conteúdos de água a uma pressão capilar de 1500KPa (15 Bar).

O valor de porosidade do solo foi estimado em 41%, utilizando-se valores relativos a solos bastante arenosos (SALASSIER, 1995) cuja amplitude de variação, ainda de acordo com SALASSIER (1995), vai de 38 a 43%.

3.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

De acordo com FORSYTHE (1982), a condutividade hidráulica é a habilidade do solo de permitir a passagem da água, sendo que seu valor é necessário na drenagem de solos e se refere ao excesso de água que penetra em um solo e chega a tocar o nível freático.

Para o *U.S. Bureau of Plant Industry of Agriculture Engineering* citado por FORSYTHE (1982), a determinação das condutividades hidráulicas nos horizontes de um perfil de solo é a forma mais exata para avaliar a classe de permeabilidade, sendo que esta é definida pelo menor valor da condutividade hidráulica medida nos horizontes.

No caso das várzeas, os horizontes não são perfeitamente definidos havendo, por isso, grande variabilidade, mostrando a necessidade de serem coletadas amostras em número suficiente para análise estatística e posterior uso dos dados obtidos. SILVA & RIGHETTO (2002) relatam que houve variação entre $15,96\text{mm.h}^{-1}$ com desvio padrão de $17,25\text{mm.h}^{-1}$ para infiltração medida por infiltrômetro de torre, em área arenosa em São Carlos – SP. No modelo foi utilizado valor de 25mm.h^{-1} , considerado valor médio, correspondendo a $0,6\text{m.dia}^{-1}$. A permeabilidade, segundo SALASSIER (1995), para solo arenoso, é de $2,5\text{mm.dia}^{-1}$, ou $0,27\text{mm.h}^{-1}$.

O fluxo subterrâneo se encontra condicionado pela topografia, pela inclinação das camadas geológicas e pela distribuição espacial da pluviometria. Apesar da alta taxa de infiltração na área, a recarga profunda do aquífero Botucatu representa apenas 1,46 do total das precipitações médias anuais (CORRÊA, 1996).

O que se pretendeu foi pesquisar e estudar a inter-relação dos fenômenos hidrológicos e fenômenos químicos (limnológicos) em áreas inundadas. Na parte a montante de um braço do ribeirão do Feijão (Laranja Azeda) existe um depósito de lixo que, após muitos anos recebendo lixo da cidade, cerca de 20 anos, hoje se encontra abandonado. O chorume que sai dessa área poluída é drenado pelo córrego Laranja Azeda e se encontra com as águas do braço do ribeirão Feijão onde, de acordo com normas do CONAMA (1983), há água doce de boa qualidade durante todo o ano: Classe 1 (Figura 14). Na seção de saída do ribeirão do Feijão coleta-se água para consumo dos cidadãos são-carlenses e a água coletada tem muito boa qualidade durante a maior parte do ano (TEIXEIRA, 1993; RIOS, 1993).

O processo de diluição dos poluentes no curso do rio não explica totalmente o que ocorre. Estima-se que exista cerca de 15% de área de várzeas em relação à superfície total da bacia do ribeirão do Feijão e estas várzeas contribuem com a limpeza da água do rio. Sem dúvida, os métodos utilizados atualmente pelos serviços municipais de análise de água não detectam níveis pequenos de poluentes. Contudo, próximo ao depósito de lixo esses níveis são altíssimos (Figura 15) e diminuem gradativamente ao longo do curso do rio e, quando medidos no posto de bombeamento, apresentam valores consideravelmente inferiores (TEIXEIRA, 1993; RIOS, 1993)

Figura 14 - Variações nas concentrações de oxigênio dissolvido - OD (mg.l^{-1}), amônio, nitrito, nitrato e fósforo total ($\mu\text{g.l}^{-1}$) no ribeirão Feijão (na exutória do ponto de coleta da tese) no período de novembro/90 a fevereiro/92. Dados de RIOS (1993) e TEIXEIRA (1993)

Figura 15 - Variações nas concentrações de oxigênio dissolvido - OD (mg.l^{-1}), amônio, nitrito, nitrato e fósforo total ($\mu\text{g.l}^{-1}$) no ribeirão Feijão (em estação próxima ao lixão) no período de novembro/90 a fevereiro/92. Dados de RIOS (1993) e TEIXEIRA (1993)

Dados de RIOS (1993) e TEIXEIRA (1993) compõem as Figuras 14 e 15, nas quais a variação de Oxigênio Dissolvido (mg.l^{-1}), Nitrito, Nitrato, Amônio e Fósforo Total ($\mu\text{g.l}^{-1}$) pode ser observada. Na Figura 16 observam-

se dados de SILVA-FILHO (1998) para Nitrato, Nitrito, Amônio e Fósforo Total ($\mu\text{g.l}^{-1}$) no local de execução da tese.

Figura 16 - Variação dos nutrientes (nitrito, nitrato, amônio e fósforo total) no ribeirão do Feijão em agosto de 1996. Dados de SILVA-FILHO (1998)

Ainda de acordo com esses autores há indícios de que existe processo de auto-depuração atuando na calha do ribeirão do Feijão e se sugere que esse processo existe pela interdependência entre todos os fatores ecológicos; constataram que a poluição oriunda da lavagem de currais e do esterco que atingiram a calha do rio, foram responsáveis pela diminuição da qualidade da água.

Na várzea, os dados da análise química mostraram acentuada variação dos níveis relacionados ao nitrogênio (amônia, nitrato, nitrito e nitrogênio total) e o que potencializa esse processo é a presença do lençol freático muito próximo da superfície (Figura 7). A água do lençol diminui a velocidade de mineralização da matéria orgânica, que passa a se acumular nesta região.

O nitrogênio total representa todas as formas de nitrogênio da água, o que inclui as formas dissolvidas (nitrito, nitrato, íons amônio e uréia),

inorgânicas e orgânicas (nitrogênio orgânico dissolvido, aminoácidos e proteínas).

O nitrito em águas anóxicas é convertido em amônia. O nitrito como produto intermediário da oxidação da amônia a nitrato, provavelmente tenha sua produção dificultada nos ambientes onde ocorre falta de condições oxidantes. O nitrato, em contraste com outras formas como amônia, fosfato ou íons metálicos, move-se livremente pelo solo e superfícies aquáticas. É a forma mais altamente oxidada de nitrogênio e é usualmente a forma mais abundante de nitrogênio inorgânico combinado.

A amônia na água está presente como NH_4^+ (íons amônio) e NH_4OH não dissociado, e é gerada como produto primário final da decomposição de matéria orgânica por bactérias heterotróficas (diretamente de proteínas ou de outros compostos nitrogenados). A toxicidade da amônia para animais e plantas aquáticas é de grande importância. O gás amônia (NH_3) dissolve muito facilmente na água e forma hidróxido de amônia (NH_4OH), o qual se dissocia produzindo amônio (NH_4^+) e íons hidroxila (OH^-). Em condições ácidas, a porcentagem de NH_4OH decresce e, em condições alcalinas, ela aumenta. O NH_4OH não dissociado é tóxico mas o íon NH_4^+ não é perigoso (ESTEVES, 1988).

Além disso, JØRGENSEN (1994) (Figura 17) afirmou que os processos de nitrificação e denitrificação são os mais influenciados pela temperatura, e que a temperatura da água, na várzea, é cerca de 3 graus inferior à temperatura do ar para as suas condições ambientais na condução do experimento.

Figura 17 – Modelo de simulação de remoção do nitrogênio em várzeas, proposto por JØRGENSEN (1994) (Equações: vide anexo)

VAN DER PEIJL (1999) (Figura 18) determinou que as variáveis de estado para determinação de nitrogênio (*N*) seriam: *N* nos brotos das plantas, raízes e *N* armazenado; *N* em matéria morta acima do solo e *N* em matéria morta abaixo do solo; *N* na matéria orgânica, *N* inorgânico como amônio, nitrato; e *N* em heterótrofos. A dinâmica de fluxo do nitrogênio na várzea pode ser descrita como segue:

- Translocação: definido como trocas entre a parte aérea das plantas e raízes;
- Utilização de nitrato e amônio pelas plantas;
- Remobilização: utilização de nitrogênio já assimilado;
- Mineralização de nitrogênio orgânico e imobilização do amônio e nitrato;
- Retorno de nitrogênio ao solo pela urina dos herbívoros.

Figura 18 – Modelo dinâmico de carbono, nitrogênio e fósforo e suas interações em várzeas de planície de inundação, proposto por VAN DER PEIJL (1999)

dos ambientes aquáticos, o fósforo total particulado é presente em quantidades muito maiores que o fósforo solúvel (GOLDMAN & HORNE, 1983). O fósforo total, além de conter as formas dissolvidas, apresenta as formas de fósforo particuladas, não disponíveis à absorção imediata pelo fitoplâncton, ou seja, dá uma medida do conteúdo de todas as formas de fósforo presentes na água.

WANG & MITSCH. (2000) e KADLEC (1997) utilizaram somente fósforo total como medida da quantidade de fósforo no sistema. Usualmente, utiliza-se no estudo de limnologia a quantidade de fósforo particulado e fósforo dissolvido (fração inorgânica e orgânica), além do fósforo total.

Na várzea, a observação dos resultados indica que as taxas são dependentes de temperatura, potencial redox, conteúdo de oxigênio do solo e altura da lâmina d'água, concordando com o descrito por VAN DER PEIJL (1999) e JØRGENSEN (1994). Esses fatores são altamente inter-relacionados e a variação da lâmina d'água altera consideravelmente as condições em que esses processos ocorrem na várzea. A alternância entre ambiente oxidado e anóxico puderam ser observados.

Com relação às variáveis limnológicas das amostras coletadas nos meses de setembro, outubro e novembro de 1999, para o ribeirão do Feijão, verificou-se que as maiores temperaturas da água ocorreram nos piezômetros situados no terraço (Fig. 19). A concentração de oxigênio dissolvido foi maior no rio e, durante a coleta de novembro, foi próxima de zero nos piezômetros localizados no terraço e na várzea (Fig. 20).

Figura 19 - Variação espacial da temperatura da água (°C) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão

Figura 20 - Variação espacial do oxigênio dissolvido - OD (mg.l-1) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão

O pH esteve sempre abaixo da neutralidade (variou de 3,82 a 5,72) sendo que no terraço e na várzea os valores foram menores que no rio

(Fig. 21). A condutividade elétrica foi, geralmente, baixa, não ultrapassando os $12\mu\text{S.cm}^{-1}$, exceção para os piezômetros P5, P6, P7 e P9 (localizados na várzea) cujos valores chegaram a atingir $38,3\mu\text{S.cm}^{-1}$ (Fig. 22).

Figura 21 - Variação espacial do pH nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão

Figura 22 - Variação espacial da condutividade elétrica ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão

Nas Figuras 23 e 24 observa-se a variação espacial dos nutrientes da água do ribeirão do Feijão: nitrito (NO_2), nitrato (NO_3), amônio

(NH_4), fósforo inorgânico (PO_4), fósforo total dissolvido (PTD) e ortossilicato (Si(OH)_4). De forma geral, as maiores concentrações desses nutrientes ocorreram nos piezômetros situados na várzea (principalmente P4) e os menores no rio.

Figura 23 - Variação espacial das concentrações do nitrito (NO_2) (A), do nitrato (NO_3) (B) e do amônio (NH_4) (C) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão

Figura 24 - Variação espacial das concentrações do fósforo inorgânico (PO_4) (A), do fósforo total dissolvido (PTD) (B) e do ortossilicato ($Si(OH)_4$) (C) nos meses de setembro, outubro e novembro nos locais de amostragem do ribeirão do Feijão

A Análise de Componentes Principais realizada para as variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas nos meses de setembro, outubro e novembro de 1999, explicou 78,3% da variabilidade dos dados. O fator 1 de correlação (39,8%) distinguiu os três meses de amostragem relacionados principalmente com a temperatura do ar, radiação do CRHEA, radiação Várzea, umidade relativa CRHEA (positivamente), insolação, precipitação CRHEA e precipitação Várzea (negativamente). O fator 2 (28,8%) separou o piezômetro P4 de outubro devido aos maiores valores de nitrito, amônio, fósforo total dissolvido, fósforo inorgânico e ortossilicato. No fator 3 (14,7%) os pontos situados no rio se distanciaram dos demais, relacionado à altura do lençol freático e às concentrações de oxigênio dissolvido (Tabs. 1 e 2, Fig. 25 e 26).

Tabela 1 – Número de *EIGENVALUES* (fatores), seus valores e porcentagens da variância total e acumulada obtidos na Análise de Componentes Principais das variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas do ribeirão do Feijão, em função dos meses e locais de amostragem

Número de <i>Eigenvalue</i>	Valor do <i>Eigenvalue</i>	% Total da Variância	% Acumulada da Variância
1	7,57	39,84	39,84
2	4,52	28,81	63,65
3	2,79	14,69	78,34

Tabela 2 – Correlação das variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas com os fatores 1, 2 e 3 (* corresponde aos valores mais significativos para cada fator)

	Fator 1	Fator 2	Fator 3
OD	0,034252	0,17035	0,91492*
pH	0,086015	-0,15659	0,645804
Condutividade	0,169546	0,124109	-0,49185
Temperatura da água	0,592726	-0,06897	-0,11387
NO ₂	0,365113	0,87135*	-0,02337
NO ₃	0,04513	0,546182	0,519092
NH ₄	0,247717	0,724188*	-0,31193
PO ₄	0,3685	0,877005*	0,081819
PTD	0,347299	0,883656*	0,08371
Si(OH) ₄	-0,09066	0,880866*	-0,15251
Lençol freático	-0,06015	-0,23218	0,88621*
Temperatura do ar	0,985724*	-0,1517	0,017636
Radiação CRHEA	0,978198*	-0,19459	-0,00601
Radiação várzea	0,923214*	-0,30747	-0,07178
Insolação	-0,96792*	0,227112	0,024403
Precipitação CRHEA	-0,91967*	-0,08415	-0,13693
Precipitação várzea	-0,91492*	-0,09133	-0,14029
UR CRHEA	0,983757*	-0,07662	0,057518
UR várzea	-0,58966	0,510315	0,213433

Figura 25 – Ordenação dos locais e meses de amostragem (A) e das variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas (B) do ribeirão do Feijão através da Análise de Componentes Principais (Componente 1 x Componente 2)

Figura 26 – Ordenação dos locais e meses de amostragem (A) e das variáveis limnológicas, hidrológicas e climatológicas (B) do ribeirão do Feijão através da Análise de Componentes Principais (Componente 1 x Componente 3)

Os dados abaixo referem-se à série histórica de 10 anos realizados por TOLENTINO (1967). Ainda de acordo com esses dados, a classificação de KÖPPEN é a seguinte: Aw e Cwa, clima tropical com verão úmido e inverno seco e clima quente de inverno seco. Entretanto, SETZER (1949), CAMARGO *et al.* (1974) e OLIVEIRA & PRADO (1984) classificaram o clima como Cwb, temperado com inverno seco e temperatura média do mês mais quente menor que 22°C. A classificação climática realizada por MATTOS (1984) é, segundo THORNTHWAITE, Bb'r: clima subtropical, mesotérmico, úmido, com chuvas de verão, estiagem branda no inverno com pequena deficiência hídrica.

Temperatura do ar (média anual)	21,3 °C
Temperatura média do mês mais frio (junho)	18,1 °C
Temperatura média do mês mais quente (janeiro)	23,1 °C
Precipitação do mês mais seco (agosto)	24,1 mm
Precipitação do mês mais úmido (janeiro)	285,9 mm
Precipitação total anual	1520,6 mm

A temperatura do ar e a precipitação pela Normal Climatológica em São Carlos, são as mostradas nas Figuras 27 e 28. A análise dessas figuras mostra um período de acentuada escassez hídrica durante o inverno, com diminuição significativa da temperatura na região.

Segundo os dados do DNMET para o posto 83726 (latitude 22°01'S e longitude 47°53'W), no período de 1961 a 1990, a temperatura média do ar variou de 16 a 21,9°C e as temperaturas absolutas variaram de

29,3 a 36,9°C (Fig. 27). As menores precipitações totais ocorreram de abril a setembro e, as maiores, de outubro a março e os maiores valores de evaporação total ocorreram de julho a novembro (Fig. 28).

Figura 27 - Temperatura do ar (°C) da Normal Climatológica em São Carlos. Fonte: INMET (1992)

Figura 28 - Precipitação total, precipitação máxima em 24 horas e evaporação total (mm) da Normal Climatológica em São Carlos. Fonte: INMET (1992)

Esses dados confirmam os dados coletados na área de estudo, como pode ser visto nas Figuras 29, 30, 32 e 33. Há grande diminuição da temperatura a partir de maio e aumento da temperatura a partir de setembro. A variação da temperatura tem sido maior durante o inverno e para o ano de 2000, ainda se percebeu a influência do El Niño - ENOS (CPTEC, 2000).

Figura 29 - Variação diária da temperatura do ar (°C), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão Feijão, no período de setembro a dezembro de 1999

Figura 30 - Variação diária da precipitação (mm) na estação de coleta do ribeirão do Feijão, no período de setembro a dezembro de 1999

Figura 31 - Variação diária da temperatura do ar (°C), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão durante o ano de 2000

Figura 32 - Variação diária da precipitação (mm) na estação de coleta do ribeirão do Feijão durante o ano de 2000

A umidade relativa como expresso pelas Figuras 33 e 34 manteve-se elevada durante o período de estudo. Há diminuição da umidade relativa pelo aumento da temperatura e a flutuação diária da temperatura faz com que a umidade relativa também flutue, atingindo valores menores quando se percebe maiores temperaturas do ar. Pela posição da estação climatológica automática (terço inferior da encosta) constata-se maior oferta

de água contribuindo para uma maior umidade relativa. As linhas de tendência adicionadas nas Figuras 33 e 34 mostram uma umidade relativa média em torno de 70%. Entretanto, a variação diária da umidade vai de 13 a quase 100%, quando são realizadas medidas instantâneas (horárias). Este fenômeno foi menos perceptível quando do uso das médias diárias. Pelo estudo estatístico utilizando-se de Análise Multivariada (Análise dos Componentes Principais), percebe-se que a umidade relativa medida na várzea difere da umidade relativa medida no CRHEA, para o ano de 2000.

Figura 33 - Variação diária da umidade relativa do ar (%), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão, no período de setembro a dezembro de 1999

Figura 34 - Variação diária da umidade relativa do ar (%), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão, durante o ano de 2000

A várzea da planície de inundação do ribeirão do Feijão foi estudada no final do ano de 1999 e em quase todo o ano 2000. Esses anos foram secos (INPE, 2000) e ainda sujeitos ao efeito ENOS (El Niño). Apesar da falta de água, na várzea sempre houve Umidade Relativa variando de 65 a 95%, quando do uso de médias diárias. Esses valores são altos e podem ser explicados pela posição da área de estudo com relação ao relevo (terço inferior da encosta) e também pela proximidade do ribeirão do Feijão, o que possibilita maior oferta de água às plantas e maior evapotranspiração.

A pressão atmosférica varia de 693 a 705mmHg durante o ano de 2000. O aumento da pressão durante o inverno é fruto da entrada de frentes frias; frentes de alta pressão (Fig. 35).

A compreensão dos episódios representativos como metodologia de análise de ritmo climático por abordagem dinâmica do clima diferenciou massas de ar (Polar ou Tropical) que predominaram no local de estudo. Isso pode ser observado pelas Figuras deste capítulo. O Sistema Intertropical e o Sistema Extratropical são os que atuam com maior frequência na região Sudeste do Brasil.

Figura 35 - Variação da pressão barométrica (mmHg), com sua linha de tendência, na estação de coleta do ribeirão do Feijão durante o ano de 2000

MONTEIRO (1968) evidencia cada etapa dos episódios climáticos compreendendo as fases Pré-frontal e avanço, na etapa frontal e de domínio e transição, na etapa Pós-frontal.

A etapa pré-frontal apresenta as seguintes características, de acordo com os conceitos de abordagem dinâmica:

- ✓ Calor seco: tendência da relação entre a temperatura e a umidade do ar. As temperaturas tendem a se elevar e, ao contrário, os valores da umidade relativa do ar tendem a diminuir, tornando o ar mais seco nessa fase;
- ✓ Valores de temperatura: ocorre elevação nos registros da temperatura do ar exterior;
- ✓ Umidade do ar: decréscimo dos valores da umidade relativa do ar, provocado pela elevação da temperatura e disponibilidade hídrica. As massas polares costumam carregar umidade ao contrário de uma massa Tropical;
- ✓ Pressão atmosférica: sofre uma descontinuidade no seu ritmo diário. Assumindo valores mais elevados na fase de domínio da massa polar.

A etapa Pós-frontal apresenta as seguintes características:

- ✓ Frio-úmido: tendência habitual, depende do vigor de cada frente fria, carregando diferentes proporções de umidade e movimentação em direção às latitudes menores;
- ✓ Valores de Temperatura: declínio nos valores da temperatura do ar, principalmente, na fase de domínio do anticiclone polar. Outra característica dessa fase é a ocorrência de céu limpo;
- ✓ Umidade do ar: ocorre no domínio da massa polar significativo aumento nos valores de umidade relativa do ar, em parte provocado

pela queda da temperatura. Podem, ou não, serem seguidas por chuvas;

- ✓ Pressão atmosférica: há descontinuidade do seu ritmo, na entrada da frente, assumindo valores mais elevados na fase de domínio da massa polar.

Para o período de setembro a dezembro de 1999, a temperatura do ar no ano de 1999, medida na estação climatológica automática na várzea, variou de 4,5 a 35°C, com valores médios de, aproximadamente, 20°C. A amplitude de variação da temperatura foi maior no mês de setembro e menor em dezembro. Ocorreu um período seco de meados de setembro até final de novembro e um período chuvoso desde o começo de dezembro. Com relação à umidade relativa, observou-se variação de 12 a 99%.

Para o ano de 2000, a temperatura do ar oscilou de -4°C a 33°C. As menores temperaturas ocorreram no período de maio a agosto (inverno) e as maiores no verão (janeiro a março). As maiores amplitudes de variação de temperatura foram observadas durante o inverno. A precipitação diária variou de 0 (zero) a 37mm. Houve um período de estiagem de abril a agosto. Os maiores valores de precipitação ocorreram em meados do ano de 2000 (Fig. 32). Na Figura 28 observa-se a variação diária da umidade relativa para o ano de 2000, que oscilou de 18 a 100%. A média, indicada pela linha de tendência adicionada, foi de aproximadamente 80%. A pressão barométrica no local de estudo foi de 692 a 706mmHg (Fig. 35) sendo que os maiores valores ocorreram durante os meses de inverno.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 MODELAGEM

Foram adotadas as formas clássicas de equações e a utilização da computação para solução, calibração e simulação das equações encontradas. Esses métodos constituem os meios para avaliação dos parâmetros físicos inclusos nessas equações: equações diferenciais e modelo computacional de simulação.

Os dados foram coletados no período de setembro a dezembro de 1999 e de janeiro a outubro de 2000, perfazendo o total de 14 meses de coleta. Para o monitoramento do ciclo hidrológico, foram instalados: uma estação climatológica automática (*Campbell Scientific*), piezômetros, além de réguas, linígrafo na seção de saída da área de estudo para medição da lâmina d'água do ribeirão do Feijão e linígrafo na várzea, para medida da altura da lâmina d'água na várzea (Figs. 36 a 38).

Figura 36 – Foto da estação climatológica automática, em primeiro plano. Ao fundo, vista parcial da mata ciliar do ribeirão do Feijão e da várzea

Figura 37 – Vista parcial do local de estudo

Foram medidas sete variáveis com a estação climatológica automática: temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, precipitação e radiação solar. Nove piezômetros foram construídos para o monitoramento do lençol freático, quatro dos quais foram instalados no terraço (P1 a P4) e cinco na várzea da planície de inundação (P5 a P9), colocados utilizando-se um trado manual para profundidade de até 4 metros, a profundidades entre 3 e 4 metros no terraço e entre 1,5 e 2 metros na várzea. Os piezômetros consistem de tubos plásticos de 4 polegadas de diâmetro e filtros com mesmo diâmetro e perfurações de 0,5mm. A rede de 9 piezômetros foi instalada de forma a permitir a coleta de amostras de água para análise de qualidade de água e medição da flutuação do lençol freático. A altura da lâmina d'água nos piezômetros foi medida com uma trena, graduada em cm, no período de 22 a 27 de fevereiro e 10 a 27 de março de 2000.

Figura 38 – Foto do linígrafo instalado na margem direita do ribeirão do Feijão

Durante os dias de coleta foram medidos os dados de vazão na exutória (R12) do local de estudo, com o uso de molinete.

Foram coletados dados físicos e químicos da água em três amostragens realizadas nos meses de setembro, outubro e novembro do ano de 1999. As variáveis: pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica, foram medidas *in situ* com o multisensor HORIBA, modelo U-10. As análises de nutrientes (nitrito, nitrato, amônio, fósforo inorgânico, fósforo total dissolvido e ortossilicato) foram realizadas em laboratório, seguindo a metodologia de MACKERETH *et al.* (1978), com o uso de filtros WHATMAN GF/C para os nutrientes dissolvidos.

A partir dos dados de qualidade de água (pH, OD, condutividade elétrica, temperatura, nitrito, nitrato, amônio, fósforo inorgânico, fósforo total dissolvido e ortossilicato), hidrológicos (altura do lençol freático), climatológicos do local de estudo (temperatura do ar, umidade relativa, precipitação e radiação solar) e dados do CRHEA (Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada) (umidade relativa, radiação solar, precipitação e insolação) foi realizada Análise Multivariada dos Componentes Principais – ACP (matriz de correlação). Para a aplicação

desta, utilizou-se o método de KAISER (MANLY, 1986). O teste foi realizado com o auxílio do programa *Statistica for Windows – versão 5.5* (STATSOFT INC., 2000) licenciado para a Universidade Federal de São Carlos.

Quando do processo de validação do modelo foi utilizada a metodologia proposta por NETER & WASSERMAN (1974), para comparação de duas retas de regressão.

O processo de formulação com dados hidrológicos, meteorológicos, avaliação geomorfológica e de solos, tem dados oriundos de trabalhos de pesquisa já efetuados no ribeirão do Feijão ou próximos da área de estudo (SILVA-FILHO, 1998; SAMANEZ, 1998; FREITAS, 1996; CORRÊA, 1995; ANGELINI, 1995; SANTOS, 1993; TEIXEIRA, 1993 e RIOS, 1993) e dados levantados no decorrer do período de estudo. Os dados das Normais Climatológicas para a estação 83726 (São Carlos – SP) foram obtidos em DNMET (1992).

6.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO E PRECIPITAÇÃO

Para o cálculo de evapotranspiração foi utilizado o *software - REF-ET* (da Universidade de Idaho, EUA). A evapotranspiração de referência (ET_o) horária (mm.h^{-1}) foi calculada pelo método de PENMAN-MONTEITH com a parametrização proposta pela FAO-56 e ASCE, utilizando-se o *software REF-ET* da *University of Idaho* (REF-ET, 2002).

Para as medidas de evapotranspiração potencial foi empregado o método de PENMAN-MONTEITH, assim como no modelo de simulação foi utilizada esta mesma equação.

6.3 MEDIDAS DA VAZÃO LÍQUIDA

Este método é o recomendado pelo DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) para cálculo da vazão. O procedimento para cálculo da vazão do ribeirão do Feijão foi o seguinte:

- divide-se a seção transversal em 7 verticais;
- medem-se as profundidades de cada vertical a vau, utilizando-se uma régua graduada;
- medem-se as velocidades em cada vertical, utilizando-se um molinete fluviométrico de leitura direta. Devido à variação da velocidade na vertical, registra-se a velocidade em três pontos a 20, 60 e 80% da profundidade;
- a velocidade média, na vertical, é calculada usando-se a equação:

$$u_i = \frac{u_{0.2} + 2u_{0.6} + u_{0.8}}{4}$$

onde:

$u_{0.2}$, $u_{0.6}$ e $u_{0.8}$: velocidades médias a 20, 60 e 80% da profundidade, respectivamente;

u_i : velocidade média na vertical;

Determinadas as velocidades médias nas verticais e as profundidades correspondentes, procede-se aos cálculos das áreas compreendidas entre as verticais, considerando-se trapézios ou triângulos nos extremos. Em seguida, são determinadas as velocidades representativas de cada seção, a partir da média das velocidades achadas no passo anterior; obtém-se a vazão líquida somando-se os produtos das áreas das seções e as velocidades médias na seção.

$$Q = \sum_{j=1}^n A_j U_j$$

$$A_j = \left(\frac{d_i + d_{i-1}}{2} \right) (L_i + L_{i-1})$$

$$U_j = \frac{u_i + u_{i-1}}{2}$$

onde:

- Q vazão líquida na seção transversal;
- A_j área compreendida entre duas verticais;
- U_j velocidade média da seção j ;
- d_i profundidade da vertical i ;
- U_i velocidade média na vertical i ;
- L_i distância na vertical i .

7 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do ribeirão do Feijão está localizada na região Centro Norte do estado de São Paulo (47°40'- 47°55'W e 22°00'- 22°15'S) e é formada pelos municípios de Analândia, São Carlos e Itirapina, abrangendo uma área aproximada de 222,8km². O ribeirão do Feijão nasce na Serra do Cuscuzeiro, a 1030m de altitude, e banha o planalto de Itirapina, escoando no sentido NE para SW e de E para W, percorrendo aproximadamente, 21km até sua confluência com o Ribeirão do Lobo e divide os municípios de São Carlos e Itirapina (SILVA-FILHO, 1998) (Figs. 39 e 40).

Figura 39 – Localização da área de estudo, no estado de São Paulo

Figura 40 – Localização das instalações e pontos de amostragem na área de estudo e da região de contribuição

Características físicas da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão, de acordo com SILVA-FILHO (1998) e Rios (1993):

Área de drenagem total	227,00km ²
Perímetro(P)	73,60km
Comprimento dos rios (L) formadores da bacia.....	190,90km
Declividade do curso d'água principal (ribeirão do Feijão).....	0,00970m/m
Coefficiente de compacidade (Kc).....	1,38
Densidade de drenagem (Dd)	0,86km.km ⁻²
Altitude máxima.....	1.030m
Altitude mínima	660m

O coeficiente de compacidade (K_c) corresponde à relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo em área igual à da bacia. Segundo este coeficiente, quanto mais próximo da unidade estiver, maior será a tendência da bacia para enchentes.

Figura 41 – Modelo digital do terreno da área de estudo. A cor vermelha indica 725m e a cor verde escuro 755m (Método utilizado: filtro de médias 3x3; software IDRISI)

Para a área de estudo (microbacia de estudo) (Figura 41) os dados do ribeirão do Feijão são os que seguem:

Densidade hidrográfica	0,83nc/km
Relação de relevo	18,63m/km
Ordem de canais.....	4
Área total a montante do ponto de estudo	96,90 km ²

7.1 GEOLOGIA REGIONAL

A região de São Carlos localiza-se no contexto geológico da bacia do Paraná e o estado de São Paulo compreende duas unidades geotectônicas distintas; o Escudo Atlântico na porção sudeste e as coberturas sedimentar e vulcânica da bacia do Paraná, representadas pelos Grupos Paraná, Tubarão, Passa Dois, São Bento e Bauru (IPT, 1981). São Carlos está localizada na área de afloramento das formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (Grupo São Bento) e Grupo Bauru.

FORMAÇÃO BOTUCATU

A Formação Botucatu recobre a Formação Pirambóia e compreende, essencialmente, arenitos finos a médios, uniformes e foscos, com boa seleção e alta esfericidade (IPT, 1981). Estratificações cruzadas de porte médio a grande, com inclinação em torno de 30°, constituem a estrutura sedimentar dominante. Esta formação se estende por toda a bacia do Paraná. Todas as características dos sedimentos da Formação Botucatu sugerem um ambiente de sedimentação do tipo desértico (PETRI & FULFARO, 1988).

GRUPO BAURU

O Grupo Bauru recobre a Formação Serra Geral e, em muitos casos, expõe pacotes de arenitos, que podem atingir 250m de espessura. A unidade mais antiga deste grupo é a Formação Caiuá, composta por arenitos finos a médios, subarredondados, de coloração arroxeada (IPT, 1981). Segue-se a Formação Santo Anastácio, representada por arenitos finos a médios, mal selecionados e de coloração marrom avermelhada e, sobre esta formação, seguem-se a Formação Adamantina e a Formação Marília, descritas como sendo um pacote de arenitos grosseiros (IPT, 1981).

FORMAÇÃO SERRA GERAL

A Formação Serra Geral é composta por uma série de derrames de basaltos mostrando associações com intrusões marcadas principalmente por diques e *sills*. Pequenas lentes e camadas de arenitos podem intercalar-se nos derrames e o conjunto é conhecido como Formação Serra Geral (PETRI & FULFARO, 1988).

SEDIMENTOS CENOZÓICOS

Os materiais relacionados com o período Cenozóico originam-se dos materiais do Grupo Bauru e das Formações Serra Geral e Botucatu (SILVA-FILHO, 1998).

7.2 HIDROGEOLOGIA

O estado de São Paulo situa-se sobre um grande manancial de água subterrânea e este manancial tem aumentado sua importância na captação para abastecimento. Na região de São Carlos são três os sistemas encontrados; Aquífero Serra Geral, Bauru e Botucatu (FREITAS, 1996).

AQUÍFERO BAURU

Comporta-se como aquífero livre e possui área de aproximadamente 104.000km². FREITAS (1996) e ROCHA *et al.* (1982 *apud* SILVA, 1983) encontraram capacidade específica entre 5,5 a 1m³.h⁻¹.m⁻¹, podendo atingir no bombeamento valores da ordem de 2m³.h⁻¹.m⁻¹.

Segundo FREITAS (1996), os valores de transmissividade variam entre 3.10⁻³m².s⁻¹ e 6.10⁻⁴m².s⁻¹ na Formação Adamantina e valores maiores de cerca de 1.10⁻³m².s⁻¹ são mais freqüentes na Formação Santo Anastácio. A condutividade hidráulica também varia conforme a estratigrafia do pacote de arenitos do Grupo Bauru, sendo que na Formação Adamantina os valores variam de 1.10⁻⁶m².s⁻¹ a 3.10⁻⁶m².s⁻¹, enquanto nas Formações Santo Anastácio e Caiuá tais valores se situam na faixa de 3.10⁻⁶m².s⁻¹ a 1.10⁻⁵m².s⁻¹. Os gradientes hidráulicos nas cabeceiras das bacias variam de 8 a 10m.km⁻¹, enquanto à jusante oscilam entre 3 a 5m.km⁻¹.

7.3 GEOMORFOLOGIA

Na formação dos solos existem os fatores de formação: clima, material de origem, relevo, organismos e tempo. Esses fatores são os agentes geomorfológicos e, desses, dois são agentes ativos: o clima e os organismos. Pela sua atuação compõem-se as feições geomorfológicas associadas aos fatores litoestruturais e climáticos.

No estado de São Paulo, a geologia condicionou o desenvolvimento de uma compartimentação clássica de áreas cristalinas adjacentes a bacias sedimentares (IPT, 1981). A denudação de maciços antigos e a resistência dos derrames basálticos, levaram a moldagem de uma depressão periférica, sucedida por um relevo de *cuestas* e por um planalto a oeste do reverso das *cuestas* (FREITAS, 1996). São Carlos encontra-se na província geológica das *Cuestas* basálticas.

PEDOLOGIA

Na bacia do ribeirão Feijão, ocorrem os seguintes tipos de solos: Latossolos (Vermelho-Escuros, Roxos, Vermelho-Amarelos), Nitossolos, Neossolos e Plintossolos, de acordo com a Classificação Brasileira de Solos. Os solos situam-se em relevo ondulado com declividades variáveis e se desenvolvem a partir de alteração e desagregação de basaltos, diabásios, arenitos e sedimentos modernos. São solos tipicamente de cerrado (SILVA-FILHO, 1998), com pH ácido, elevados teores de alumínio trocável, deficientes em matéria orgânica e, na maioria dos elementos, essenciais às plantas.

Na região de estudo, os solos encontrados são: Latossolos (Vermelho-Amarelo, Vermelho-Escuro), Neossolos e Plintossolos. Na várzea em estudo ocorrem somente os Neossolos (hidromórficos), que são formados pela deposição de sedimentos coluviais e aluviais, ricos em matéria orgânica. Seguindo as limitações impostas pelo material de origem, esses solos são pobres em nutrientes e ácidos. Predominantemente, existem os Latossolos (Vermelho-Amarelo) e Neossolos. Os outros têm presença pouco significativa.

7.4 VÁRZEA DE ESTUDO

A área de contribuição para o local de estudo é uniformemente constituída de pastagem, em que predominam as gramíneas (*Brachiaria* sp) e, na várzea, existem predominantemente ciperáceas e também gramíneas cobrindo por completo o solo todo o ano. Sendo assim, considera-se que, quando não se infiltra, a água pluvial escorre imediatamente pela superfície sem o carreamento de quantidade significativa de sedimentos. Na várzea há

presença de locais onde ocorrem pequenas lagoas devido ao diferente grau de permeabilidade dos variados estratos existentes na área.

Durante o pulso de cheia ocorre o alagamento de parte da várzea. Durante a época de verão, com a água que escorre superficialmente não se dá a formação de canais dentro da várzea. Através das medidas de precipitação pluvial e altura da lâmina d'água na seção de saída da área de estudo, foi estimado o tempo de concentração para a bacia do ribeirão Feijão.

8. CONCLUSÕES

Nas amostragens de qualidade de água efetuadas na várzea, ficaram evidentes os processos químicos, ocorrendo de maneira diferente no ribeirão do Feijão e, também, no terraço. Apesar de se constatar essa diferença, a possibilidade de quantificação dos processos somente será possível a partir de estudos realizados com intervalos de tempo menores e dentro do estrato onde ocorre a flutuação do lençol freático.

A vazão base foi de aproximadamente $1,5\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ durante todo o tempo de realização dos estudos.

O tempo de concentração foi de até 24h para a exutória do local de estudo.

O modelo de simulação gerou resultados que se aproximaram dos fenômenos que ocorreram na várzea.

As retas de regressão calculadas pela variação de altura da lâmina d'água (dados medidos diretamente) e calculados pelo modelo de simulação, demonstraram que têm mesma variação, isto é, são iguais quando comparadas pelo método estatístico, a nível de 95% de confiança.

A camada, onde ocorrem as reações químicas que caracterizam especialmente a várzea, têm espessura de aproximadamente 30cm.

Todo o escoamento superficial do terraço se infiltrou na várzea.

A bacia do ribeirão do Feijão e suas várzeas, que têm importante papel para a manutenção do equilíbrio natural da qualidade de água, devem ser monitoradas e preservadas para a conservação do manancial que abastece a cidade de São Carlos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Viabilidade da irrigação, sob risco climático e econômico, nas microrregiões de Teresina e litoral piauiense.** Piracicaba : Universidade de São Paulo, 2000. 586 p. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz" – Universidade de São Paulo.
- ANGELINI, R. **Análise do ecossistema da represa do Broa (SP), através de um modelo estático (ECOPATH II) e de um modelo de simulação (STELLA II).** São Carlos : Universidade de São Paulo, 1995. 111 p Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- BAKKER, S. A. Spatial and dynamic modelling: describing the terrestrialization of fen ecosystems. In: MITSCH, W. J. **Global Wetlands: Old World and New.** Amsterdam : Elsevier, 1994. pp. 555-561.
- BEERS, W. F. J. van. Suelos e propiedades del suelo. In: ULZURRUM, M. D. D. & CASTILLO, F. E. **Principios y aplicaciones del drenaje.** Wageningen : ILRI. 1978. pp. 35-98.
- BRADLEY, C. Transient modelling of water-table variation in a floodplain wetland, Narborough Bog, Leicestershire. **Journal of Hydrology** 185: 87-114. 1996.
- CAMARGO, A. P.; PINTO, H. S.; BRUMINI, O.; PEDRO-JUNIOR, M. J.; ORTOLONI, A. A.; ALFONSI, R. R. **Zoneamento agrícola do Estado de São Paulo**

– **Clima do Estado de São Paulo.** Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo : São Paulo. Vol I. 1974.

CHAPRA, S. C. **Surface water-quality modeling.** New York : McGraw-Hill. 1997. 844 p.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Art. 70, inciso IX, do decreto 88.351, de 10 de junho de 1983, Resolução/Conama/nº 003, de 05 de junho de 1984. **Classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional, de acordo com a Resolução nº 20, de 18 de junho de 1986** (Diário Oficial , seção 1, 30/07/1986, p. 11356 – 11360)

CORRÊA, U. M. P. **Estudos das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no estado de São Paulo.** São Carlos : Universidade de São Paulo, 1996. 107 p. Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

DNMET. **Normais climatológicas 1961 – 1990.** Dnmet : Brasília. 1992. 84 p.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia.** Rio de Janeiro: Interciência/FINEP. 1988. 575p.

FORSYTHE, W. **Física de suelos.** Manual de laboratório. IICA. San José, Costa Rica. 1985. 211 p.

FREITAS, A. L. S. **Caracterização do aquífero Botucatu na região do lixão de São Carlos.** São Carlos : Universidade de São Paulo, 1996. 113 p. Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

GOLDMAN, C. R.; HORNE, A. J. **Limnology.** New York : McGraw Hill, 1983.

HAMMER, D. E.; KADLEC, R. H. A model for wetland surface water dynamics. **Water Resources Research** 22(13): 1951-1958. 1986.

HPS – INC. High Performance Systems, Inc.. **Stella Software versão 7.01**. Hanover, NH. 2001.

INPE – CPTEC 2000. **Climanálise**. <<http://www.inpe.br>>. Consultado em março de 1999.

IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Mapa geológico do Estado de São Paulo – Escala 1:500.000**. Volume 1; Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). 1981.

JØRGENSEN, S. E. A general model of nitrogen removal by wetlands. *In*: MITSCH, W. J. *et al* (eds.). **Global Wetlands: Old World and New**. Amsterdam : Elsevier. 1994. p.575-583.

JØRGENSEN, S. E. **Fundamentals of ecological modelling**. Amsterdam : Elsevier, 1994. 628 p.

JØRGENSEN, S. E. State-of-the-art of ecological modelling with emphasis on development of structural dynamic models. **Ecological Modelling** 120 : 75-96. 1999.

JUNK, W. J. ; BAYLEY, P. B. ; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river floodplain systems. **Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.**, 106:110-127. 1989.

KADLEC, R. H. An autotrophic wetland phosphorus model. **Ecological Modelling** 8 : 145-172. 1997.

- KLAMT, E. Características, distribuição e aptidão dos solos de várzeas do Brasil. **Resumos do XXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Porto Alegre : SBCS. p. 54. 1991.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba : o autor. 1995. 497 p.
- MACKRETH, F. J. H.; HERON, J.; TALLING, F. J. **Water analysis: some revised methods for limnologists**. Freshwater Biological Association Scientific Publication nº36. Kendall. Titus Wilson & sons LTD. 1978.
- MANLY, B. F. J. **Multivariate statistical methods**. London : Chapman & Hall, 1986. 215p.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **A three dimensional finite difference ground water flow model**. U. S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. V. 6, cap A1. 586p. 1988.
- MCKILLOP, R.; KOUWEN, N.; SOULIS, E. D. Modeling the rainfall-runoff response of a headwater wetland. **Water Resources Research** 35(4): 1165-1177. 1999.
- MITSCH et al 1988
- MITSCH, W. J. ; GOSSELINK, J. G. **Wetlands**. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993. 722 p.
- NAIMING, W.; MITSCH, W. J. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands. **Ecological Modelling** 126:101-130. 2000.
- NARASIMHAN, T. N. Models and modeling of hydrogeologic processes. **Soil Science Society of America Journal** 59:300-306. 1995.

NETER, J; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. Homewood, Illinois: Richard D. Irwin, Inc. 842p. 1974.

PAIVANEM 1982

PATTEN, B. C. Ecological systems engineering: toward integrated management of natural and human complexity in the ecosphere. **Ecological Modelling** 75/76: 653-665. 1994.

VAN DER PEIJL, M. J.; VERHOEVEN, J. T. A. A model of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics and their interaction in river marginal wetlands. **Ecological Modelling** 118 : 95-130. 1999.

PETRI, S.; FULFARO, V. **Geologia do Brasil (Fanerozóico)**. 1^a Edição. EDUSP : São Paulo. 1983.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science** 84:257-264. 1957.

PRADO, H; OLIVEIRA, J. B; ALMEIDA, C. L. F. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de São Carlos. I Carta de solos**. Instituto Agronômico de Campinas, mapa. Escala 1:100.000. 1981

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Mon. Weather Review** 100:81-92. 1972.

REF-ET (2000): reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. Version 2.0 for Windows. University of Idaho.

- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema Solo-Planta-Atmosfera**. Campinas : Fundação Cargill. 1985. 466p.
- RICHMOND, B. **An introduction to systems thinking**. Hanover, Estados Unidos. HPS, Inc, 2001. p. 165.
- RIDDER, N. A. De. Hidrogeologia de los diferentes tipos de zonas llanas. *In*: ULZURRUN, D. D.; CASTILLO, F.E. **Principios y aplicaciones del drenaje**. Wageningen, Holanda. ILRI, 1978. v.1. p.1-33.
- RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 1998. 840 p.
- RIOS, L. **Estudo limnológico e fatores ecológicos em ribeirões e córregos da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão (Estado de São Paulo)**. São Carlos : Universidade de São Paulo, 1993. 146 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo
- SALASSIER, B. **Manual de irrigação**. Viçosa : Editora UFV. 1995. 657 p.
- SAMANEZ, S. V. G. **Estudo da aplicabilidade de métodos de estimativa de transporte de sedimentos em rios pequenos**. São Carlos : Universidade de São Paulo, 1998. 235 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- SANTOS, M. F. **Subsídios para o planejamento conservacionista da bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão (São Carlos, Itirapina e Analândia, SP)**. São Carlos : Universidade de São Paulo, 1993. 222 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília : ABEAS, 1987. 143 p. (Curso de Engenharia da Irrigação Módulo 4)

SETZER, J. **Os solos do Estado de São Paulo**. IBGE : Rio de Janeiro. 1949. 337p.

SILVA, K. A.; RIGUETTO, A. M. **Variabilidade Espacial da Precipitação e de Parâmetros hidrológicos na Bacia Urbana do Córrego do Gregório em São Carlos, SP - Levantamentos Experimentais**. Resumos da Reunião Final - REHIDRO/RECOPE/FINEP. Vitória : FINEP. 2002. p. 8.

SILVA, L. C.; BELTRÃO, N. E. M; AMORIM NETO, M. S. **Análise do crescimento de comunidades vegetais**. Campina Grande : Embrapa – CNPA. Circular Técnica 34. 2000. 46 p.

SILVA, R. B. G. **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no estado de São Paulo**. São Paulo : Universidade de São Paulo, 1983. Tese (doutoramento) - Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo

SILVA-FILHO, J. P. **Caracterização abiótica do ribeirão do Feijão, considerando-se dois regimes hidrológicos, chuva e seca (São Carlos – SP)**. São Carlos : Universidade de São Paulo, 1998. 167 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos– Universidade de São Paulo.

SINGH, V. P. **Environmental hidrology**. Dordrecht, The Netherlands : Kluwer Academic Publishers. 1995. 479p.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B. ; VILAR, D. M. **Ensaio de laboratório em mecânica dos solos**. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1981.

STATSOFT, INC (2000). Statistica versão 5.05 para Windows. *Serial Number*: AX006A736501FA.

STRASKRABA, M. Models for reservoirs, lakes and wetlands. *In*: NOVOTNY, V. ; SOMLYODY. **Remediation and management of Degraded River Basins**. Berlin : Springer-Verlag, 1995. v.3. p. 73-155.

TEIXEIRA, D. **Caracterização limnológica dos sistemas lóticos e variação temporal e espacial de invertebrados bentônicos na bacia do ribeirão Feijão (São Carlos – SP)**. São Carlos : Universidade de São Paulo, 1993. 193 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos– Universidade de São Paulo.

TOLENTINO, M. **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos**. Concurso de monografias Municipais, São Carlos, 1967. 78p.

TROUT, T. J. *et al.* **Soil-water engineering. Field and laboratory manual**. Department of Agricultural and Chemical Engineering. Colorado State University. 1982. p. 193.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS. SERVIÇO DE BIBLIOTECA. **Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP**. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca, 1996. 64 p.

VILLELA, P. R. C. **Modelagem e simulação da dinâmica de sistemas: conceito e prática**. II Workshop da SBI Agro. Campinas. 2000

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo : McGraw-Hill. 1984. 245p.

VOINOV, A. **Simulation modeling, online course**. <<http://iee.umces.edu/av/edu/online>> Consultado em outubro de 2001.

VOINOV, A. A.; VOINOV, H.; CONSTANZA, R. Surface water flow in landscape models: Patuxent watershed case study. **Ecological Modelling**, 119: 211-230. 1999.

WANG, N.; MITSCH, W. J. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands. **Ecological Modelling**. 126:101-130. 2000.

ANEXOS

Tabela 3 – Equações utilizadas no Modelo de Simulação e esclarecimentos.

INSATURADA(t) = INSATURADA(t - dt) + (prec_para_INS + SAT_para_INS - INS_SAT_troca - INS_transp) * dt
INIT INSATURADA = ic_INS

DOCUMENTO: A coluna d'água da zona insaturada está entre o topo do nível do lençol freático e a superfície do sedimento. A quantidade de água seria obtida se fosse espremida a água existente nessa camada do solo.

Unidade = m * adimensional = m

prec_para_INS = if inf_cond>0 then Infiltração<0 else 0

SAT_para_INS = max(0, min(-INS_delta*C_cap_campo, SAT/DT))

DOCUMENTO: O fluxo reverso da camada saturada para a camada insaturada devido ao rebaixamento do lençol freático, deixando o solo em capacidade de campo. Se a profundidade da camada insaturada for maior que a da camada saturada, então o nível da camada saturada diminuirá, portanto, se a INS_prof agora é maior que a INS_prof um dt atrás; então, a altura da camada SAT decresceu; portanto a água oriunda da capacidade de campo (INS_agora-INS_depois) entrou na camada insaturada.

INS_SAT_troca = {1} IF (inf_cond = 0) THEN INSATURADA/DT ELSE

{2} MAX(0, INS_delta*INS_umidade_prp) + {3} INS_taxa_perc

DOCUMENTO: O primeiro termo {1} descreve as condições quando toda a camada insaturada está tomada por água (de infiltração) e, como resultado, a totalidade da capacidade de armazenamento da camada insaturada move-se para a camada "caixa" Saturada. O segundo termo {2} é a água adicionada à camada saturada, vindo da camada insaturada, quando sobe o nível da água. O terceiro termo é o fluxo de percolação. Varia com a alteração da altura da lâmina d'água e também com a umidade do solo na "caixa" da zona insaturada.

m/d+m/d = m/d

INS_transp = Transpira<0 *INS_trans_pr+Evap_INS

DOCUMENTO: As perdas por transpiração são divididas entre a zona saturada e a insaturada; as perdas da zona saturada podem ocorrer quando as raízes não atingem a água do lençol freático, devido à ação capilar.

Unidade = adimensional*m/d * função adimensional = m/d

SATURADA(t) = SATURADA(t - dt) + (INS_SAT_troca + perc_SAT_para_INS + prec_para_SAT - recarga_SAT - transpiração<0_SAT - fluxo_SAT_para_SUP - saída_SAT - SAT_para_INS) * dt

INIT SATURADA = ic_SAT

DOCUMENTO: Coluna d'água da zona saturada. Esta seria a quantidade real de água retirada do solo se fosse possível comprimi-lo. O nível de água (lençol freático) é a água saturada dividido pela porosidade.

Unidade =m

INS_SAT_troca = {1} IF (inf_cond = 0) THEN INSATURADA/DT ELSE

{2} MAX(0, INS_delta*INS_umidade_prp) + {3} INS_taxa_perc

DOCUMENTO: O primeiro termo {1} descreve as condições quando toda a camada insaturada está tomada por água (de infiltração) e, como resultado, a totalidade da capacidade de armazenamento da camada insaturada move-se para a camada "caixa" Saturada. O segundo termo {2} é a água adicionada à camada saturada, vindo da camada insaturada, quando sobe o nível da água. O terceiro termo é o fluxo de percolação. Varia com a alteração da altura da lâmina d'água e também com a umidade do solo na "caixa" da zona insaturada.

m/d+m/d = m/d

perc_SAT_para_INS = if (Habitat_ = 1 or (INS_prof_antes = 0 and INS_cap>0)) then MIN (INS_cap, SUPERFICIE_/DT) else 0

DOCUMENTO: Se não existia camada insaturada antes, agora existe; considera-se, então, que aparece por causa da transpiração e do fluxo horizontal. Toda a camada insaturada será preenchida e a água saturada atingirá a superfície se houver suficiente água superficial. Considera-se que o fluxo vertical da superfície para a camada saturada é pelo menos tão rápido quanto o fluxo de água do aquífero mais as perdas por transpiração (m/dia)

$prec_para_SAT = if\ inf_cond=0\ then\ INS_cap-perc_SAT_para_INS\ else\ 0$

DOCUMENTO: Se existe mais água a ser infiltrada do que a capacidade da zona insaturada ($inf_cond, 0$), a zona insaturada é eliminada e toda a capacidade da camada insaturada é preenchida. A água, nesse caso, vai diretamente para o estoque saturado.

$recarga_SAT = C_recarga$

DOCUMENTO: Movimento para aquífero.

unidade = m/d

$transpiração<0_SAT = Transpiração<0 * (1-INS_trans_pr)$

DOCUMENTO: Perda por transpiração decresce exponencialmente se a zona insaturada aumenta abaixo da zona das raízes (e assim, reduzindo rapidamente a zona saturada abaixo da profundidade das raízes).

Unidade = adimensional*m/d * função adimensional = m/d

$fluxo_SAT_para_SUP = IF\ (SATURADA > SAT_Max)\ THEN\ SATURADA-SAT_Max$

$ELSE\ IF\ (SATURADA > Runoff_para_SUP)\ THEN$

$C_sinuos*(SATURADA - Runoff_para_SUP)*Condu_Hidr$

$ELSE\ 0$

DOCUMENTO: Quando a capacidade total de armazenamento do solo é excedida pela água da camada saturada, esse excesso é drenado por superfície (água de superfície). Mesmo antes do nível de água exceder a elevação mínima representando a elevação nos córregos e ravinas, parte da água saturada corre para o "armazém" de superfície.

$saida_SAT = C_SAT_Out*(SATURADA-ic_SAT)$

DOCUMENTO: Movimento horizontal de água saturada. Considera-se que a água saturada tende à condição inicial.

$SAT_para_INS = max(0,min(-INS_delta*C_cap_campo,SATURADA/DT))$

DOCUMENTO: O fluxo reverso da camada saturada para a camada insaturada, devido ao rebaixamento do lençol freático, deixando o solo em capacidade de campo. Se a profundidade da camada insaturada for maior que a da camada saturada, então o nível da camada saturada diminui; portanto, se a INS_prof agora é maior que a INS_prof um dt atrás, então a altura da camada SAT decresceu; portanto, a água oriunda da capacidade de campo ($INS_agora-INS_depois$) entrou na camada insaturada.

$SUPERFICIE_t = SUPERFICIE_t - dt + (Prec_para_SUP +$

$fluxo_SAT_para_SUP - SUP_evap - perc_SAT_para_INS - saida_SUP) * dt$

$INIT\ SUPERFICIE_ = C_SUP_prof$

DOCUMENTO: Nível (m) da água acima da superfície dos sedimentos. Na realidade, é a água nos rios e depressões, porque se considera que não deve haver água acima da camada insaturada. Uma lâmina d'água aparecerá quando o solo estiver saturado.

$Prec_para_SUP = Precip_Liq-prec_para_INS-prec_para_SAT$

DOCUMENTO: Chuva vai para camada insaturada. Apenas o excesso transforma-se em escoamento superficial.

m

$fluxo_SAT_para_SUP = IF\ (SATURADA > SAT_Max)\ THEN\ SATURADA-SAT_Max$

$ELSE\ IF\ (SATURADA > Runoff_para_SUP)\ THEN$

$C_sinuos*(SATURADA - Runoff_para_SUP)*Condu_Hidr$

$ELSE\ 0$

DOCUMENTO: Quando a capacidade total de armazenamento do solo é excedida pela água da camada saturada, esse excesso é drenado por superfície (água de superfície). Mesmo antes do nível de água exceder a elevação mínima representando a elevação nos córregos e ravinas, parte da água saturada corre para o "armazém" de superfície.

$SUP_evap = MIN (Max (Evaporação < 0, 0), SUPERFICIE_ /DT)$

DOCUMENTO: Água evaporada.

Unidade=m/d

$perc_SAT_para_INS = if (Habitat_ = 1 or (INS_prof_antes = 0 and INS_cap > 0)) then MIN (INS_cap, SUPERFICIE_ /DT) else 0$

DOCUMENTO: Se não existia camada insaturada antes, agora existe e se considera que aparece por causa da transpiração e do fluxo horizontal. Toda a camada insaturada será preenchida e a água saturada atingirá a superfície se houver suficiente água superficial. Considera-se que o fluxo vertical da superfície para a camada saturada é pelo menos tão rápido quanto o fluxo de água do aquífero mais as perdas por transpiração (m/dia)

$saida_SUP = C_saida_SUP * SUPERFICIE_ /dt$

DOCUMENTO: Considera-se que toda água superficial é removida para jusante da área.

Unidade m/d

$A = 720.52 - 6.68 * C_LatGraus$

DOCUMENTO: A e B são parâmetros empíricos que definem os valores máximos e mínimos de radiação solar:

$A = (max + min) / 2; B = (max - min) / 2$

$amp1 = EXP(7.42 + 0.045 * C_LatGraus) / 3600$

DOCUMENTO: $(*1.16666667) * PI / 180$

$B = 105.94 * (C_LatGraus - 17.48) ^{0.27}$

DOCUMENTO: A e B são parâmetros empíricos que definem os valores máximos e mínimos de radiação solar:

$A = (max + min) / 2; B = (max - min) / 2$

$C = 175 - 3.6 * C_LatGraus$

DOCUMENTO: Fator de correção para os valores entre min e max.

$Condut_Hidr = C_cond_hidr_horiz / SQRT(Tamanho_cel) + Solo * 0.0$

DOCUMENTO: Condutividade hidráulica horizontal é função do mapa de solos.

$Conver_para_m = 0.01$

DOCUMENTO: Fator de conversão de mm para m/dia

$Cota = if Prof_MSL_map > 0 then Datum_para_MSL - Prof_MSL_map else Datum_para_MSL + Elev_MSL_mapa$

DOCUMENTO: Se houver superfície abaixo do MSL, usar dados batimétricos para determinar a elevação dos sedimentos acima da cota base.

OUTROS usar os dados de elevação acima do MSL (indicando distância do MSL da superfície do solo) mais a distância da cota base para o MSL (altura ao nível do mar)

TODOS OS VALORES SÃO POSITIVOS (m) acima da cota base.

$Cota_min = if Habitat_ = 1 then Cota else$

$if (Elev_MSL_mapa > 2 * C_sup_delta) then Cota - C_sup_delta$

$else Cota - Elev_MSL_mapa / 2.$

DOCUMENTO: Elevação mínima da superfície da célula utilizada para calcular a profundidade média de ravinas e depressões que possuem riachos. Assegura uma troca adequada entre a camada saturada e a superfície do sistema de drenagem. Nessas áreas com elevação menor que $2 * C_sup_delta$, a elevação mínima fica próxima da Altura da Cota e igual à Cota se a Cota = 0.

Pode ser utilizado um mapa.

$Cota_SAT = SATURADA / C_porosidade$

DOCUMENTO: Altura atual do lençol freático (m poros = m água da camada saturada, portanto m água/m água/m espaço = m espaço).

$D = Es - Press_vap / 1000$

DOCUMENTO: Deficit da pressão de vapor.

/1000 para converter a pressão de vapor de Pa para kPa

$\delta = 4098 * Es / (237.3 + Temp_ar_C) / (237.3 + Temp_ar_C)$

DOCUMENTO: Gradiente de pressão de saturação da água.

kPa/oC2

É uma derivada de Es

$Dia = mod(time - DT, 365) + 1$

DOCUMENTO: Calendário gregoriano, de 1 até 365

$Disp_agua = min(1.0, INS_capil_exp + (if$
 $INS_umidade_prp < 0.1 * C_cap_campo \text{ then } 0 \text{ else if}$
 $INS_umidade_prp > 0.6 * C_cap_campo \text{ then } 1 \text{ else } (INS_umidade_prp -$
 $0.1 * C_cap_campo) / 0.5 / C_cap_campo))$

DOCUMENTO: Disponibilidade de água ao sistema radicular da planta. Se a profundidade das raízes for > que a profundidade da camada insaturada, o valor de retorno será 1.0 (adimensional). Se a zona insaturada estiver abaixo da profundidade da zona radicular, o valor retorna a porcentagem de umidade MAIS uma proporção de decréscimo exponencial da zona saturada. Portanto, a água pode estar totalmente disponível, mesmo se a zona insaturada tiver 85% de água disponível devido a adição de água, por efeito da capilaridade da zona saturada.

Todavia, a disponibilidade de água está definida pela proporção da umidade, do ponto de murcha (assumido como 0.1 da capacidade de campo) e do ponto de murcha permanente (assumido como 0.6 da capacidade de campo).

$Energia = RadSolAtm / 23.9 * (0.25 + 0.5 * (10 - Nebulosidade) / 10) - (0.9 * (10 -$
 $Nebulosidade) / 10 + 0.1) * (0.34 - 0.14 * sqrt(Press_vap)) * 4.903 * 10^4 * (-$
 $9) * Temp_ar_C^4$

DOCUMENTO: Fluxo de radiação líquida.

Estimativa baseada na radiação solar no topo da atmosfera.

MJ/m2/dia = 23.9 cal/cm2/dia

$RadSolAtm / 23.9$

MJ/m2/day / lambda = mm/dia

$Es = 0.6108 * exp(17.27 * Temp_ar_C / (237.3 + Temp_ar_C))$

DOCUMENTO: Pressão de saturação de vapor

kPa

ET_{pm}

$(\delta * Energia + 1.013 * r_o * D / r_A) / (\delta + \gamma * (1 + r_S / r_A)) / \lambda / 1000$ =

DOCUMENTO: Equação de Penman-Monteith para evapotranspiração.

m = mm/1000

$(\delta * Energia + 1.013 * r_o * D / r_A) / (\delta + \gamma * (1 + r_S / r_A)) / \lambda / 1000$

$Evapora\<0 = C_evap * SolRadGr / 585 * pan_Cvent * pan_CTemp * pan_CUMid$

DOCUMENTO: Potencial de evaporação calculado empiricamente, derivado de Christiansen (1968).

Unidade= adimensional* (cal/cm2/d) / 585 cal/g * adimensional(0-1) * adimensional(0-1) * adimensional(0-1) * m/cm = m/dia

$Evap_INS = C_INS_evap * Evapora\<0 * INS_mp_r$

DOCUMENTO: Quando MacLAI é menor que 1, então sempre certa fração de terra não será coberta por vegetação e haverá evaporação de água pelos poros.

Fotoperiodo = $\text{ampl} * \cos((\text{Dia} - 79) * 0.01721) + 12$

DOCUMENTO: Fotoperíodo em horas

$\gamma = 0.0016286 * P / \lambda$

DOCUMENTO: Constante psicrométrica

kPa/°C valor muito pequeno, a dependência de P é desprezível.

Habitat_ = 3

DOCUMENTO: Índices de Habitat:

3 = milho

2 = floresta

1 = água aberta

outro não definido

$\text{ic_INS} = \text{if } \text{Cota} > \text{Nivel_água} \text{ then } (\text{Cota} - \text{Nivel_água}) * \text{C_INS_umidade_pr}$
else 0

$\text{ic_SAT} = \text{Nivel_água} * \text{C_porosidade}$

$\text{Infiltração} = \min(\text{Pot_Infiltr}, \text{Precip_Liq})$

DOCUMENTO: Fluxo de água potencial da precipitação para a camada insaturada.

É função dos solos, do tipo de habitat e declividade.

(m/d)

$\text{inf_cond} = \text{IF } \text{perc_SAT_para_INS} = \text{INS_cap} \text{ THEN } 0 \text{ ELSE}$

$\text{max}(\text{INS_cap} - \text{Infiltração} * \text{DT}, 0)$

DOCUMENTO: Condição para infiltração regular:

> 0 - quando a infiltração está de acordo com parâmetro Inf. ;

0 - quando há mais água a ser infiltrada que capacidade de armazenamento de água na camada INSATURADA. Nesse caso, a camada INSATURADA tornar-se-á SATURADA e todo o excesso de água será transformado em AGUA SUPERFICIAL.

$\text{INS_cap} = \text{MAX}(\text{INS_prof} * (\text{C_porosidade} - \text{INS_umidade_prp}), 0)$

DOCUMENTO: A umidade do solo ocupando poros para determinado nível de água, a máxima umidade armazenada possível na zona definida como insaturada menos a umidade disponível na zona insaturada. (A máxima umidade - 100%, a zona será definida como saturada).

unidade m (poros total) - m (poros com água) = m (poros vazios)

$\text{INS_capil_exp} = \exp(-10 * \text{max}(\text{INS_prof} - \text{Prof_raízes}, 0))$

DOCUMENTO: Pequena adição contabilizada para a possível sucção de água para a água armazenada como água capilar onde há raízes próximas da profundidade máxima da camada insaturada.

Se as raízes atingem a camada saturada, não haverá água saindo da camada insaturada.

$\text{INS_delta} = \text{INS_prof_antes} - \text{INS_prof}$

DOCUMENTO: Variação na profundidade da Camada INSATURADA. Delta > 0 quando houver elevação da lâmina d'água, Delta < 0 quando houver rebaixamento da lâmina d'água.

(m)

$\text{INS_excesso} = \text{MAX}(0, \text{INS_umidade_prp} - \text{C_cap_campo})$

DOCUMENTO: Influência da proporção da umidade na taxa de condutividade hidráulica.

Multiplicador adimensional da taxa de condutividade hidráulica da camada saturada.

Efetivamente, o gráfico estaciona a percolação quando $\text{INS}/\text{prof_INS} < \text{Capacidade de campo}$

F_Cap é a proporção do volume total do solo. Poros - é a proporção de poros. Portanto, $F_Cap \leq \text{prop_umidade} \leq \text{Poros}$. Prop_umidade pode tornar-se menor que F_Cap devido à transpiração, mas não devido à percolação.

$INS_mp_r = INS_umidade_prp / C_porosidade$

DOCUMENTO: Proporção relativa da umidade de água insaturada.

$INS_prof = \text{MAX}(Cota - Cota_SAT, 0)$

DOCUMENTO: Profundidade (m) da camada insaturada.

$INS_prof_antes = \text{delay}(INS_prof, DT)$

DOCUMENTO: Profundidade da camada INSATURADA no tempo imediatamente anterior. Utilizado para definir se a lâmina d'água está se elevando ou decrescendo.

$INS_taxa_perc = 2 * C_cond_hidr_vert * C_porosidade * INS_excesso^{0.4} / ((C_porosidade - C_cap_campo)^{0.4} + INS_excesso^{0.4})$

DOCUMENTO: Taxa potencial de percolação da camada Insaturada para a camada Saturada. A condutividade hidráulica da camada insaturada varia de acordo com a umidade do solo. No gráfico foram usados limites de percolação de água disponível por gravidade (=acima da capacidade de campo). Influência da porcentagem de umidade na taxa de condutividade hidráulica. Multiplicador adimensional da taxa de condutividade hidráulica da camada saturada.

Gráfico para a percolação, quando:

$INS/ins_prof < \text{Capacidade_de_Campo}$

Capacidade de campo é proporção do volume total de solo. Poros - é a proporção de poros. Portanto, $F_Cap \leq \text{Prop_poros} \leq \text{Poros}$.

Prop_umidade pode ser menor que a Capacidade de Campo por causa da transpiração e não devido à percolação.

Multiplicado pela porosidade, porque se considera a condutividade vertical pela medida em m da elevação (altura) e não pelo conteúdo de água da camada insaturada.

Taxa máxima de percolação * redução da camada insaturada

m/d * adimensional = m/d

$INS_trans_pr = \text{if } Prof_raízes + 0.1 < INS_prof \text{ then } 1 \text{ else}$

$\text{if } INS_prof > 0 \text{ then}$

$Disp_agua * (INS_prof / (Prof_raízes + INS_capil_exp))$

$\text{else } 0$

DOCUMENTO: Fração da transpiração que ocorre da camada insaturada

0.1 considera-se que seja o limite da profundidade após a qual a ação capilar possa ser negligenciada.

Assim que se atinge a zona <0.1 ocorre um aumento na água sugada da zona saturada.

$INS_umidade_prp = \text{if } (INS_prof > 0) \text{ then } INSATURADA / INS_prof$

$\text{else } 0$

DOCUMENTO: Proporção de água na camada armazenada na zona insaturada. =0 quando o reservatório INS está vazio. Cresce quando os poros da camada INS são preenchidos.

Utilizado para calcular a condutividade hidráulica como função do nível de saturação.

Intercept

=

$\text{min}(Precipitação,$

$\text{max}(C_Intercep * Precipitação, C_IntercepVeg))$

DOCUMENTO: Interceptação da precipitação pela vegetação. (m)

O valor interceptado é função de LAI.

$\lambda = 2.501 - 0.002361 * (Temp_ar_C - 3)$

DOCUMENTO: Calor latente de vaporização da água.

MJ/kg

Ao invés da temperatura do ar, pode ser utilizada a temperatura da superfície da água.

Considera-se que a temperatura da água é 3 graus menor que a temperatura do ar.

Considera-se como uma constante.

MacLAI = 4

Mapa = 1

Nebulosidade = if Precip_m>0 then max(0,10-1.155*(Press_vap/(Precip_m*1000*30))^0.5) else 0

DOCUMENTO: Nebulosidade diária (dezenas)

Nota: quando usada na equação, compele a valores negativos para = 0

Precipitação nessa equação é a precipitação total mensal em mm.

Equação é:

se Precipitação>0 então 10-1.155*(pressao_vapor/Precipitação)^0.5 else 0
(Vale zero na simulação)

Nivel_água = C_nivel_agua+Datum_para_MSL

P = 101.3

DOCUMENTO: 1atm = 760 mm = 1.013*10² kPa

Pode ser assumido como uma constante devido à baixa sensibilidade do modelo a esse parâmetro.

pan_CTemp = 0.463+0.425*(Temp_ar_C/20)+0.112*(Temp_ar_C/20)^2

DOCUMENTO: Componente Temperatura: fórmula de evaporação.

Temperatura relativa ao padrão - 20 graus C.

pan_CUmid = 1.035+0.240*(Umidade/60)^2-0.275*(Umidade/60)^3

DOCUMENTO: Componente umidade: fórmula de evaporação.

umidade relativa ao padrão - 60%.

pan_CVent = 0.672+0.406*(Vento/6.7)+0.078*(Vento/6.7)^2

DOCUMENTO: Componente Vento: formula evaporação.

Velocidade do vento relativa ao padrão - 6.7 km/h.

Porosidade = C_porosidade+Solo*0.0

DOCUMENTO: Porosidade

Pot_Infiltr = C_Infilt*C_Inf_Hab*C_Inf_Solo/(if C_Inf_Declive_>0 then C_Inf_Solo else 1)

Precip_Liq = Precipitação-Intercept

Precip_m = Conver_para_m*Precipitação

DOCUMENTO: Precipitação em
m/dia

Press_vap = Umidade*6.1078*EXP(17.269*Temp_ar_C/(Temp_ar_C+237.3))

DOCUMENTO: Pressão de vapor - diária - (Pa)

Prof_raizes = 1

rA = LOGN((82/80-0.67)/0.123)*LOGN((82/80-0.67)/0.0123)/0.41/0.41/Vento/3.6

DOCUMENTO: Resistência aerodinâmica

s/m (vel vento m/s=3.6 km/hora)

Parâmetro muito importante.

Mach = altura das macrófitas. A altura da vegetação na várzea é constante.

Não se dispondo das medições de altura, pode-se usar a resistência de referencia das culturas = 33/0.41/0.41/Vento+MacA*0

(LOGN(((MacA+2)/Mach-0.67)/0.123)*LOGN(((MacA+2)/MacA-0.67)/0.0123)/0.41/0.41/Vento)

RadSolAtm = (A+B*SIN(T_rad)+C*COS(T_rad)^2)*1.45

DOCUMENTO: Fórmula empírica, simplificada.

$ro = 3.486 * P / (275 + Temp_ar_C)$
DOCUMENTO: Densidade do ar
kg/m³

$rS = IF\ MacLAI > 0.01\ THEN\ 4 / MacLAI\ ELSE\ 10^{10}$
DOCUMENTO: Resistência da superfície
s/m

A fórmula original é $200 / MacLAI$ (índice de área foliar das macrófitas).
Entretanto, nesse caso ET não decresce com o crescimento de rA.
Para que isso seja atingido, precisa-se que ET seja função de rA
 $ET * Lambda = (p + q / rA) / (a + b / rA)$ decresce quando
($p = \Delta * Energia$, $b = \gamma * rS$, $a = \Delta + \gamma$, $q = 1.013 * ro * D$). Isto é alcançado quando a
derivada é negativa, ou seja, $\Delta * Energy / (\Delta + \gamma) < 1.013 * ro * D / \gamma / rS$.
A única variável que se pode modificar aqui, é rS.

$Runoff_para_SUP = Cota_min * C_porosidade$
DOCUMENTO: A quantidade de água saturada que correspondente à cota mínima. Seu
excesso gera escoamento superficial.

$SAT_Max = Cota * C_porosidade$
DOCUMENTO: Quantidade máxima de água saturada que pode conter certa elevação.

$sat_vap_defice = 1 - Umidade / 100$
DOCUMENTO: *Deficit* de saturação do ambiente.
Unidade = Pa/Pa = adimensional

$Solo = 1$
DOCUMENTO: Determina o tipo de solo da área.

$SolRadGr = 0.55 * RadSolAtm * (1 - 0.05 * Nebulosidade)$
DOCUMENTO: Correção para dias nublados

$Tamanho_cel = 5400$
DOCUMENTO: Área considerada, medida em m²

$Temp_ar_C = max(0, ((Temp_ar_max) + Temp_ar_min) / 2)$
 $Transpiração < 0 = C_transp * ETpm * Disp_agua$
DOCUMENTO: Transpiração Potencial pela macrófitas, incluindo efeito de estresse hídrico.
ETpm - fórmula de Penman-Monteith.
Unidade = adimensional * m/d * adimensional + adimensional * m/d * adimensional *
(m²/m²) = m/d
Para um fotoperíodo e *deficit* de saturação da vegetação, taxa máxima de transpiração
pelas plantas através dos estômatos SE a água não for limitante estressando as plantas.
Unidade = h/dia * (mol m⁻² sec⁻¹ * sec/hr * kg/mol * m³/kg) * adimensional = m água/dia

$T_rad = 2 / 365 * PI * (Dia - 173)$
DOCUMENTO: Conversão de dias para radianos.
360/365 conversão de dias para graus;
PI/180 * Dia conversão de graus para radianos;
= 2/365 * PI * Dia
173 dia 22 de junho - o dia mais curto do ano

$Vento = Vel_vento * Vento_Conv$
DOCUMENTO: Conversão de m/s para km/hora = 1000/3600

$C_cap_campo = 0.33$
DOCUMENTO: Proporção do total do volume do solo para determinado tipo de solo, que
contém água não drenada por gravidade. Capacidade de campo = porosidade - produção
específica;

Assegure-se que alterações na porosidade e produção específica sejam consistentes com sua parameterização.

.11

C_cond_hidr_horiz = 10

DOCUMENTO: Condutividade hidráulica do solo saturado, dependente do tipo de solo.

Unidade m/d. Inicialmente 10, 5

C_cond_hidr_vert = 3

DOCUMENTO: A condutividade hidráulica vertical do solo saturado é dependente do tipo de solo. Ela pode ser diferente da condutividade horizontal do sedimento ou do aquífero.

Unidade em m/d.

areia= 3; areia siltosa = 0.75; silte= 0.09; argila siltosa = 0.025; argila= 0.0075

0.02

C_evap = 0.000482

C_Infilt = 0.08

C_Inf_Declive = 1

DOCUMENTO: A declividade está definida no mapa. O número 1 indica que não há declividade e a máxima declividade se dá no número 9. Considera-se que, quanto maior a declividade, menor a taxa de infiltração.

C_Inf_Hab = 1

DOCUMENTO: Taxa de infiltração modificada pelo tipo de habitat

C_Inf_Solo = 0.6

DOCUMENTO: Taxa de infiltração para determinado solo,

Unidade m/dia (considera-se : infiltração - saturação em *steady state*) valor inicial = 3.6

[muito sensível entre .01 a .05, .02 produziram 11.6% de escoamento superficial .03 {m/dia}

Unidade = mm/hora, portanto *24/1000

10*24/1000

C_INS_evap = 0.5

DOCUMENTO: Diminui a evaporação do solo relativamente à evaporação da água aberta. adimensional

C_INS_umidade_pr = 1

DOCUMENTO: Condição inicial da proporção da umidade na zona insaturada (0 - 1 adimensional) .5

C_Intercep = 0.001

C_IntercepVeg = 0.001

C_LatGraus = 22.0

DOCUMENTO: Latitude em graus

Sao Carlos = 21.0 graus latitude sul; local da área de estudo 22.0 graus latitude sul.

min = 64.

max = 20.

C_nivel_agua = 25

DOCUMENTO: Altura (+) em metros do nível da água acima da cota base (*datum*).

C_porosidade = 0.41

DOCUMENTO: Porosidade dos sedimentos. Capacidade de campo = porosidade - produção específica;

Assegure-se que qualquer alteração na porosidade e produção específica seja consistente na sua parameterização.

Unidades = m espaço de poros / m sedimento = proporção espaço de poros

C_recarga = 0.00

DOCUMENTO: Taxa de recarga do aquífero abaixo da base *datum* (perda pelo modelo).

Unidade = m

C_saída_SUP = 1.

C_SAT_Out = 0.1

C_sinusos = 10

DOCUMENTO: "Sinuosidade" da rede de drenagem (córrego). Pode ser espacialmente dependente quando houver dados disponíveis. Quanto maior o comprimento do sistema de drenagem dentro da célula (relativamente a sua distância) maior a drenagem de água.

C_sup_delta = 3.

DOCUMENTO: O quanto deve ser a altura mínima da cota na célula relativa à cota média.

C_SUP_prof = 0.1

DOCUMENTO: Condição inicial do nível da água na superfície (m) acima da superfície do sedimento/solo

C_transp = 0.5

DOCUMENTO: Era 0.01

adimensional

Datum_para_MSL = 10

DOCUMENTO: Distância (positiva) entre a base "*datum*" e nível do mar. Base *datum* está abaixo do MSL.

Elev_MSL_mapa = 30

DOCUMENTO: Altura em metros acima do nível do mar (MSL).

Prof_MSL_map = 0

Vento_Conv = 0.277

DOCUMENTO: Conversão de m/s para km/hora = 1000/3600

Precipitação = GRAPH(Dia)

(1.00, 15.8), (1.73, 88.8), (2.46, 7.20), (3.18, 10.1), (3.91, 2.10), (4.64, 2.30), (5.37, 10.0), (6.10, 0.00), (6.82, 0.00), (7.55, 0.00), (8.28, 0.00), (9.01, 1.50), (9.74, 0.00), (10.5, 0.00), (11.2, 10.5), (11.9, 1.90), (12.6, 6.70), (13.4, 0.00), (14.1, 0.6), (14.8, 0.00), (15.6, 0.04), (16.3, 0.00), (17.0, 0.00), (17.7, 0.00), (18.5, 4.60), (19.2, 20.2), (19.9, 0.1), (20.7, 0.00), (21.4, 0.00), (22.1, 2.40), (22.8, 28.1), (23.6, 8.20), (24.3, 0.00), (25.0, 6.00), (25.8, 8.00), (26.5, 0.1), (27.2, 0.00), (27.9, 0.00), (28.7, 10.8), (29.4, 3.60), (30.1, 28.6), (30.8, 31.8), (31.6, 17.8), (32.3, 21.8), (33.0, 0.00), (33.8, 0.00), (34.5, 16.4), (35.2, 4.60), (35.9, 0.00), (36.7...

DOCUMENTO: Chuva no ribeirão do Feijão em 2000. unidade = mm por dia

(mm/d)Temp_ar_max = GRAPH(Dia)

(1.00, 27.9), (2.00, 20.4), (3.00, 21.5), (4.00, 23.3), (5.00, 26.2), (6.00, 27.4), (7.00, 29.4), (8.00, 30.5), (9.00, 31.4), (10.0, 31.2), (11.0, 30.4), (12.0, 28.8), (13.0, 30.9), (14.0, 31.8), (15.0, 31.2), (16.0, 32.2), (17.0, 31.2), (18.0, 31.1), (19.0, 30.2), (20.0, 28.0), (21.0, 28.4), (22.0, 30.2), (23.0, 32.0), (24.0, 31.9), (25.0, 32.7), (26.0, 26.1), (27.0, 24.9), (28.0, 27.1), (29.0, 28.1), (30.0, 30.3), (31.0, 30.0), (32.0, 25.2), (33.0, 29.6), (34.0, 28.1), (35.0, 29.1), (36.0, 30.1), (37.0, 29.1), (38.0, 26.7), (39.0, 26.8), (40.0, 26.8), (41.0, 24.1), (42.0, 23.7), (43.0, 26.5), (44.0, 25.1), (45.0, 29.1), (46.0, 30.8), (47.0, 28.5), (48.0, 22.3), (49.0, 25.6), (50.0,

28.6), (51.0, 29.0), (52.0, 29.9), (53.0, 30.2), (54.0, 30.8),
(55.0, 31.8)...

DOCUMENTO: Ribeirão do Feijão, 2000 máximos valores diários
(graus C)

Temp_ar_min = GRAPH(Dia)

(1.00, 20.5), (2.00, 18.2), (3.00, 17.9), (4.00, 19.5), (5.00, 20.2),
(6.00, 19.3), (7.00, 17.7), (8.00, 17.1), (9.00, 16.6),
(10.0, 17.4), (11.0, 17.1), (12.0, 18.2), (13.0, 17.4), (14.0, 19.0),
(15.0, 18.6), (16.0, 18.7), (17.0, 20.3), (18.0, 19.5),
(19.0, 20.9), (20.0, 18.2), (21.0, 15.4), (22.0, 15.9), (23.0, 13.4),
(24.0, 15.7), (25.0, 17.0), (26.0, 18.4), (27.0, 17.8),
(28.0, 15.5), (29.0, 13.3), (30.0, 12.5), (31.0, 18.4), (32.0, 20.2),
(33.0, 18.3), (34.0, 16.2), (35.0, 19.9), (36.0, 19.9),
(37.0, 19.6), (38.0, 18.0), (39.0, 19.0), (40.0, 20.5), (41.0, 20.3),
(42.0, 20.2), (43.0, 19.6), (44.0, 19.5), (45.0, 20.0),
(46.0, 19.0), (47.0, 18.1), (48.0, 16.1), (49.0, 14.7)...

DOCUMENTO: Ribeirão do Feijão, 2000 valores mínimos diários
(graus C)

Umidade = GRAPH(Dia)

(1.00, 87.7), (2.00, 95.1), (3.00, 93.7), (4.00, 91.3), (5.00, 88.5),
(6.00, 85.7), (7.00, 86.1), (8.00, 75.8), (9.00, 74.9),
(10.0, 71.8), (11.0, 78.3), (12.0, 85.2), (13.0, 77.6), (14.0, 76.3),
(15.0, 80.6), (16.0, 62.2), (17.0, 78.8), (18.0, 81.0),
(19.0, 79.9), (20.0, 78.8), (21.0, 77.8), (22.0, 73.3), (23.0, 65.2),
(24.0, 71.1), (25.0, 74.8), (26.0, 89.8), (27.0, 79.3),
(28.0, 69.2), (29.0, 72.1), (30.0, 82.1), (31.0, 83.2), (32.0, 92.4),
(33.0, 82.0), (34.0, 87.0), (35.0, 84.8), (36.0, 81.7),
(37.0, 80.1), (38.0, 77.6), (39.0, 1.47), (34.0, 1.36), (35.0, 1.76),
(36.0, 1.02), (37.0, 1.79), (38.0, 2.55)...

DOCUMENTO: Ribeirão do Feijão, 2000

unidade = m/s

Equações utilizadas no modelo desenvolvido por JORGENSEN (1995)
para trabalho com Nitrogênio em várzeas.

```

ads_N(t) = ads_N(t - dt) + (troca_NH4) * dt
INIT ads_N = 200/9
troca_NH4 = IF ads_N<200*NH4/(8+NH4) THEN NH4/(8+NH4) ELSE 0
detr_N(t) = detr_N(t - dt) + (decompos - miner) * dt
INIT detr_N = 1200
decompos = (1.04^(temp-20))*mort*(uptake_1+uptake_2)
miner = 0.0001*detr_N*1.07^(temp-20)
NH4(t) = NH4(t - dt) + (miner + NH4_in - uptake_2 - NH4_out -
troca_NH4) * dt
INIT NH4 = 1
miner = 0.0001*detr_N*1.07^(temp-20)
NH4_in = (troca*NH4_superf+0.01*(NH4_superf-NH4))/solow
uptake_2 = IF(NH4>0.05) THEN(luz*0.15*(1.05^(temp-
20)*NH4/(NO3+NH4))) ELSE(0)
NH4_out = out*NH4/solow
troca_NH4 = IF ads_N<200*NH4/(8+NH4) THEN NH4/(8+NH4) ELSE 0
NH4_superf(t) = NH4_superf(t - dt) + (superf_NH4_in - nit_superf -
superf_NH4_out - w_fl_NH4) * dt
INIT NH4_superf = 0.1

superf_NH4_in = fluxo_in*0.2/sw
nit_superf = 8*(1.12^(temp-20))*NH4_superf/(8+NH4_superf)
superf_NH4_out = (NH4_superf*fluxo_out+0.01*(NH4_superf-NH4))/sw
w_fl_NH4 = troca*NH4_superf/sw
NO3(t) = NO3(t - dt) + (NO3_in - denit - NO3_out - uptake_1) * dt
INIT NO3 = 5
NO3_in = (troca*NO3_superf+0.01*(NO3_superf-NO3))/solow
denit = (1.12^(temp-20))*8*NO3/(12+NO3)
NO3_out = out*NO3/solow
uptake_1 = IF(NO3>0.05) THEN(luz*0.15*(1.05^(temp-
20))*NO3/(NO3+NH4)) ELSE 0
NO3_superf(t) = NO3_superf(t - dt) + (superf_NO3_in + nit_superf -
denit_superf - fluxo_descen - superf_NO3_out) * dt
INIT NO3_superf = 5
superf_NO3_in = fluxo_in*5/sw
nit_superf = 8*(1.12^(temp-20))*NH4_superf/(8+NH4_superf)
denit_superf = (1.12^(temp-20))*8*NO3_superf/(12+NO3_superf)
fluxo_descen = troca*NO3_superf/sw
superf_NO3_out = (fluxo_out*NO3_superf+0.01*(NO3_superf-NO3))/sw
plant_N(t) = plant_N(t - dt) + (uptake_1 + uptake_2 - decompos) * dt
INIT plant_N = 20
uptake_1 = IF(NO3>0.05) THEN(luz*0.15*(1.05^(temp-
20))*NO3/(NO3+NH4)) ELSE 0
uptake_2 = IF(NH4>0.05) THEN(luz*0.15*(1.05^(temp-
20)*NH4/(NO3+NH4))) ELSE(0)
decompos = (1.04^(temp-20))*mort*(uptake_1+uptake_2)
solow(t) = solow(t - dt) + (troca - out) * dt
INIT solow = 2.0
troca = IF(sw>swmax) THEN(cond_hidra) ELSE(sw*cond_hidra/swmax)
out = IF(solow>2.45) THEN(0.1) ELSE(0)
sw(t) = sw(t - dt) + (fluxo_in + prec - fluxo_out - evap - troca) *
dt
INIT sw = 0.015
fluxo_in = 0.035
prec = GRAPH(TIME)

```



```

(0.00, 0.0015), (36.5, 0.0016), (73.0, 0.0019), (110, 0.0021), (146,
0.0016), (183, 0.0018), (219, 0.0025), (256, 0.002), (292, 0.0016),
(329, 0.0018), (365, 0.0027)
fluxo_out = IF(sw>swmax) THEN(1.0*sw-swmax) ELSE(0)
evap = GRAPH(TIME)
(0.00, 0.001), (36.5, 0.001), (73.0, 0.0012), (110, 0.0014), (146,
0.0022), (183, 0.003), (219, 0.03), (256, 0.0022), (292, 0.0017),
(329, 0.0014), (365, 0.0011)
troca = IF(sw>swmax) THEN(cond_hidra) ELSE(sw*cond_hidra/swmax)
cond_hidra = 0.09
luz = 1.91-1.68*COS(6.1*(TIME-355)/365)
swmax = 0.05
total_wat = solow+sw
mort = GRAPH(TIME)
(0.00, 0.105), (36.5, 0.17), (73.0, 0.42), (110, 0.67), (146, 1.06),
(183, 1.25), (219, 1.31), (256, 1.28), (292, 1.29), (329, 1.13),
(365, 0.375)
temp = GRAPH(TIME)
(0.00, 3.30), (36.5, 3.85), (73.0, 6.60), (110, 15.9), (146, 20.6),
(183, 21.4), (219, 20.6), (256, 12.1), (292, 7.37), (329, 5.94),
(365, 4.73)

```

Instruções para instalação do *software* que acompanha o exemplar de Tese

No *Windows*, procure no *Explorer* pelo CD: Tese

Instale o programa *STELLA*, *run-time version* e abra os arquivos que contêm os modelos estudados.

Os arquivos utilizados estão na pasta: Arquivos do *STELLA*

Figura - Variação instantânea (horária) da evapotranspiração potencial (ET_p), pelo método de Penman-Monteith, no período de 22 a 27 de fevereiro de 2000

Figura - Variação instantânea (horária) da evapotranspiração potencial (ET_p), pelo método de Penman-Monteith, no período de 10 a 17 de março de 2000