

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

Relatório Final de Pós-Doutorado Junior

**MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL E MAPEAMENTO DE
RISCOS DOS NÍVEIS FREÁTICOS DO SISTEMA AQUÍFERO
GUARANI**

Fomento: CNPq – Brasil

Processo: 152033/2008-4 (PDJ)

Supervisor: Dr. Edson Wendland

Pós-Doutorando: Dr. Francisco F. N. Marcuzzo

Início: 10/11/2008 **Fim:** 10/06/2009 **Tempo Total:** 7 meses

São Carlos - SP

Junho de 2009

Sumário

RESUMO GERAL	2
RESUMO DO TRABALHO	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. OBJETIVOS	5
2.1. Problema de estudo.....	5
2.2. Objetivos Gerais	6
2.3. Objetivos específicos.....	6
3. JUSTIFICATIVAS	6
3.1. A questão da água no Brasil e no Mundo.....	6
3.2. A importância do lençol freático na questão do planejamento dos recursos hídricos	7
3.3. O Aquífero Guarani e a necessidade de modelos para o planejamento dos recursos hídricos	9
3.4. Modelos aplicados à representação espaço-temporal de recursos hídricos.....	12
3.5. Mapeamento de riscos associados a estimativas de níveis freáticos	14
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4.1. Área de estudo	15
4.2. Dados disponíveis.....	16
4.2.1. Séries temporais.....	16
4.2.2. Dados auxiliares	17
4.3. Modelagem dos dados proposta	17
4.3.1. Modelos de séries temporais regionalizados	17
4.3.2. O modelo PIRFICT	19
4.3.2. Simulação do modelo PIRFICT e modelagem de incertezas	22
4.3.3. Mapeamento dos níveis freáticos e riscos associados	23
5. RESULTADOS ESPERADOS	25
PLANO DE ATIVIDADES	26
CRONOGRAMA DE ATIVIDADES.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
APÊNDICE A – Resumo Expandido Enviado ao Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola de 2009	32
APÊNDICE B – Resumo Expandido Enviado ao Congresso Brasileiro de Agrometeorologia de 2009 (Número 1)	38
APÊNDICE C – Resumo Expandido Enviado ao Congresso Brasileiro de Agrometeorologia de 2009 (Número 2)	45
APÊNDICE D – Trabalho Completo Enviado ao Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos de 2009 (Número 1).....	52
APÊNDICE E – Trabalho Completo Enviado ao Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos de 2009 (Número 2).....	76
APÊNDICE F – Trabalho Enviado a Revista Brasileira de Meteorologia.....	Erro!

Indicador não definido.

ESCLARECIMENTO INÍCIAL

Além do pós-doutorando e do seu supervisor, o presente trabalho esta desenvolvido com a efetiva colaboração do professor Dr. Rodrigo Lilla Manzione da UNESP/Ourinhos-SP. As atividades tiveram início na data de 10/11/2008 e encerramento em 10/06/2009, totalizando 7 meses. No principio estavam previstos 12 meses de atividades ininterruptas, as quais tiveram que ser cessadas, de maneira oficial, devido ao pós-doutorando junior ter ingressado, por meio de concurso publico federal, no cargo de Pesquisador em Geociências, na área de Engenharia Hidrológica, da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais do Ministério de Minas e Energia. Ressalta-se que o encerramento oficial das atividades do pós-doutorado não implica em abandono do projeto de pesquisa, sendo que o mesmo se encontra em curso, conforme a disponibilidade de tempo das partes envolvidas, em seus respectivos trabalhos, visando publicações em congressos e em periódicos científicos. Durante o período do pós-doutoramento foi desenvolvida uma planilha para cálculo de 21 diferentes métodos de evapotranspiração diária e os respectivos balanços hídricos com gráficos, além de evaporação e o detalhamento dos fenômenos climáticos envolvidos. Todos os cálculos foram retroativos a um período mínimo de 30 anos, segundo os dados da estação climatológica do CRHEA. A presente planilha encontra-se disponível no Laboratório de Hidráulica Computacional para constante abastecimento do banco de dados. O presente relatório traz a explicação técnica do principal projeto desenvolvido durante o pós-doutoramento e, nos apêndices, as publicações produzidas até o presente momento. Ressalva-se que esta em fase de redação duas outras publicações, uma para periódico nacional e outra para periódico internacional, a serem submetidas nos próximos meses.

RESUMO DO TRABALHO

A água é responsável pela manutenção de ecossistemas, cidades, atividades agrícolas e industriais. A sociedade depende desse recurso de maneiras diretas e indiretas. O monitoramento de recursos hídricos de uma região fornece informações relevantes para o planejamento do uso sustentável da água para que seu uso atenda as demandas sem afetar a oferta de água e

comprometer reservas importantes do sistema aquífero. Para modelagem desse tipo de fenômenos é necessário considerar as variações no espaço e no tempo para que seja caracterizada a dinâmica do sistema, e as incertezas associadas às estimativas para que sejam preditos e mapeados riscos inerentes a exploração dos recursos. O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma importante reserva de água subterrânea mundial. No Brasil diversos municípios se localizam na sua área de abrangência, apresentando diversos usos da água e constituindo uma área de grande importância econômica. Suas zonas de recarga (áreas aflorantes do aquífero) correspondem a 10 % de sua área total. O presente projeto pretende caracterizar os recursos hídricos da bacia do Ribeirão da Onça, mapeando riscos de níveis freáticos extremos, através da simulação de modelos de transferência de ruído regionalizados fisicamente embasados. A bacia do Ribeirão da Onça pertence a esta importante área de recarga do Aquífero Guarani. Objetiva-se assim, compreender e modelar os mecanismos de recarga do SAG. Compreender os processos hidrológicos em uma bacia monitorada de forma detalhada permitirá a extrapolação dos resultados obtidos para a área considerada como reserva estratégica de água, a zona de recarga direta do sistema.

1. INTRODUÇÃO

Diversos fenômenos naturais apresentam indexação não só no domínio espacial, mas também no tempo. Mudanças da disponibilidade de recursos hídricos apresentam impactos no meio ambiente e na ocupação do solo pela agricultura. O volume explorável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano de gestão do sistema de águas de uma região, uma vez que os recursos hídricos possuem influências muitas vezes em nível regional, municipal, estadual e até mesmo federal, e não apenas no nível da bacia hidrográfica. Deve-se tomar cuidado na exploração desse tipo de recurso, já que a renovação das águas retiradas, ou recarga do aquífero, não se faz na mesma velocidade da extração. Isso pode resultar em uma exploração de partes das reservas permanentes do aquífero, com riscos até mesmo de exaustão quando a captação não é devidamente monitorada.

Modelos matemáticos têm sido aplicados à descrição de fenômenos naturais por se tratarem de abstrações da realidade encontrada, uma tentativa de representação de uma ou todas as propriedades de um fenômeno, sistema ou objeto, que tem com propósito compreender melhor a resposta de processos a partir de observações realizadas, ou mesmo deduzir efeitos (TUCCI, 1998). Sua construção é uma tentativa de ganho em conhecimento sobre determinado fenômeno. À medida que o conhecimento sobre um processo se expande, a complexidade dos modelos tende a aumentar.

Prever a resposta de um aquífero (em termos de quantidade e qualidade) quanto as atividades de exploração propostas e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração em determinada região é uma questão complicada, devido a complexidade dos processos envolvidos (MANOEL FILHO, 2000), fazendo com que muitas vezes a gestão de águas subterrâneas não sejam incluídas no planejamento e gestão de recursos hídricos.

Um melhor conhecimento dos processos que ocorrem no sistema solo-água-atmosfera visa o planejamento e o uso eficiente da água, além da redução dos impactos negativos de sistemas agrícolas irrigados. A utilização dos recursos hídricos em tempo integral através dos sistemas de irrigação tem respostas no meio e na vegetação original remanescente, alterando todo equilíbrio do sistema solo-planta-água-atmosfera. Em áreas onde os níveis de reserva hídrica podem se tornar críticos existe a necessidade que as previsões a respeito sejam seguras, auxiliando assim no suporte a decisão. Os efeitos de variações sazonais sendo expressos em termos de probabilidades são explicados através de modelos estocásticos (HEUVELINK & PEBESMA, 1999), permitindo com que o risco associado às estimativas seja mensurado.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma importante reserva mundial de água subterrânea. Só Brasil, estima-se que 1.443 municípios se localizam na área do SAG (BORGHETTI et al., 2004), constituindo uma área de grande importância econômica e apresentando diversos usos como urbano, industrial e rural. De acordo com KIANG (2001), cerca de 8.444.620 habitantes fazem uso direto ou indireto das águas do SAG, gerando um consumo aproximado de 500 milhões de m³ por ano. A cidade de Bauru – SP, por exemplo, apresenta 29 poços de captação de água sendo responsável pelo abastecimento de 60% da população (REZENDE, 2007). São Carlos - SP conta com 18 poços que

suprem a demanda de 49% da população (COTRIM, 2007). Apesar de sua grande extensão, há sinais de super-exploração em algumas zonas, como a de Ribeirão Preto no Estado de São Paulo (GILBOA et al., 1976; KIANG, 2001), onde as recargas são, em média, negativas (VIVES et al., 2001). Isso se deve à grande atividade de poços de captação que mantêm esta cidade abastecida exclusivamente pelo manancial subterrâneo.

A avaliação do comportamento do aquífero, principalmente nas áreas de afloramento, fornece dados importantes para sua conservação e subsídios aos projetos de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável (OAS/GEF, 2001) assegurando a qualidade e a quantidade de seu manancial para as futuras gerações. O SAG é uma reserva de água estratégica para o Brasil, pois dele dependerá a manutenção de atividades agrícolas, industriais e cidades, a medida que o país se desenvolve e o crescimento econômico demande mais pressão sobre os recursos naturais.

2. OBJETIVOS

2.1. Problema de estudo

Em áreas dependentes das reservas de água subterrânea, os níveis de reserva hídrica podem se tornar críticos. Assim, existe a necessidade de que sejam feitas previsões seguras a respeito das oscilações dos níveis freáticos, que auxiliem no suporte a tomada de decisão no planejamento dos recursos hídricos. Os efeitos de variações sazonais expressos em termos de probabilidades ou risco, são explicados através de modelos estocásticos. Um melhor conhecimento dos processos que ocorrem no sistema solo-planta-água-atmosfera visa o planejamento e o uso eficiente da água, além da redução dos impactos antrópicos negativos no uso da água.

2.2. Objetivos Gerais

- Aplicação de modelos espaço-temporais baseados em observações e em séries temporais para compreensão dos processos que ocorrem durante o ciclo hidrológico e afetam a disponibilidade dos recursos.
- Caracterização dos recursos hídricos disponíveis em áreas críticas, afetadas pelas variações sazonais e onde a utilização da água é feita de maneira contínua.

2.3. Objetivos específicos

- Calibração de modelos estocásticos espaço-temporais, modelando os processos decorrentes do ciclo hidrológico de maneira determinística, levando em consideração o conhecimento físico sobre o fenômeno e explicando sua dinâmica; e um resíduo estocástico que determina as incertezas associadas ao sistema;
- Estudo das incertezas associadas às estimativas efetuadas e construção de medidas de risco necessárias ao planejamento dos recursos hídricos em áreas críticas; e
- Mapeamento dos níveis freáticos e delimitação de áreas consideradas de risco em função de parâmetros hidrogeológicos, uso do solo e geomorfologia.

3. JUSTIFICATIVAS

3.1. A questão da água no Brasil e no Mundo

O Brasil conta com 53% da disponibilidade sul-americana de recursos hídricos e 12% de todo mundo (REBOUÇAS et al., 2006). Se comparado à absoluta escassez de água por que passam países do Oriente Médio, sul da África e regiões mais secas do oeste e sul da Índia e do norte da China, além de outras nações que sofrerão com escassez de água no futuro próximo, principalmente na África subsaariana, a situação brasileira é confortável. Apesar disso, o Brasil apresenta problemas quanto à questão das águas, seja pelos problemas de

seca no semi-árido, inundações no sul e sudeste, contaminações disseminadas em corpos d'água próximos a áreas urbanas e junto a pólos industriais, além de alguns quadros de conflito gerados por disputas de recursos hídricos. Essa preocupação com a gestão dos recursos hídricos fez com que políticas governamentais fossem direcionadas no sentido de criar medidas para um uso racional, preservação, gerenciamento e eventuais cobranças pelo uso da água. Exemplos dessas atitudes são: a criação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos e da Agência Nacional de Águas. Assim, o equacionamento desses recursos depende, não apenas da oferta de água, mas também do gerenciamento da demanda, inclusive pela ação pactuada na escala da bacia hidrográfica, abrangendo mais de um estado. A água muitas vezes nasce em um Estado e segue para outros, sendo os rios afluentes de várias partes do País, não sendo uma questão que se possa resolver em nível exclusivamente local. Parte das águas do Rio São Francisco, por exemplo, partem subterraneamente do Planalto Central, e a devastação nessa área acaba por afetar o Rio São Francisco tanto quanto a devastação das matas ciliares no interior de Minas Gerais, gerando impactos na economia da Região Nordeste (MANOEL FILHO, 2000).

3.2. A importância do lençol freático na questão do planejamento dos recursos hídricos

Cerca de 97% da água doce disponível no mundo, descontando as calotas polares, encontra-se no subterrâneo (REBOUÇAS et al., 2006). Em termos mundiais, os estoques de água subterrânea são estimados em 8,4 milhões de km³. As águas subterrâneas encontradas nos sistemas aquíferos regionais são águas armazenadas que se acumularam ao longo de milhares de anos e se encontram, em condições naturais, numa situação de quase equilíbrio, governado por um mecanismo de recarga e descarga. A qualidade das águas subterrâneas sob o ponto de vista bacteriológico e químico é, em geral, muito melhor que o das águas de superfície, dispensando, na maioria dos aquíferos captados, qualquer tratamento antipolvente. Além dessas águas não se encontrarem diretamente expostas às influências climáticas, o seu movimento

é muito lento, implicando em um tempo de trânsito muito longo. Mas, nem toda a água do subsolo pode ser extraída das formações aquíferas em que se encontra. O volume explorável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano de gestão do sistema, uma vez que os recursos hídricos possuem influências muitas vezes em nível regional, municipal e até mesmo estadual, e não apenas no nível da bacia hidrográfica. Neste sentido, é preciso desenvolver modelos que forneçam informação local sobre a resposta do sistema de água subterrânea a bombeamentos e/ou recarga artificial, para identificar políticas adequadas de gerenciamento dos recursos hídricos disponíveis.

As reservas subterrâneas são usadas largamente no mundo, principalmente em sistemas de irrigação e uso industrial, sendo o consumo humano responsável por menos de 15% dessa utilização (REBOUÇAS et al., 2006). Para o abastecimento humano, países como Arábia Saudita, Dinamarca e Malta usam exclusivamente águas subterrâneas, enquanto que em países como Áustria, Alemanha, Bélgica, França, Hungria, Itália, Holanda, Marrocos, Rússia e Suíça, mais de 70% da demanda é atendida pelo manancial hídrico subterrâneo. No Brasil, as águas subterrâneas encontram-se distribuídas de maneira heterogênea. Um grande exemplo está presente em 55% da região nordeste, onde não são encontradas formações sedimentares formadoras de aquíferos, e sim terrenos representados por rochas cristalinas onde as águas acumuladas são poucas e na maior parte salinizadas (COSTA, 2000). No Brasil são perfurados anualmente apenas 1% dos poços perfurados nos Estados Unidos, demonstrando uma utilização ainda modesta desses recursos. Embora alguns Estados como São Paulo, Maranhão e Piauí tenham a maior parte de suas cidades abastecidas com águas subterrâneas, assim como grandes capitais, a maior parte da água subterrânea explorada no Brasil é utilizada em sistemas de irrigação, em torno de 60-80% (COSTA, 2000).

Deve-se tomar cuidado na exploração desse tipo de recurso, uma vez que a renovação das águas retiradas, ou recarga do aquífero, não se faz na mesma velocidade da extração. Isso pode resultar em uma exploração de partes das reservas permanentes do aquífero, com riscos até mesmo de exaustão quando a captação não é devidamente monitorada. A necessidade de dados históricos e pessoal com alta qualificação para analisá-los, leva a uma difícil questão, que

é prever a resposta de um aquífero (em termos de quantidade e qualidade) quanto às atividades de exploração propostas (COSTA, 2000; SILVA & PRUSKI, 2000; CAMPOS & STUDART, 2003), e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração em determinada região. Isso faz com que muitas vezes as águas subterrâneas não sejam incluídas no planejamento e gestão de recursos hídricos. Há de se tomar cuidado na avaliação dessas reservas à medida que a economia brasileira fica cada vez mais dependente da atividade agrícola. A vulnerabilidade da atividade ocorre quando novos cultivos são introduzidos em áreas onde nunca foi registrada sua ocorrência sem estudo prévio da disponibilidade e demanda hídrica da cultura.

3.3. O Aquífero Guarani e a necessidade de modelos para o planejamento dos recursos hídricos

Localizado entre os paralelos 12° e 35° de latitude Sul e 47° e 65° de longitude Oeste, o Aquífero Guarani estende-se desde a Bacia Sedimentar do Paraná (Brasil, Paraguai e Uruguai) até a Bacia do Chaco Paraná (Argentina) (KIANG, 2001; BORGHETTI et al., 2004). O Sistema Aquífero Guarani, em território brasileiro, abrange duas zonas climáticas: Tropical Brasil Central e Temperado. Nos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais e São Paulo, onde predominam o clima Tropical Brasil Central Quente e úmido a Mesotérmico Brando e Superúmido, com precipitação média anual entre 1.200mm e 1.800mm. Nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul predominam o clima Temperado Mesotérmico Superúmido, com precipitação média anual entre 1.200mm e 2.000mm.

O termo Aquífero Guarani é a denominação formal dada ao reservatório transfronteiriço de águas subterrâneas doce, formado pelos sedimentos flúvio-lacustres do período Triássico (245 – 208 milhões de anos), Formações Pirambóia e Rosário do Sul, no Brasil, Buena Vista, no Uruguai, e pelos sedimentos eólicos desérticos do Período Jurássico (208 – 144 milhões de anos), Formações Botucatu, no Brasil, Misiones, no Paraguai e Tacuarembó, no Uruguai e Argentina. A arquitetura do pacote sedimentar que constitui o Aquífero Guarani é resultante da possança (espessura de um estrato geológico

ou de uma série de camadas) dos derrames de lavas basálticas sobre eles depositados; da ativação de falhamentos e arqueamentos regionais; e do soerguimento das bordas da bacia sedimentar do Paraná. A espessura total do aquífero varia de valores superiores a 800 metros até a ausência completa de espessura em áreas internas da bacia. As variações na espessura são atribuídas ao controle estrutural durante a deposição e ao controle erosional do ambiente desértico.

De maneira geral, o aquífero é composto por uma variedade de areias quartzíticas, de formato bem arredondado, de granulometria de fina a média, sendo caracterizada por assentamento e baixo teor de argila. Dados granulométricos indicam que mais de 50% dos grãos apresentam diâmetro entre 0,125 a 0,250mm. Nas partes mais profundas, na formação Pirambóia, caracteriza-se a presença de silte (CONTIN NETO, 1987).

Em uma avaliação na porção brasileira, realizada por REBOUÇAS (1976), estimou-se a reserva permanente em 48.021 km³ e a reserva reguladora ou ativa em 160 km³/ano, subdivididos em infiltração direta e indireta. A infiltração direta foi calculada considerando uma recarga direta de 225 mm/ano, equivalente a 15% da pluviometria média anual de 1500 mm, precipitando sobre uma área de 87.000 km², resultando em 22 km³/ano. A infiltração indireta, através da formação Serra Geral, foi calculada adotando-se valores de condutividade hidráulica de 5.10⁻⁸ m/s, valor médio de diferença de potencial de 100m e espessura média de camada infiltrante, de 400 m, resultando em 138 km³/ano. Para a estimativa de reserva permanente, utilizou-se uma área total de 800.000 km², espessura média de 300 m e porosidade efetiva de 20%. ROCHA (1997) apresenta uma avaliação para toda área do aquífero, fornecendo valores de 37.000 km³ para reserva permanente e 160 km³/ano para reserva ativa. No trabalho, foi adotado o valor de 25% como índice de reserva explotável, justificado como uma necessidade de planejamento racional do uso, reduzindo sobremaneira o volume correspondente à reserva ativa. Os parâmetros utilizados foram pluviometria média de 1.500 mm/ano, área de recarga de 150.000 km², área confinada de 1.000.000 km², espessura média de 250 m, porosidade efetiva de 15% e coeficiente de armazenamento de 10-4. KIANG (2001) estimou a reserva ativa, referente a recarga direta através de áreas aflorantes, em 5,2 km³/ano. Para isto, o autor adotou um valor médio de

recarga de 4%, área aflorante total de 89.936 km² e pluviometria média anual variando entre 1.300mm e 1.500mm.

Esses trabalhos anteriores, baseados em valores estimados, indicam a necessidade de estudos detalhados no sentido de quantificar a recarga e compreender os mecanismos de recarga do sistema. A agricultura moderna, por exemplo, é uma atividade extremamente intensiva. No Brasil, chegam-se a colher três safras em áreas onde dispõe-se de sistemas de irrigação e mecanização de última geração, mesmo com o regime pluviométrico bem definido entre a épocas das secas e época das águas. Com a substituição da vegetação original por extensos campos cultivados com monoculturas, os efeitos nos recursos hídricos são inevitáveis. Segundo REBOUÇAS et al. (2006), a agricultura é a atividade que mais demanda água, da mesma maneira que é a atividade que mais a desperdiça. A utilização dos recursos hídricos em tempo integral nessas regiões através dos sistemas de irrigação tem respostas no meio e na vegetação original remanescente, alterando todo equilíbrio do sistema solo-planta-água-atmosfera. De maneira distinta, mas igualmente importante, a atividade industrial e o consumo urbano também exercem pressões sobre os recursos hídricos. Devido ao crescimento do uso e ao incremento da demanda pelos recursos hídricos desde a década de 70, faz-se necessário investir na expansão e consolidação da base atual de conhecimento do Sistema Aquífero Guarani fornecendo subsídios para o desenvolvimento da gestão hídrica.

As flutuações sazonais e anuais dos níveis de água são muito mais pronunciadas no fluxo superficial que no fluxo subterrâneo. Nos fluxos superficiais, ocorrem grandes perdas por transbordamentos em períodos de excesso de água e também grandes perdas por evapotranspiração na estação seca. No fluxo de água subterrânea, o armazenamento é feito pelo próprio aquífero, sendo os recursos preservados de interferências climáticas externas. Em regiões onde a estação seca se manifesta de forma pronunciada, através de longas estiagens e veranicos, os cultivos agrícolas só podem ser conduzidos através de aplicação de água via irrigação. Entretanto, a manutenção de tais operações, se dá somente através dos recursos hídricos subterrâneos que sustentam o sistema.

Assim, a representação espaço-temporal adequada da resposta hidrológica em diferentes escalas, determina um ponto relevante do estudo a ser considerado no planejamento desses recursos. Nesse sentido, a utilização de modelos estocásticos espaço-tempo apresenta soluções importantes (HEUVELINK & PEBESMA, 1999), uma vez que esses modelos são capazes de inferir a distribuição espaço-temporal das variáveis de interesse e refletir nas estimativas dos processos hídricos em estudo os níveis de incerteza ou de desconhecimento, devido a falta de informação disponível. Associadas as medidas de incerteza, a avaliação do risco associada das ações de gerenciamento tais como: a outorgas de irrigação e o dimensionamento do volume de água desses sistemas podem ser incluídas no planejamento dos recursos hídricos, ou mesmo vazões de poços para abastecimento urbano ou até dimensionamento de complexos industriais.

3.4. Modelos aplicados à representação espaço-temporal de recursos hídricos

Modelos espaço-temporais estocásticos são ferramentas probabilísticas para análise de dados e predições que interam as dependências espaciais e temporais entre as observações. Um modelo estocástico é baseado tipicamente em um pequeno número de parâmetros que podem ser inferidos e modelados. Modelos estocásticos são capazes de incorporar variações aleatórias, intrínsecas aos processos do mundo real, como em muitos processos biológicos, ou produtos de medidas imprecisas, comuns em processos físicos. Alguns aspectos de modelos estocásticos espaço-temporais (ST) podem ser interpretados no domínio de modelos fisicamente embasados, ligando componentes de tendência estocástica a modelos determinísticos, e subseqüentemente analisando a união da distribuição dos resíduos no espaço e no tempo (KYRIAKIDIS & JOURNEL, 1999).

Uma vantagem de modelos estocásticos em relação a modelos determinísticos é a possibilidade da incorporação de incertezas, como, por exemplo, medidas de erro. Essas medidas não são conhecidas exatamente, mas tem probabilidades associadas a determinado alcance, intervalo ou distribuição

(HEUVELINK, 1998). Esse tipo de modelo refere-se a construção de processos que apenas imitam alguns parâmetros da variabilidade espaço-temporal observada, sem a necessidade de seguir uma equação que governe o processo.

A extensão de técnicas de interpolações espaciais ao domínio do ST não se trata somente da adição de mais uma dimensão. A dimensão espacial representa o estado de coexistência, no qual podem existir múltiplas dimensões (ou direções) e o objetivo são justamente as interpolações. Já o tempo, ao contrário, representa o estado de existência sucessiva de determinado fenômeno, sendo uma clara ordenação (não reversível) em apenas uma dimensão (e direção) e o objetivo geralmente são extrapolações (SNEPVANGERS et al., 2003).

KNOTTERS & BIERKENS (2001) dividem em três aproximações os métodos estatísticos de predição espaço-temporal: (i) métodos baseados em geoestatística, (ii) métodos baseados na modelagem de series temporais multivariadas, e (iii) métodos baseados em modelos de séries temporais com parâmetros regionalizados, sendo possíveis combinações dessas aproximações.

O objetivo inicial da análise de séries temporais é a realização de inferências sobre as propriedades ou características básicas do mecanismo gerador do processo estocástico das observações da série. Após a formulação o modelo matemático é utilizado para testar alguma hipótese ou teoria a respeito do mecanismo gerador do processo estocástico e realizar a previsão de valores futuros da série temporal.

A suposição básica de qualquer técnica de previsão de séries temporais é que o valor observado na série fica determinado por um padrão que se repete no tempo e por alguma influência aleatória (HIPEL & McLEOD, 1994). Isto significa dizer que mesmo quando o padrão exato que caracteriza o comportamento da série temporal tenha sido isolado, algum desvio ainda existirá entre os valores da previsão e os valores realmente observados. Essa aleatoriedade não pode ser prevista; entretanto, se isolada, sua magnitude pode ser estimada e usada para determinar a variação ou erro entre as observações e previsões realizadas. A acuidade de um método de previsão pode ser mensurada através de muitas medidas de erro. Dessa forma, a

verificação da adequação de um determinado modelo supostamente representativo da série histórica de dados é dependente da medida de erro adotada para efetuar essa validação.

Ao se utilizar parâmetros regionalizados para formulação do modelo, esse passa a ter sentido espacial na análise. Incorporando ao sentido físico um caráter espacial, atende-se a necessidade de conhecer informações precisas e seus possíveis desvios quanto a uma estimativa, tanto no domínio do tempo quanto no espaço, podendo-se estender as análises a diferentes escalas geográficas.

3.5. Mapeamento de riscos associados a estimativas de níveis freáticos

Um modelo estatístico é capaz de incorporar variações aleatórias, intrínsecas aos processos do mundo real, como em muitos processos biológicos, ou produtos de medidas imprecisas, comuns em processos físicos. Como modelos contem incertezas pela própria maneira como informações a seu respeito são coletadas, os modelos estatísticos devem ser capazes de lidar com a grande variedade de situações que o analista se depara ao lidar com dados relativos a processos da natureza.

O risco de ocorrência de uma determinada variável aleatória é a chance aceita pelo projetista que a variável seja maior ou menor que determinado valor. A incerteza refere-se à diferença entre as estatísticas da amostra e da população, que pode ser devido à representatividade da amostra ou devido a erros de coleta e processamento dos dados da variável aleatória. A incerteza ocorre quando a amostra for suficientemente pequena para que a distribuição estatística ajustada apresente uma estimativa tendenciosa do risco; ou quando existam dados errados, que produzam uma probabilidade maior ou menor que a verdadeira.

Métodos estocásticos nos permitem caracterizar a dinâmica dos níveis freáticos em termos de riscos, uma ferramenta valiosa no suporte a tomada de decisões referentes ao manejo de recursos hídricos. Dessa forma, obtém-se a distribuição dos valores estimados de altura do lençol freático para um determinado dia crítico em um ano futuro para cada posição \bar{x} , e a frequência

que exceda os níveis críticos predefinidos estimados (KNOTTERS & BIERKENS, 2001; MANZIONE et al., 2007b).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A Bacia do Ribeirão da Onça localiza-se na região do Município de Brotas-SP (Figura 1), ao centro-norte do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22°10' e 22°15' de latitude sul e entre os meridianos 47°55' e 48°00' de longitude oeste (POMPÊO, 1990). O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçu, afluente do Rio Tietê pela margem direita.

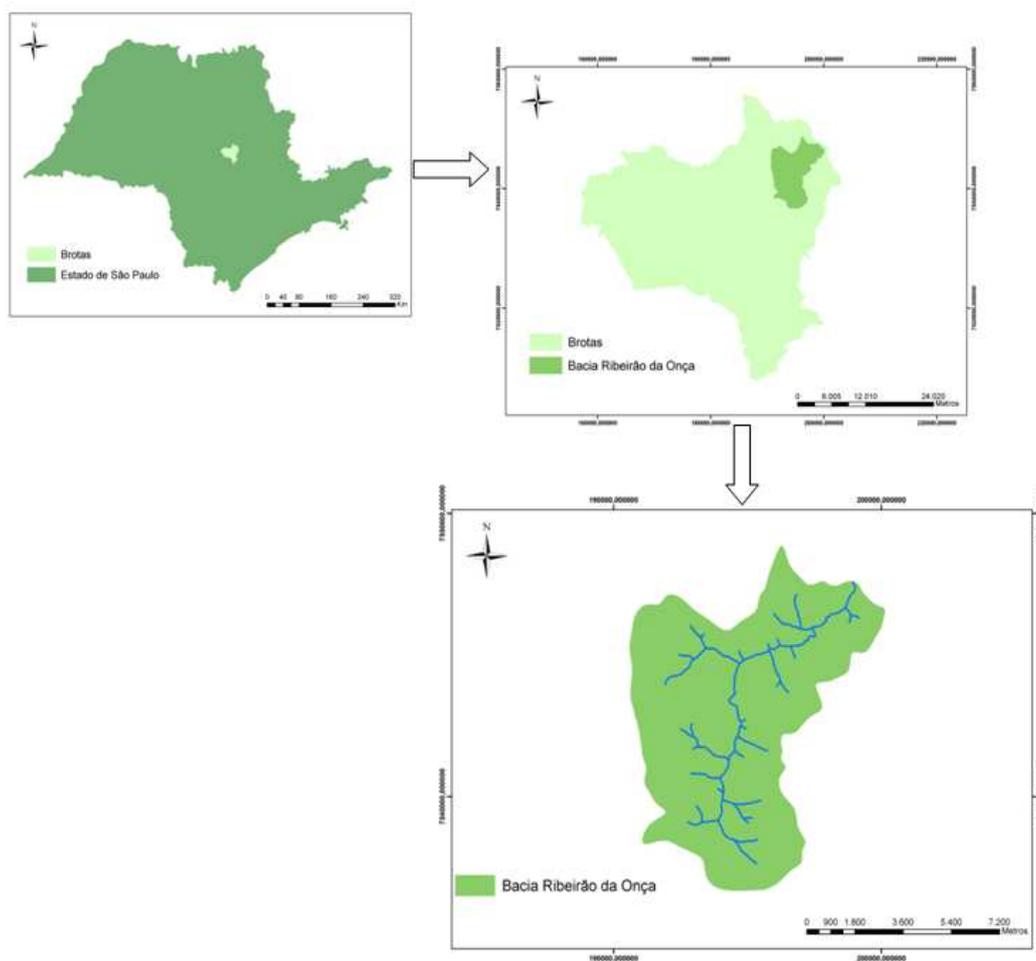


Figura 1: Localização da Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas-SP.

A bacia do Ribeirão da Onça pertence a área de afloramento do Aquífero Guarani e é de extrema importância por apresentar características

representativas típicas da região de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Estado de São Paulo e devido a sua alta representatividade como possível área de recarga do sistema. Uma característica importante desta bacia é situar-se quase inteiramente em uma das regiões de afloramento da Formação Botucatu, podendo fornecer elementos de interesse para o aprofundamento dos conhecimentos sobre o comportamento do Sistema Aquífero Guarani. As regiões de afloramento são áreas estratégicas para a sustentação do Aquífero e têm merecido atenção de diversos trabalhos no sentido de entender a forma e avaliar a quantidade em que essa recarga se dá na região (GIAMPÁ & SOUZA, 1982; MATTOS, 1987; CONTIN NETO, 1987; CORRÊA, 1995, CUNHA, 2003). A Bacia do Ribeirão da Onça está sujeita a utilização econômica, estando exposta a mecanismos potenciais de contaminação decorrente de atividades agrícolas (aplicação de fertilizantes, herbicidas, pesticidas).

4.2. Dados disponíveis

4.2.1. Séries temporais

Em 2004 iniciou-se um projeto financiado pelo SG/OEA, visando o monitoramento hidrogeológico da bacia e em 2006 iniciou-se um projeto de monitoramento hidrológico financiado pelo CNPq/Universal com o intuito de ampliar o conhecimento sobre os mecanismos de recarga do Sistema Aquífero Guarani e sua interação com as águas superficiais.

Os níveis freáticos são observados em 23 poços distribuídos ao longo da bacia com uma frequência quinzenal. Dos 23 poços monitorados na bacia, cinco possuem aparelhos denominados *data-loggers*, possibilitando medições contínuas (a cada 12 horas) do nível destes poços. Tais aparelhos são programados para realizar medições a determinado intervalo de tempo, armazenando-os. Posteriormente, esses dados são enviados para um programa computacional, permitindo o acompanhamento das mudanças no nível do aquífero de maneira mais precisa. Os poços estão localizados em regiões de diferentes ocupações do solo na bacia (CONTIN NETO, 1987; POMPÊO, 1990; ARANTES, 2003; BARRETO, 2006) permitindo observar as

diferenças no comportamento dos níveis freáticos sob diferentes exigências hídricas, como no caso do eucalipto, pastagens e citrus.

Próxima a bacia encontra-se a Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada da Universidade de São Paulo (CRHEA/USP), o que permite a inclusão de dados históricos de precipitação, insolação e infiltração nos estudos de estimativa de evapotranspiração para a realização do balanço hídrico da bacia. Essas séries de dados transformadas em séries de precipitação e evapotranspiração potencial são incorporadas como variáveis explicativas no modelo de oscilação dos níveis freáticos.

4.2.2. Dados auxiliares

Estão disponíveis mapas a geologia da região assim como mapas de solo da área da bacia do Ribeirão da Onça. Além disso, existem dados sobre a granulometria do material do subsolo, fruto do ato de perfuração dos poços (BARRETO, 2006). Essas informações convertidas para formato digital proporcionam planos de informação auxiliar que aumentam a eficácia dos métodos de mapeamento quando incorporadas ao modelo de predição espacial.

4.3. Modelagem dos dados proposta

4.3.1. Modelos de séries temporais regionalizados

Informações sobre a dinâmica espaço-temporal (ST) do lençol freático são importantes para balancear os interesses econômicos e ecológicos quanto ao uso do solo e da água (VON ASMUTH & KNOTTERS, 2004). Em hidrologia, a dinâmica do lençol freático tem sido explicada de diversas formas. No campo das análises de séries temporais, modelos de função de transferência de ruído (Transfer-function noise models-TFN) tem sido aplicados para descrever a relação dinâmica entre a precipitação excedente e as alturas de lençol freático (BOX & JENKINS, 1976; HIPEL AND McLEOD, 1994; TANKERSLEY AND GRAHAM, 1994; VAN GEER AND ZUUR, 1997; YI & LEE, 2003). Basicamente, esses métodos se assemelham a modelos de regressão linear

múltiplos onde o sistema é visto como uma caixa preta que transforma séries de observações de entrada (variáveis explicativas) em séries de saída (variável de resposta, no caso alturas de lençol freático). Para alturas de lençol freático, a relação dinâmica entre a precipitação e as alturas do lençol podem também ser descritas por modelos físico-mecanísticos de fluxo. Entretanto, modelos muito menos complexos como os modelos de função de transferência de ruído geralmente obtêm previsões tão acuradas quanto modelos físico-mecanísticos (KNOTTERS, 2001). Em modelos TFN um ou mais componentes de transferência determinísticos são distinguidos. Esses componentes são aditivos. A componente de transferência descreve a porção do lençol freático que é explicada pelas séries das variáveis de entrada transformadas, enquanto a componente de ruído descreve a estrutura autoregressiva das diferenças entre as alturas de lençol observadas e a soma dos componentes de transferência. A entrada do modelo de ruído é uma série independente de distúrbios com média zero e variância finita e constante, ou seja, um ruído branco.

Os parâmetros do modelo de séries temporais podem ser regionalizados usando informações auxiliares relacionadas as bases físicas do processo (KNOTTERS & BIERKENS, 2000, 2001). Essa metodologia pode ser usada para descrever as variações ST do lençol freático, assumindo que diferenças espaciais na dinâmica do lençol freático são determinadas pela variação espacial das propriedades do sistema, enquanto sua variabilidade temporal é dada pela dinâmica das variáveis de entradas no sistema.

Uma importante aplicação de análises de séries temporais é a estimativa de efeitos de intervenções hidrológicas, como derrubada de florestas, liberação de níveis confinados de aquíferos, operações de bombeamento, construções de barragens ou diques, e assim por diante. Quando as intervenções ocorrem sobre certo período de tempo, podem-se analisar tendências no comportamento do lençol. O objetivo do monitoramento de tendências é justamente estudar os possíveis efeitos de eventos naturais ou feitos pelo homem (DE GRUIJTER et al., 2006). Não somente descobrir se houve uma mudança, mas também descobrir se a mudança foi causada por um evento ou medida específica, dando suporte a tomada de decisão para mitigar vulnerabilidades sociais e agronômicas em períodos de escassez de água.

4.3.2. O modelo PIRFICT

O comportamento de um sistema linear de entrada e saída pode ser completamente caracterizado por sua função de impulso e resposta (IR) (ZIEMER et al., 1998; VON ASMUTH et al., 2002). O modelo PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time) é uma alternativa a modelos TFN em intervalos de tempo discretos apresentada por VON ASMUTH et al. (2002). No modelo PIRFICT o pulso de entrada é transformado em uma série de saída por uma função de transferência em tempo contínuo. Os coeficientes dessa função não dependem da frequência de observação. Assumindo-se linearidade no sistema, uma série de alturas de lençol freático é uma transformação de uma série de precipitação excedente, descontando a evapotranspiração potencial. Essa transformação é completamente governada pela função IR. Para o caso de um sistema linear simples, sem perturbações freáticas, que é influenciado somente pela precipitação excedente, o modelo TFN a seguir (escrito como uma convolução integral) pode ser usado para descrever a relação entre alturas de lençol freático e a precipitação excedente (VON ASMUTH et al., 2002):

$$h(t) = h^*(t) + d + r(t) \quad (1)$$

$$h^*(t) = \int_{-\infty}^t \rho(\tau)\theta(t-\tau)d\tau \quad (2)$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t-\tau)dW(\tau) \quad (3)$$

onde:

$h(t)$ é a altura de lençol freático observada no tempo t [T];

$h^*(t)$ é a altura de lençol freático predita no tempo t creditado ao excedente de precipitação relativa a d [L];

d é o nível de $h^*(t)$ sem a precipitação, ou em outras palavras o nível da drenagem local, relativo a superfície do solo [L];

$r(t)$ é a série dos resíduos [L];

$\rho(t)$ é a intencidade do excedente de precipitação no tempo t [L/T];

$\theta(t)$ é a função de transferencia de impulso/resposta (IR) [-];

$\phi(t)$ é a função IR do ruído [-];

$W(t)$ é um processo de ruído branco contínuo (Wiener) [L], com propriedades $E\{dW(t)\}=0$, $E\{dW(t)^2\}=dt$, $E[dW(t_1)dW(t_2)]=0$, $t_1 \neq t_2$.

O nível da drenagem local d é obtido a partir dos dados como se segue:

$$d = \frac{\sum_{i=0}^N h(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N h^*(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N r(t_i)}{N} \quad (4)$$

sendo N o número de observações de alturas de lençol freático.

A área e forma da função IR depende muito das circunstâncias hidrologias *in situ*. Onde, por exemplo, a condutividade hidráulica é baixa, próximo a drenagens, o lençol freático oscilará rapidamente após uma chuva, gerando uma função com área pequena. $\theta(t)$ é uma função de distribuição Pearson tipo III (PIII df, ABRAMOWITZ & STEGUN, 1964). A opção por esse tipo de função se dá por sua natureza flexível, ajustando-se a uma grande gama de respostas hidrológicas. Assumindo-se linearidade, a componente determinística da dinâmica do lençol freático é completamente descrita pelos momentos da função IR. Nesse caso, os parâmetros podem ser definidos segundo VON ASMUTH et al. (2002):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad (5)$$

$$\phi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_r^2} e^{-\alpha t}$$

onde A , a , n , são os parâmetros da curva ajustada, $\Gamma(n)$ é a função Gamma e α controla a taxa de decaimento de $\phi(t)$ e σ_r^2 é a variância dos resíduos.

A equação 5 e seus parâmetros apresentam sentido físico como descrito em VON ASMUTH & KNOTTERS (2004). As bases físicas são explicadas por funções de transferência de uma série de reservatórios lineares (Nash, 1958). O parâmetro n demonstra o número de reservatórios e a é igual ao inverso do coeficiente de reservatório normalmente usado. Como explicam KNOTTERS & BIERKENS (2000), um simples reservatório linear (PIII df com $n=1$) é igual a

um simples modelo físico de coluna de solo unidimensional, descartando fluxo lateral e o funcionamento da zona não-saturada. O parâmetro extra A é necessário, pois na equação 5 não se aplica a lei de conservação de massas ao se transformar séries de precipitação e evapotranspiração em séries de alturas de lençol freático. O parâmetro A é relacionado com a resistência a drenagem (a área da função IR é igual a razão entre a altura média do lençol freático e a recarga média). O parâmetro a é determinado pelo coeficiente de armazenamento do solo (porosidade) e n pelo tempo de convecção e dispersão da precipitação pela zona não saturada. Entretanto, VON ASMUTH & KNOTTERS (2004) chamam atenção para cuidados ao interpretar esses parâmetros da PIII df quanto a seu sentido físico no processo, uma vez que suas bases são empíricas.

Ao contrario de modelos de séries temporais tradicionais, como modelos autoregressivos, o modelo PIRFICT é capaz de lidar com qualquer frequência de dados por ser contínuo no tempo. Séries temporais geralmente são coletadas manualmente, tendem a ser equidistantes e incompletas (VON ASMUTH et al., 2002). O modelo PIRFICT pode ser calibrado para qualquer frequência de dados disponível, pois opera em um domínio contínuo do tempo e os intervalos de tempo da variável de saída não acoplados aos intervalos de tempo das variáveis de entrada. A série é reconstruída no processo de calibração. Além disso, o modelo PIRFICT oferece uma vantagem adicional ao calibrar modelos TFN em séries irregulares, comparado a modelos autoregressivos combinados ao filtro de Kalman (KNOTTERS & BIERKENS, 2001), já que o formato da função de transferência não é restrita a um formato exponencial (VON ASMUTH & BIERKENS, 2005). Mais detalhes sobre a formulação do modelo podem ser encontrados em VON ASMUTH et al. (2002), VON ASMUTH & KNOTTERS (2004) e VON ASMUTH & BIERKENS (2005), assim como suas aplicações no Cerrado Brasileiro (MANZIONE et al., 2006; MANZIONE, 2007; MANZIONE et al., 2007a; MANZIONE et al., 2007b).

Originalmente formulado para descrever a variação dos níveis freáticos nos diques holandeses, o modelo PIRFICT demonstrou grande potencial de aplicação a realidade brasileira através dos estudos de MANZIONE (2007). A flexibilidade da função de impulso e resposta que estabelece a relação entre as variáveis climáticas e os níveis freáticos (Pearson III df) permite ao modelo se

ajustar a diferentes sistemas hidrológicos, como no Cerrados brasileiros. Sendo assim, o modelo PIRFICT apresenta grandes possibilidades de aplicação a estudos do Sistema Aquífero Guarani. Além do apoio do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, a modelagem proposta conta com o apoio das seguintes instituições: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na pessoa do Dr. Gilberto Câmara, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) na pessoa do Dr. Tiago Carneiro, Instituto ALTEIRA (Holanda) na pessoa do Dr. Martin Knotters, Universidade de Wageningen (Holanda) na pessoa do Dr. Gerard Heuvelink e Universidade de Delft (Holanda) na pessoa do Dr. Jos Von Asmuth.

4.3.2. Simulação do modelo PIRFICT e modelagem de incertezas

Modelos de séries temporais que se utilizam da relação entre a precipitação/evapotranspiração e as oscilações dos níveis freáticos para explicar a dinâmica do lençol freático podem ser simulados por períodos maiores do que aqueles onde os níveis foram observados (KNOTTERS & VAN WALSUM, 1997). Estatísticas sobre alturas do lençol freático são estimadas a partir de séries explicativas extensas, que fornecem informações sobre as condições hidrologias e climatológicas prévias, evitando distúrbios oriundos de eventos isolados que ocorreram durante o período observado.

O modelo PIRFICT contém um componente dinâmico descrevendo a relação entre as variáveis de entrada e saída, explicada física ou empiricamente. Entretanto, a variação do lençol não se restringe somente a essa relação precipitação/alturas de lençol freático. Assim, o modelo contém um componente de ruído que descreve a parte das oscilações não explicada pelos conceitos físicos usados. Esse ruído é utilizado na simulação do modelo PIRFICT, uma vez que há o interesse em estatísticas sobre eventos extremos, como probabilidades de que níveis críticos sejam ultrapassados. Detalhes sobre simulações em recursos hídricos podem ser encontrados em HIPEL & McLEOD (1994).

No presente estudo, a incerteza associada às estimativas do modelo PIRFICT é medida simulando 1000 realizações do modelo e calculando funções de distribuição de probabilidade da variável. A incerteza é levada em consideração

a partir de limites probabilísticos estabelecidos para o manejo do risco associado às estimativas, gerados a partir das FDP's de cada ponto amostral. Os seguintes passos serão seguidos:

- Após calibrar os modelos, series de alturas de lençol freático são extrapoladas para 30 anos. Os resultados são séries determinísticas de alturas de lençol freático.
- Realizações do componente de ruído são geradas por simulação estocástica e adicionadas as series determinísticas de alturas de lençol freático, resultando em realizações de alturas de lençol freático. As realizações do componente de ruído são geradas por amostragem aleatória em uma distribuição normal de média zero e variância constante.
- A partir dos passos anteriores, N realizações da simulação estocástica são gerados. As estatísticas representando as condições hidrológicas prévias são calculadas a partir das FDP's de alturas de lençol freático para cada instante t .

Essa metodologia, apresentada em KNOTTERS (2001), foi aplicada no Cerrado Brasileiro por MANZIONE et al. (2007b), que calcularam riscos de poços secos ou níveis muito superficiais para agricultura no Cerrado para o início da época de cultivos (01 de outubro) e final da época chuvosa (30 de abril). Os limites estabelecidos foram 5% de chances de ultrapassar as alturas estabelecidas, tanto para poços secos como para níveis muito superficiais. Pretende-se utilizar a mesma metodologia para a região de Brotas-SP, adaptando-a para as necessidades locais.

4.3.3. Mapeamento dos níveis freáticos e riscos associados

O mapeamento dos resultados será realizado através de modelos geoestatísticos. O método de krigagem universal (MATHERON, 1969) vem sendo aplicado em inúmeros trabalhos que integram diferentes fontes de informação auxiliar para melhorar as estimativas de variáveis amostradas em menor densidade ou integrar diferentes planos de informação (McKENZIE & RYAN (1999), McBRATNEY et al. (2003), HENGEL et al. (2004), MANZIONE et al. 2007a).

Supõe-se que a variável estimada seja $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$, onde x_i é uma coordenada bidimensional e n é o número de pontos de observação. Em um novo e não visitado ponto x_0 na área, $z(x_0)$ é predito somando a tendência estimada e os resíduos interpolados (Odeh et al., 1994; Hengl et al., 2004):

$$\hat{z}(x_0) = \hat{m}(x_0) + \hat{e}(x_0) \quad (6)$$

onde a tendência m é ajustada por regressão linear, e os resíduos e interpolados usando o algoritmo de krigagem:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k \cdot q_k(x_0) + \sum_{i=1}^n w_i(x_0) \cdot e(x_i); \quad (7)$$

$$q_0(x_0) = 1$$

Aqui, β_k são coeficientes do modelo de tendência, $q_k(x_0)$ é a k th variável explicativa externa (preditiva) no local x_0 , p é o número de variáveis explicativas, $w_i(x_0)$ são os pesos do sistema de krigagem e $e(x_i)$ são os resíduos do modelo de regressão com média zero e variância constante.

No caso de mapeamentos de alturas de lençol freático, serão avaliadas as incorporações no modelo explicativo de informações de imagens de satélites e de modelos digitais de terreno (MDT). Imagens de satélite classificadas quanto ao uso do solo, por exemplo, podem ser associadas à tendências lineares presentes nas séries de alturas do lençol freático, revelando parâmetros sobre a relação uso do solo, exigência hídrica e a recarga do aquífero (Manziona et al., 2006). Já MDT's podem associar padrões geomorfológicos às alturas de lençol estimadas, reduzindo erros na estimativa e incorporando sentido físico as variações no terreno (Manziona et al., 2007b). Em virtude do reduzido número de poços distribuídos na bacia, pretende-se também com esse procedimento melhorar as estimativas, reduzindo a variância do conjunto amostral a partir de sua correlação com as variáveis auxiliares. A integração das informações dos modelos será feita em softwares livre e de domínio público, como o R source (www.rproject.org), gstat (PEBESMA, 2004) e Spring (CÂMARA et al, 1996).

5. RESULTADOS ESPERADOS

A partir desse estudo pretende-se alcançar os seguintes resultados:

- Verificação da adequação dos modelos aplicados aos diferentes períodos hídricos que ocorrem na região, direcionado ao planejamento dos recursos hídricos;
- Inferir a distribuição espaço-temporal dos níveis freáticos da região; e
- Enfatizar medidas de incerteza associadas às estimativas e, conseqüentemente, inferir o risco local e global dos processos em estudo.

Esses resultados servem de base para o planejamento do uso dos recursos hídricos na região. Com isso, espera-se produzir subsídios para delimitação de áreas para instalação de novos campos agrícolas, sistemas de irrigação, implantação de indústrias e captação de água para uso doméstico. As informações sobre os riscos a que as atividades dependentes da água estão expostas servirão para prevenir quebras de produção, falta d'água, alagamentos e outras possíveis situações extremas. Em paralelo, espera-se produzir relatórios, comunicações e artigos sobre os resultados obtidos e, possivelmente publicá-los e apresentá-los em conferências nacionais e internacionais.

PLANO DE ATIVIDADES

- Organização do banco de dados com as informações disponíveis;
- Análise das séries temporais das variáveis exógenas (precipitação e evapotranspiração) e endógenas (alturas de lençol freático) quanto a funções de autocorrelação e autocorrelação cruzada;
- Calibração dos modelos PIRFICT para cada ponto de observação dos níveis freáticos;
- Análise de possíveis tendências e não linearidades presentes nas séries temporais;
- Simulação estocástica do modelo PIRFICT gerando realizações do processo de oscilação dos níveis freáticos;
- Elaboração de uma função de distribuição acumulada e cálculo de estatísticas sobre alturas do lençol freático;
- Mapeamento de riscos associados a alturas críticas do lençol freático, incorporando variáveis relacionadas ao uso do solo e geomorfologia; e
- Apresentação dos resultados em conferências e publicação em periódicos internacionais sobre o tema.

CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

	<i>Mai-Jun 2008</i>	<i>Jul-Ago 2008</i>	<i>Set-Out 2008</i>	<i>Nov-Dez 2008</i>	<i>Jan-Fev 2009</i>	<i>Mar-Abr 2009</i>
Montagem do banco de dados	X	X	X	X	X	X
Levantamento e amostragem de variáveis de interesse	X	X	X	X	X	X
Análise exploratória dos dados	X	X				
Calibração de modelos aos dados disponíveis			X	X	X	X
Calculo de incertezas associadas aos modelos					X	X
Mapeamento das variáveis de interesse					X	X
Elaboração de artigos e relatórios					X	X

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. Handbook of mathematical functions. New York: Dover Publications Inc, 1965. 1046p.
- ARANTES, E. J. - Emprego de Infiltrômetros na Caracterização da Interação Rio e Aquífero. 2006. 88p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP.
- BARRETO, C.E.A.G. Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa. 2006. 245p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP.
- BORGHETTI, N.R.B.; BORGHETTI, J.R.; ROSA FILHO, E.F. Aquífero Guarani, a verdadeira integração dos países do Mercosul. Curitiba, 2004. 214p.
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. Time series analysis: forecasting and control. 2.ed. San Francisco: Holden-Day, 1976. 575 p.
- CAMPOS, N.; STUDART, T. Gestão das águas: princípios e práticas. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2003. 242p.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Computers & Graphics, v.20 n.3, p.395-403, 1996.
- CONTIN NETO, D. Balanço hídrico em Bacia Hidrográfica situada em Região de Recarga do Aquífero Guarani. 1987. 130 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP.
- CORRÊA, U. M. P. Estudo das Águas Subterrâneas das Bacias Hidrográficas dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo. 1995. 107p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP.
- COSTA, W. D. Uso e gestão de água subterrânea. In: Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J. Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. CPRM/REFO-UFPE, Fortaleza, 2000. p. 341-67.
- COTRIM, E.A.T. In: II Jornada Aquífero Guarani, 2007, Bauru.
- CUNHA, A T. - Estimativa experimental da taxa de recarga na zona de afloramento do Aquífero Guarani, para a região de São Carlos – SP. 2003.

117p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP.

DE GRUIJTER, J. J.; BRUS, D. J.; BIERKENS, M. F. P.; KNOTTERS, M. Sampling for natural resources monitoring. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 332p.

GIAMPÁ, C. E. Q.; SOUZA, J. C. Potencial Aqüífero dos Basaltos da Formação Serra Geral no Estado de São Paulo. 2º CABAS, Salvador – BA: p. 3-15, 1982.

GILBOA, Y.; MERO, F.; MARIANO, I. B. The Botucatu Aquifer of South America. Model of an Untapped Continental Aquifer. Journal of Hydrology, v. 29, p.165-179, 1976.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B. M.; STEIN, A. A generic framework for spatial prediction of soil properties based on regression-kriging. Geoderma, v.120, p.75-93, 2004.

HEUVELINK, G. B. M.; PEBESMA, E. J. The aggregation problems in environmental models. Geoderma, v.89, p.47-65, 1999.

HEUVELINK, G. B. M. Error propagation in environmental modelling with GIS. Bristol: Taylor and Francis Inc, 1998. 127p.

HIPEL, K. W.; McLEOD, A. I. Time series modelling of water resources and environmental systems. Amsterdam: Elsevier, 1994. 1013p.

KIANG, C.H. Uso atual e potencial do Sistema Aqüífero Guarani: atividade 3 do Projeto Aqüífero Guarani. Brasil: Agência Nacional de Águas, 2001. Disponível em: http://www.ana.gov.br/guarani/gestão/gest_cbasico.htm. Acesso em: 10 set. 2007.

KNOTTERS, M. Regionalised time series models for water table depths. 2001. 152p. Thesis (PhD in Hydrology) - Wageningen University (WUR), Wageningen, 2001.

KNOTTERS, M.; BIERKENS, M. F. P. Physical basis of time series models for water table depths. Water Resources Research, v. 36, p. 181-188, 2000.

KNOTTERS, M., BIERKENS, M. F. P. Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model. Geoderma, v.103, p.51– 77, 2001.

KNOTTERS, M.; VAN WALSUM, P. E. V. Estimating fluctuation quantities from time series of water-table depths using models with a stochastic component. Journal of Hydrology, v.197, p.25-46, 1997.

- KYRIAKIDIS, C.P.; JOURNEL, A. Geoestatistical time models: a review. *Mathematical Geology*, v.31, n.6, p.651-684, 1999.
- MANOEL FILHO, J. Água subterrânea: História e importância. In: Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J. *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. CPRM/REFO-UFPE, Fortaleza, 2000. p. 3-12.
- MANZIONE, R. L. Regionalized spatio-temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado. 2007. 141p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.
- MANZIONE, R. L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. M. B. Incorporation of ancillary information derived from satellite images applied on environmental variables evaluation. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 13, 2007a, Florianópolis. Proceedings... São José dos Campos: INPE, 2007a. p. 3437-3444. Available at: <<http://martem.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.22.15/doc/3437-3444.pdf>>. Accessed at: 15 Aug. 2007.
- MANZIONE, R. L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. M. B.; VON ASMUTH, J. R.; CÂMARA, G. Predictive risk mapping of water table depths in a Brazilian Cerrado area. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA QUALITY, 5, 2007b, Enschede. Proceedings... Enschede: ITC, 2007b. (CDROM). Available at: <<http://www.itc.nl/issdq2007/proceedings/session%20%20Spatial%20Statistics/Paper%20Manzione.pdf>>. Access at: 15 Jul. 2007.
- MATHERON, G. Le krigeage universel. *Cachiers du Centre de Morphologie Mathematique*, v. 1. Fontainebleau: Ecole des Mines de Paris, 1969. 83p.
- MATTOS, I. S. Aplicação de um Modelo de Balanço Hídrico na Bacia do Rio Jacaré-Guaçu. 1987. 189 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP.
- McBRATNEY, A. B., MENDONÇA-SANTOS, M. L., MINASNY, B. On digital soil mapping. *Geoderma*, v.117, p.3-52, 2003.
- McKENZIE, N.J., RYAN, P.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, v.89, p.67– 94, 1999.
- NASH, J. E. Determining runoff from rainfall. *Proc. Inst. Civ. Eng.*, v.10, p.163-184, 1958.
- OAS/GEF. - Organization of American States / Global Environment Facility.

2001. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Integrado del SAG. Montevideo. 133 p.

PEBESMA, E. J. Multivariable geostatistics in S: the Gstat package. *Computers & Geosciences*, v.30, p.683-691, 2004.

POMPÊO, C. A. Balanço Hídrico da Zona Não-Saturada do Solo na Bacia do Ribeirão da Onça (SP). 1990. 177p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). EESC-USP, São Carlos, SP.

REBOUÇAS, A. C. Recursos hídricos da bacia do Paraná. Estudos de pré viabilidade. 1976. Tese (Livre docência). IG-USP, São Paulo, SP.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Org.) Águas doces no Brasil. Capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Escrituras Editora. 2006. 748p.

REZENDE, J.C. In: II Jornada Aquífero Guarani, 2007, Bauru.

ROCHA, G. A. "O grande manancial do Cone Sul", in *Estudos Avançados*, Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), vol. 11, no. 30, p. 91 – 212, 1997.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Gestão de recursos hídricos. Aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2000. 659p.

SNEPVANGERS, J. J. J. C., HEUVELINK, G. B. M., HUISMAN, J. A. Soil water content interpolation using spatio-temporal kriging with external drift. *Geoderma*, v.112, p.253-71, 2003.

TANKERSLEY, C. D.; GRAHAM, W. D. Development of an optimal control system for maintaining minimum groundwater levels. *Water Resources Research*, v. 30, p. 3171-3181, 1994.

TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.

VAN GEER, F. C.; ZUUR, A. F. An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series. *Journal of Hydrology*, v. 192, p. 65-80, 1997.

VIVES, L.; CAMPOS, H. C. N. S.; CANDELA, L.; GUARRACINO, L. Modelación Del Acuífero Guarani. *Boletín Geológico y Minero*. v. 112, p. 51-64, 2001.

VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P.; MAAS, C. Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions. *Water Resources Research*, v. 38 (12), p. 23.1-23.12, 2002.

VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. *Journal of Hydrology*, v. 296, p. 118-34, 2004.

VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P. Modelling irregularly spaced residual series as a continuous stochastic process. *Water Resources Research*, 41, p. W12404, 2005.

YI, M.; LEE, K. Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. *Journal of Hydrology*, v. 288, p. 272-287, 2003.

ZIEMER, R. E.; TRANTER, W. H.; FANNIN, D. R. *Signals and systems: continuous and discrete*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998. 622p.

**APÊNDICE A – Resumo Expandido Enviado e Aprovado
para Apresentação no Congresso Brasileiro de Engenharia
Agrícola de 2009**

CORRELAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR RADIAÇÃO COM O MÉTODO FAO- PENMAN-MONTEITH

FRANCISCO F. N. MARCUZZO¹; RODRIGO L. MANZIONE²; EDSON
WENDLAND³

¹ Pós-Doutorando, Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. fmarcuzzo@gmail.com

² Prof. Assistente Dr., UNESP/Ourinhos-SP - Av. Vitalina Marcusso, nº 1500, CEP 19910-206. manzione@ourinhos.unesp.br

³ Prof. Associado Dr., Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. ew@sc.usp.br

Escrito para apresentação no
XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola
2 a 6 de agosto de 2009 - Juazeiro-BA/Petrolina-PE

RESUMO: Uma das formas de se verificar o desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial para uma determinada região é compará-los com o método combinado, baseado na radiação e no balanço de massa. O objetivo deste trabalho foi o de analisar a correlação de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial por radiação com o método combinado padrão FAO-Penman-Monteith (1998) para a região central do Estado de São Paulo. Os dados climatológicos foram coletados na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, da Universidade de São Paulo, localizada no município de Itirapina/SP. Foi calculada a evapotranspiração potencial diária para cada método estudado e, em seguida, calculada a correlação diária de cada método com o método padrão da FAO, considerando os dias corridos de janeiro a dezembro do ano de 2008 e entre os meses. Os resultados obtidos demonstraram a seguinte ordem decrescente de correlação com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998): Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982), Turk (1961), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963) e Camargo (1971).

PALAVRAS-CHAVE: climatologia, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise.

CORRELATION OF EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION METHODS BASED ON RADIATION WITH FAO-PENMAN-MONTEITH METHOD

ABSTRACT: One of the ways to verify the performance of different methods to estimate potential evapotranspiration is comparing it with the combined method based on radiation and mass balance. The aim of this work was to analyze the correlation of different theoretical methods with the FAO-Penman-Monteith standard method (1998) for the central region of the State of São Paulo. The climatologic data were collected in the Climatologic Station of the Center for Water Resources and Applied Ecology, of the University of São Paulo, located at Itirapina/SP. The daily potential evapotranspiration was calculated for each method and then calculated the correlation of the results with the FAO standard method. We considered the running days from January to December 2008. The results indicated the following decreasing correlation with the FAO-Penman-Monteith standard method (1998): Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982), Turk (1961), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963) and Camargo (1971).

KEYWORDS: climatology, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise.

INTRODUÇÃO: Segundo Bernardo (1995), a determinação da quantidade de água necessária para as culturas é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação. Sua quantificação é realizada executando-se o balanço hídrico da camada do solo ocupada pelo sistema radicular da cultura, o qual tem, na “evapotranspiração” e na precipitação pluviométrica, seus principais componentes. O processo físico de mudança de estado da água de líquido para vapor pode ser influenciado por qualquer fator climático e controlado pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica por vapor de água e pelo suprimento de água do solo às plantas (ALLEN *et al.*, 1998; PEREIRA *et al.*, 2002). Com isso, verifica-se que processos de estimativa de evapotranspiração que aglomeram a maior quantidade de fatores que interferem no processo tendem a serem mais eficazes. Consultores da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), revisando os métodos de estimativa de evapotranspiração, determinaram que o método FAO-Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) pode ser utilizado como método padrão para estimativa da evapotranspiração potencial, por ser baseado em processos físicos, como o balanço de massa e a radiação, além de acrescentar parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos das plantas. Entretanto, o método FAO-Penman-Monteith requer uma grande quantidade de dados climatológicos, limitando sua aplicação em locais que não dispõem de uma estação meteorológica completa, capaz de fornecer todos os dados necessários. Nesses casos ou na ausência temporária de alguns dados, pode-se utilizar outros métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial, desde que estes possuam boa correlação com o método padrão recomendado pela FAO. Dentro do contexto apresentado, o objetivo deste trabalho foi o de analisar a correlação de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial baseadas na radiação com o método combinado padrão da FAO-Penman-Monteith.

MATERIAL E MÉTODOS: Os dados climatológicos utilizados foram coletados no ano de 2008 no município de Itirapina/SP, na estação meteorológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo, localizada na latitude 22°10'13,2”S e longitude 47°53'56,1” W e a uma altura de 733 metros acima do nível do mar. A vegetação predominante na região era o cerrado, com manchas de mata galeria nos solos mais úmidos. Atualmente, predominam o reflorestamento com *Pinus sp* e áreas de agricultura intensiva, principalmente com cana-de-açúcar e laranja. O clima da região é controlado pelas massas de ar equatorial e tropical com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril).

Neste estudo serão analisados os métodos de Makkink (1957), Turk (1961), Jensen-Haise (1963), Camargo (1971), Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982) e FAO-Penman-Monteith, cujo equacionamento matemático é apresentado a seguir.

Makkink (MAIDMENT, 1993) trabalhando com parâmetros climatológicos da Holanda, desenvolveu a seguinte equação:

$$ETp_{MAK} = \left(CM_1 \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot R_s \right) \cdot CM_2 \quad (1)$$

em que, ETp_{MAK} – evapotranspiração potencial por Makkink ($mm.dia^{-1}$); CM_1 e CM_2 – coeficientes da equação, geralmente 0,61 e -0,012; Δ – derivada da relação (inclinação da curva) entre a pressão de saturação de vapor da água e a temperatura ($mb.^{\circ}C^{-1}$ ou $hPa.^{\circ}C^{-1}$); γ – constante psicrométrica ($mb.^{\circ}C^{-1}$ ou $hPa.^{\circ}C^{-1}$); R_s – energia total incidente sobre a superfície terrestre ($mm.dia^{-1}$).

O método de Turk utiliza, além da radiação, a temperatura e a umidade relativa do ar (MAIDMENT, 1993):

$$Se(UR) \geq 50, \quad ETp_{TUR} = 0,013 \cdot \left(\frac{T}{T+15} \right) \cdot (Rs + 50) \quad (2)$$

$$Se(UR) < 50, \quad ETp_{TUR} = 0,013 \cdot \left(\frac{T}{T+15} \right) \cdot (Rs + 50) \cdot \left(1 + \frac{50-UR}{70} \right) \quad (3)$$

em que, ETp_{TUR} – evapotranspiração potencial por Turc ($mm.dia^{-1}$); T – temperatura média do ar ($^{\circ}C$); UR – umidade relativa do ar (%).

A equação de Jensen & Haise (TUCCI *et al.*, 2004), é uma das mais utilizadas entre os métodos baseados na radiação, fornecendo resultados razoáveis em diferentes condições climáticas:

$$ETp_{J-H} = (0,025 \cdot RS + 0,08) \cdot \frac{T}{59} \quad (4)$$

em que, ETp_{J-H} – evapotranspiração potencial por Jensen & Haise ($mm.dia^{-1}$); RS – radiação solar ($Wat.m^2$).

A equação proposta por Camargo (1971) é expressa por:

$$ETp_{CAM} = 0,01 \cdot Ra \cdot T \cdot Fa_C \quad (5)$$

em que, ETp_{CAM} – evapotranspiração potencial por Camargo ($mm.dia^{-1}$); Ra – radiação solar extraterrestre no topo da atmosfera ($mm.dia^{-1}$); Fa_C – Fator de ajuste, segundo a temperatura (T), sendo 1,00 para T até $23,5^{\circ}C$; 1,05 para T de $23,6$ a $24,5^{\circ}C$; 1,10 para T de $24,6$ a $25,5^{\circ}C$; 1,15 para T de $25,6$ a $26,5^{\circ}C$; 1,20 para T de $26,6$ a $27,5^{\circ}C$ e 1,30 para T superior a $27,5^{\circ}C$.

Evapotranspiração potencial por Priestley-Taylor (1972), consiste em:

$$ETp_{P-T} = \frac{\left[\varphi \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot (R_n - G) \right]}{\lambda} \quad (6)$$

em que, ETp_{P-T} – evapotranspiração potencial por Priestley-Taylor ($mm.dia^{-1}$); φ – coeficiente de Priestley-Taylor (1,26); Δ – derivada da relação (inclinação da curva) entre a pressão de saturação de vapor da água e a temperatura ($kPa.^{\circ}C^{-1}$); γ – constante psicrométrica ($kPa.^{\circ}C^{-1}$); R_n – radiação útil recebida ($MJ.(m^2)^{-1}.dia^{-1}$); G – fluxo de calor recebido pelo solo ($MJ.(m^2)^{-1}.dia^{-1}$); λ – calor latente de evaporação ($MJ.kg^{-1}$).

Hargreaves e Samani (1982) publicaram diversas equações para cálculo da evapotranspiração potencial, porém neste trabalho utilizou-se apenas a equação baseada na radiação solar:

$$ETp_{H-S-RS} = 0,013 \cdot (T + 17,8) \cdot Rs \quad (7)$$

em que, ETp_{H-S-RS} – evapotranspiração potencial por Hargreaves-Samani ($mm.dia^{-1}$).

A evapotranspiração pelo método FAO-Penman-Monteith (1998) foi determinada, conforme metodologia apresentada por Allen *et al.* (1998):

$$ET_{F-P-M} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (8)$$

em que, ET_{F-P-M} – evapotranspiração de referência por FAO-Penman-Monteith ($mm.dia^{-1}$); u_2 – velocidade média do vento coletada a 2 m de altura, ($m.s^{-1}$); e_s – pressão de saturação do vapor d'água, kPa; e_a – pressão atual do vapor d'água (kPa).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Tabela 1 apresenta a média anual de correlação diária entre os métodos analisados. A Figura 1 apresenta a média mensal de correlação diária em cada mês. Observa-se que os métodos de estimativa de evapotranspiração por Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982) e Turk (1961), Makkink (1957) obtiveram as maiores médias de correlação com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998).

TABELA 1. Correlação entre médias anuais dos dados diários para o ano de 2008, de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998).

ANO	Correlação de evapotranspiração - Métodos Baseados na Radiação Solar					
	ET _{PM}	ET _{PT}	ET _{J-H}	ET _{CAM}	ET _{PT}	ET _{H-S-RS}
2008	0,82	0,84	0,65	0,64	0,85	0,85

Já os métodos de Jensen-Haise (1963) e Camargo (1971) ficaram relativamente abaixo da média dos outros métodos estudados, sendo o método de Camargo (1971) o que obteve pior desempenho para os dados climatológicos coletados no ano de 2008.

Nota-se que nos meses com menos pluviosidade no estado de São Paulo (de abril a setembro) há uma menor correlação média geral das equações estudadas com a do método padrão FAO-Penman-Monteith devido às mesmas terem em seus parâmetros grande influência de climas úmidos.

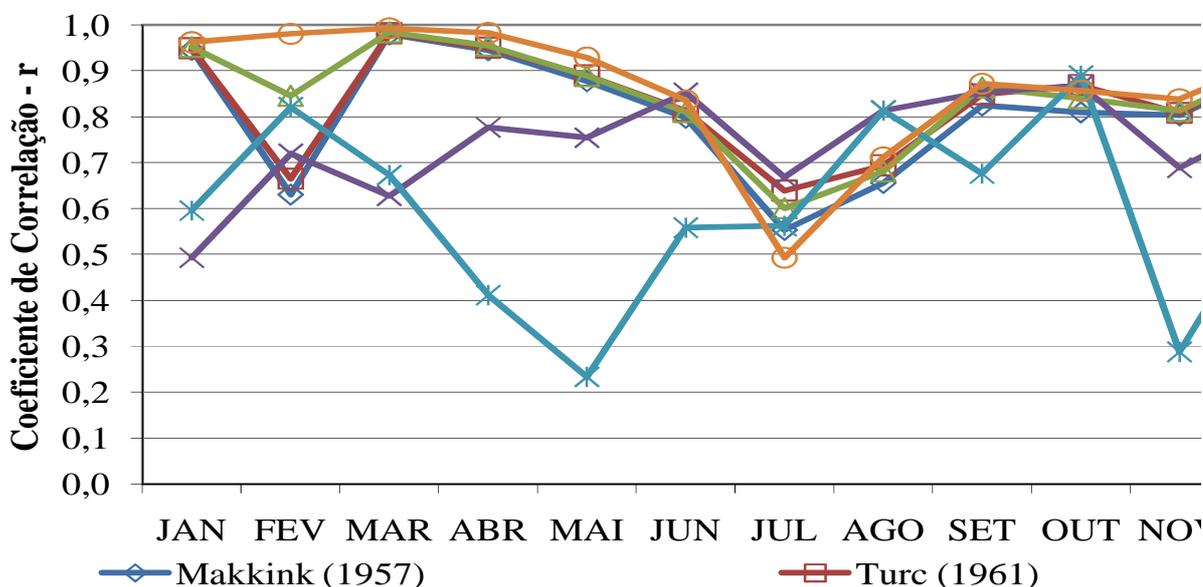


FIGURA 1. Correlação entre os dados diários em cada mês, para o ano de 2008, de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998).

CONCLUSÕES: Concluiu-se que, tanto para os dados diários por mês, quanto para os dados diários do ano todo, houve a seguinte ordem decrescente de correlação com o

método padrão FAO-Penman-Monteith: Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982), Turk (1961), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963) e Camargo (1971).

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq - Brasil (processo 152033/2008-4) e à FAPESP pelo auxílio financeiro que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. 6 ed. Viçosa: UFV, 1995. 657 p.

CAMARGO, A. Paes. *Balanço hídrico no Estado de São Paulo*. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. 24 p. (Boletim, 116)

HARGREAVES, G.H.; Z.A. SAMANI. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineer*, ASCE, 108(IR3):223-230.

MAIDMENT, D.R. (Org.). *et al. Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 1993.

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

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

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, Madison, v.100, n.2, p.81-92, 1972.

TUCCI, C. E. M. (Org.). *et al. Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3ª ed., Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH, 2004. 944 p.

**APÊNDICE B – Resumo Expandido Enviado ao Congresso
Brasileiro de Agrometeorologia de 2009 (Número 1)**

CORRELAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR TEMPERATURA COM O MÉTODO COMBINADO PADRÃO DA FAO

FRANCISCO F. N. MARCUZZO¹; RODRIGO L. MANZIONE²; EDSON
WENDLAND³

¹ Pós-Doutorando, Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. fmarcuzzo@gmail.com

² Prof. Assistente Dr., UNESP/Ourinhos-SP - Av. Vitalina Marcusso, nº 1500, CEP 19910-206. manzione@ourinhos.unesp.br

³ Prof. Associado Dr., Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. ew@sc.usp.br

Apresentado no
XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia
22 a 25 de Setembro de 2009 - Minas Centro, Belo Horizonte, MG

RESUMO: Pode-se examinar a validade de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial, para uma determinada região, comparado-os com o método combinado padrão da FAO, baseado na radiação e no balanço de massa. O objetivo deste trabalho foi analisar a correlação de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial por temperatura com o método combinado padrão FAO-Penman-Monteith para a região central do Estado de São Paulo. Os dados climatológicos foram coletados na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, da Universidade de São Paulo, instalada no município de Itirapina/SP. Foi calculada a evapotranspiração potencial diária e mensal para cada método estudado e, em seguida, calculada a correlação diária de cada método com o método padrão da FAO, considerando os dias corridos de janeiro a dezembro do ano de 2008. Os resultados obtidos mostram a seguinte ordem decrescente de correlação, com o método padrão da FAO: Hargreaves-Samani (1982), Romanenko (1961), Linacre (1977), Kharrufa (1985), Blaney-Criddle (1950), Thornthwaite (1948) e Hamon (1961).

PALAVRAS-CHAVE: climatologia, FAO-Penman-Monteith, Thornthwaite.

CORRELATION OF METHODS TO EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE BASED ON TEMPERATURE WITH FAO STANDARD METHOD

ABSTRACT: The validity of different methods to estimate potential evapotranspiration at a specific region can be evaluated comparing their results with FAO's combined standard method, based on radiation and mass balance. The aim of this work was to analyze the correlation of different methods to estimate potential evapotranspiration using temperature with the FAO-Penman-Monteith standard method for the central region of the State of São Paulo. The climatologic data were collected in the Climatologic Station of the Center for Water Resources and Applied Ecology, of the University of São Paulo, located at Itirapina/SP. The daily and monthly potential evapotranspiration was calculated for each method and compared to the results given by the FAO standard method. We considered the running days from January to December 2008. The results indicated the following decreasing correlation with the FAO-Penman-

Monteith standard method: Hargreaves-Samani (1982), Romanenko (1961), Linacre (1977), Kharrufa (1985), Blaney-Cridle (1950), Thornthwaite (1948) e Hamon (1961).

KEYWORDS: climatology, FAO-Penman-Monteith, Thornthwaite.

INTRODUÇÃO: A determinação da quantidade de água necessária para as culturas é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação (BERNARDO, 1995). Sua quantificação é realizada executando-se o balanço hídrico da camada do solo ocupada pelo sistema radicular da cultura, o qual tem, na “evapotranspiração” e na precipitação pluviométrica, seus principais componentes. Comumente, em estudos de balanço hídrico (SCOZZAFAVA & TALLINI, 2001), são empregados modelos teóricos para estimativa da evapotranspiração. Infelizmente, esses modelos teóricos foram desenvolvidos para o Hemisfério Norte, pressupondo condições de disponibilidade hídrica constante. Para regiões caracterizadas por períodos seco e chuvoso distintos e claramente definidos, esses métodos podem conduzir a erros grosseiros (CUNHA, 2003). Thornthwaite (1948) foi o pioneiro na definição da evapotranspiração potencial. Ele a definiu como sendo a perda de água para a atmosfera através de uma superfície natural coberta com vegetação nativa, sem restrição de água no solo. Quando uma das condições citadas não for atendida, tem-se a evapotranspiração real. Penman (1956), posteriormente, definiu a evapotranspiração potencial como a quantidade de água transferida para a atmosfera, na unidade de tempo, por uma cultura verde, de pequeno porte, em crescimento ativo e sem restrição hídrica. O processo físico de mudança de estado da água de líquido para vapor pode ser influenciado por qualquer fator climático e controlado pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica por vapor de água e pelo suprimento de água do solo às plantas (ALLEN *et al.*, 1998; PEREIRA *et al.*, 2002). Com isso, verifica-se que processos de estimativa de evapotranspiração que aglomeram a maior quantidade de fatores que interferem no processo tendem a ser mais eficazes. Consultores da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), revisando os métodos de estimativa de evapotranspiração, determinaram que o método FAO-Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) pode ser utilizado como método padrão para estimativa da evapotranspiração potencial, por ser baseado em processos físicos, como o balanço de massa e a radiação, além de acrescentar parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos das plantas. Entretanto, o método FAO-Penman-Monteith requer uma grande quantidade de dados climatológicos, limitando sua aplicação em locais que não dispõem de uma estação climatológica completa, capaz de fornecer todos os dados necessários. Nesses casos ou na ausência temporária de alguns dados, pode-se utilizar outros métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial, desde que estes possuam boa correlação com o método padrão recomendado pela FAO. Dentro do contexto apresentado, o objetivo deste trabalho foi analisar a correlação de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial baseadas na temperatura com o método combinado padrão da FAO-Penman-Monteith.

MATERIAL E MÉTODOS: A coleta dos dados climatológicos (Tabela 1) ocorreu no ano de 2008, no município de Itirapina/SP, na estação climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo, localizada na latitude 22°10'13,2"S e longitude 47°53'56,1" W e a uma altura de

733 metros acima do nível do mar. A vegetação predominante na região era o cerrado, com manchas de mata galeria nos solos mais úmidos. Atualmente, predominam o reflorestamento com *Pinus sp* e áreas de agricultura intensiva, principalmente com cana-de-açúcar e frutas cítricas. O clima da região é controlado pelas massas de ar equatorial e tropical com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril). Os dados climatológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, número de horas de insolação, radiação solar e evaporação do tanque classe A) foram coletados diariamente.

TABELA 1. Dados climatológicos mensais do CRHEA, município de Itirapina/SP, em 2008.

Mês	T _{máxima}	T _{mínima}	T _{média}	UR	u ₂	n	n	RS	E _{TCA}
	----- °C -----			%	m.s ⁻¹	h.mês ⁻¹	h.dia ⁻¹	Watt.m ⁻²	mm.mês ⁻¹
		-							
Jan	33,9	11,8	23,2	85,8	2,5	127,5	4,1	424,4	121,1
Fev	33,8	15,8	25,5	79,0	1,4	165,9	5,7	523,8	123,1
Mar	32,4	14,0	23,8	84,9	1,9	217,3	7,0	512,8	126,8
Abr	31,5	10,0	22,7	85,6	1,6	153,6	5,1	303,7	117,1
Mai	28,8	5,0	18,2	81,1	1,3	206,8	6,7	245,8	102,9
Jun	28,4	4,3	17,9	81,1	1,8	191,4	6,4	209,3	88,1
Jul	29,4	4,4	17,8	70,2	2,5	267,0	8,6	278,0	128,7
Ago	31,5	4,7	19,9	74,5	3,8	233,4	7,5	296,9	143,4
Set	33,2	5,0	19,5	73,2	5,0	220,0	7,3	364,7	155,8
Out	35,0	9,8	22,8	76,2	4,9	169,8	5,5	353,9	168,8
Nov	31,2	11,2	22,4	80,2	4,2	217,9	7,3	402,6	182,7
Dez	31,6	12,5	22,4	83,1	3,6	192,3	6,2	352,1	159,2

UR – Umidade relativa média diária; u₂ – Velocidade do vento média diária a 2m de altura; n – Número de horas de insolação; RS – Radiação solar média diária; E_{TCA} – Evaporação do Tanque Classe A.

Neste estudo foram analisados os métodos de Thornthwaite (1948), Blaney-Criddle (1950), Remanenko (1961), Hamon (1961), Linacre (1977), Hargreaves-Samani (1982), Kharrufa (1985) e FAO-Penman-Monteith, cujos equacionamentos matemáticos para estimativa da evapotranspiração potencial são apresentados a seguir.

Thornthwaite (1948) correlaciona informações de latitude e mês do ano com a variável temperatura e possibilita a estimativa da evapotranspiração com a seguinte equação:

$$ETP = Fc.16.(10\frac{T}{I})^a \quad (1)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (\frac{t_i}{5})^{1,514} \quad (2)$$

$$a = 67,5.10^{-8} I^3 - 7,71.10^{-6} I^2 + 0,01791I + 0,492 \quad (3)$$

em que, ETP - evapotranspiração potencial mensal (30 dias e 12 h de luz) (mm.mês^{-1}); T - temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); F_c - fator de correção em função da latitude e do mês (Tucci *et al.*, 2004); t_i - temperatura média do mês ($^{\circ}\text{C}$).

A evapotranspiração pelo método FAO-Penman-Monteith (1998) foi determinada, conforme metodologia apresentada por Allen *et al.* (1998):

$$ETp_{FPM} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (4)$$

em que, ETp_{FPM} - evapotranspiração de referência por FAO-Penman-Monteith (mm.dia^{-1}); Δ - derivada (inclinação da curva) da relação entre a pressão de saturação de vapor da água e a temperatura ($\text{mb.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou $\text{hPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); R_n - radiação útil recebida na superfície da vegetação ($\text{MJ.}(\text{m}^2.\text{dia})^{-1}$); G - fluxo de calor recebido pelo solo ($\text{MJ.}(\text{m}^2.\text{dia})^{-1}$); γ - constante psicrométrica ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$); T - Temperatura média do ar a 2m de altura; u_2 - velocidade média do vento coletada a 2 m de altura, (m.s^{-1}); e_s - pressão de saturação do vapor d'água, kPa; e_a - pressão atual do vapor d'água (kPa).

As equações dos demais métodos utilizados neste estudo (Blaney-Criddle (1950), Remanencko (1961), Hamon (1961), Linacre (1977), Hargreaves-Samani (1982), Kharrufa (1985)) são amplamente difundidas na literatura especializada em evapotranspiração e podem ser encontradas em Maidment (1993), Pereira *et al.* (1997) e Allen *et al.* (1998).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A média anual de correlação diária entre os métodos analisados é apresentada na Tabela 2. A Figura 1 apresenta a média mensal de correlação diária em cada mês e a respectiva variação no decorrer do ano.

TABELA 2. Correlação entre médias anuais dos dados diários para o ano de 2008, de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial por temperatura com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998).

ANO	Correlação de Evapotranspiração - Métodos Baseados na Temperatura						
	ETp _{TW}	ETp _{BC}	ETp _{PRK}	ETp _{PHA}	ETp _{LI}	ETp _{HS-T}	ETp _{KH}
2008	0,56	0,60	0,75	0,46	0,64	0,78	0,61

Analisando a correlação entre médias anuais dos dados diários de evapotranspiração com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998), nota-se que os métodos de estimativa por temperatura que obtiveram melhor desempenho, por ordem decrescente, foram: Hargreaves-Samani (1982), Romanenko (1961), Linacre (1977), Kharrufa (1985), Blaney-Criddle (1950), Thornthwaite (1948) e Hamon (1961).

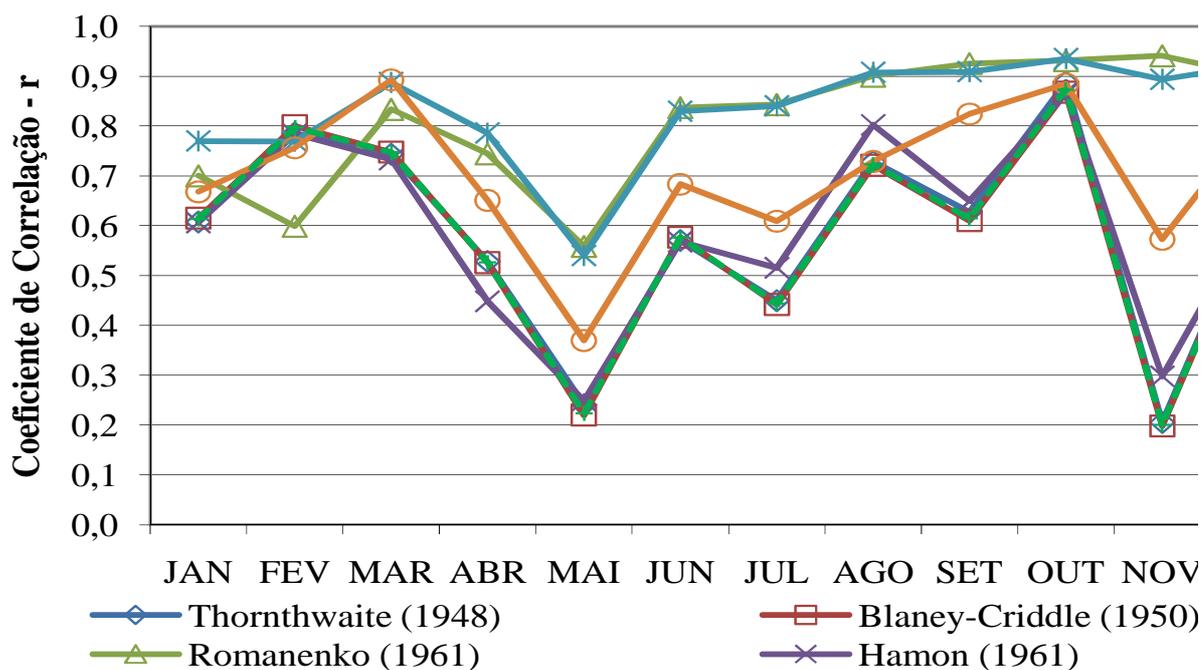


FIGURA 1. Média mensal da correlação entre os dados diários, de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial por temperatura com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998), para o ano de 2008.

Em relação às médias mensais dos dados diários verifica-se que no mês de maio, houve uma menor correlação média geral dos métodos de estimativa estudados com a do método padrão FAO-Penman-Monteith (1998). No mês de maio houve uma queda abrupta da temperatura média diária, enquanto a radiação solar não caiu de forma tão pronunciada, resultando em uma menor correlação com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998).

No mês de novembro houve uma discrepância entre a correlação dos métodos de Romanenko (1961) e Linacre (1977) com o método FAO-Penman-Monteith (1998), resultante do aumento relativo da radiação solar em comparação aos meses vizinhos (Tabela 1).

CONCLUSÕES: Utilizando-se dados diários de um ano inteiro, os métodos mais recomendados de estimativa da evapotranspiração baseados na temperatura que obtiveram uma correlação com o método padrão da FAO acima de 70%, em ordem decrescente, foram: Hargreaves-Samani (1982) e Romanenko (1961). Já quando se utiliza médias mensais de dados diários, os resultados mostram os métodos de Linacre (1977) e Romanenko (1961) como os de melhor correlação média com o método padrão da FAO no decorrer do ano.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq - Brasil (processo 152033/2008-4) e à FAPESP pelos auxílios financeiros que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. 6 ed. Viçosa: UFV, 1995. 657 p.
- CAMARGO, A. Paes. *Balanço hídrico no Estado de São Paulo*. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1971. 24 p. (Boletim, 116)
- CUNHA, A. T. *Estimativa experimental da taxa de recarga na zona de afloramento do aquífero Guarani, para a região de São Carlos-SP*. 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.
- HARGREAVES, G.H.; Z.A. SAMANI. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineer*, ASCE, 108(IR3):223-230.
- MAIDMENT, D.R. (Org.). *et al. Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 1993.
- PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. *Nether. Journal of Agricultural Science*, Cambridge, v. 4, p.9-29, 1956.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- PEREIRA, A.R.; NOVA, N.A.V.; SEDIYAMA, G.C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, Madison, v.100, n.2, p.81-92, 1972.
- SCOZZAFAVA, M.; TALLINI, M. Net infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. *Hydrogeology Journal*, Berlim, v. 9, p. 461-475, 2001.
- STANHILL, G. The use of piche evaporimeter in the calculation of evaporation. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Berkshire, v. 88, p. 80-82, 1962.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, New York, v. 38, n.1, p. 55-94, 1948.
- TUCCI, C. E. M. (Org.). *et al. Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3^a ed., Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH, 2004. 944 p.

**APÊNDICE C – Resumo Expandido Enviado ao Congresso
Brasileiro de Agrometeorologia de 2009 (Número 2)**

SÉRIES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL PARA ESTIMATIVAS DE NÍVEIS FREÁTICOS EM ÁREA DE RECARGA DO AQUIFERO GUARANI

RODRIGO L. MANZIONE¹; FRANCISCO F. N. MARCUZZO²; EDSON WENDLAND³

¹ Eng. Agrônomo, Prof. Assistente Dr., UNESP/Ourinhos-SP - Av. Vitalina Marcusso, nº 1500, CEP 19910-206, Fone: (14) 3302-5700 manzione@ourinhos.unesp.br

² Eng. Agrônomo, Pós-Doutorando, Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. fmarcuzzo@gmail.com

³ Eng. Civil, Prof. Associado Dr., Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP.

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia
22 a 25 de Setembro de 2009 - Minas Centro, Belo Horizonte, MG

RESUMO: Para estimar flutuações de lençóis freáticos, modelos de funções de transferência de ruído utilizam-se de séries de dados de entrada, no caso precipitação e evapotranspiração potencial, que são transformados em séries de dados de saída, no caso níveis freáticos. As séries observadas de precipitação e alturas de lençol freático possuem menos incerteza que as séries de evapotranspiração potencial, que podem ser estimadas por diversos métodos. O objetivo desse trabalho foi comparar o método proposto pela FAO, FAO Penman-Monteith (1998) com o método original proposto por Penman-Monteith (1965) para estabelecer a relação entre o excedente/déficit hídrico e os níveis freáticos observados em um poço em área de recarga do sistema aquífero Guarani. Para isso utilizou-se o modelo PIRFICT que incorpora sentido físico as análises através do ajuste de funções de impulso e resposta que descrevem a dinâmica do sistema aquífero em função de variáveis climatológicas. Verificou-se que a utilização de séries temporais estimadas por ambos os métodos obtiveram bons resultados na calibração do modelo, entretanto não foi possível ajustar uma função de impulso e resposta para o método FAO Penman-Monteith pela natureza ruidosa da série.

PALAVRAS-CHAVE: séries temporais, modelo PIRFICT, água subterrânea.

POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION SERIES TO ESTIMATE WATER TABLE DEPTHS IN A GUARANI AQUIFER SYSTEM RECHARGE AREA

ABSTRACT: To estimate water table depths, transfer function noise models use time series as input, in this case precipitation and potential evapotranspiration, which are transformed into output series, in this case water table depths. The observed precipitation and water table depths series have less uncertainty than potential evapotranspiration series that can be estimated by several different methods. The aim of this work was to compare the potential evapotranspiration estimation method proposed by FAO Penman-Monteith (1998) with the original method proposed by Penman-Monteith (1965) to establish the relationship between precipitation surplus/deficit and

the water table depths observed in a well in a Guarani Aquifer System recharge area. For this purpose we use the so-called PIRFICT model that incorporate physical sense to the analysis adjusting impulse response functions which describe the dynamics of the aquifer system based on climatological inputs. We verify good model calibrations using the time series estimated by both methods. However, was not possible to adjust impulse response functions to FAO Penman-Monteith that generates noisy series.

KEYWORDS: time series, PIRFICT model, groundwater.

INTRODUÇÃO: Informações sobre a dinâmica de níveis freáticos são importantes para balancear os interesses econômicos e ecológicos quanto ao uso do solo e da água (Von Asmuth e Knotters, 2004). Em hidrologia, a dinâmica do lençol freático tem sido explicada de diversas formas. No campo das análises de séries temporais, modelos de função de transferência de ruído (transfer-function noise models-TFN) têm sido aplicados para descrever a relação dinâmica entre a precipitação excedente e os níveis freáticos (Box e Jenkins, 1976; Hipel e McLeod, 1994; Van Geer e Zuur, 1997; Yi e Lee, 2003). Nesse tipo de modelo, o sistema transforma séries de observações de entrada (variáveis explicativas, como precipitação, evapotranspiração potencial) em séries de saída (variável de resposta, no caso níveis freáticos). A relação dinâmica entre a precipitação e os níveis freáticos pode também ser descrita por modelos físico-mecanísticos de fluxo. Entretanto, modelos muito menos complexos como os modelos de função de transferência de ruído são uma opção elegante de modelar esse tipo de fenômeno e geralmente obtêm predições tão acuradas quanto modelos físico-mecanísticos (Knotters e Bierkens, 2001). O objetivo desse trabalho foi comparar o método para estimativa da evapotranspiração potencial FAO Penman-Monteith (1998) com o método Penman-Monteith (1965) para estabelecer a relação entre o excedente/déficit hídrico e os níveis freáticos observados em um poço localizado em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), através do modelo PIRFICT (Von Asmuth et al., 2002).

MATERIAL E MÉTODOS: A coleta dos dados climatológicos ocorreu na estação do CRHEA/EESC/USP, no município de Itirapina/SP, localizada na latitude 22°10'13,2" S e longitude 47°53'56,1" O e a uma altura de 733m acima do nível do mar. A vegetação predominante na região era o cerrado, com manchas de mata galeria nos solos mais úmidos. Atualmente, predominam reflorestamento e áreas de agricultura intensiva, principalmente com cana-de-açúcar e citros. Atuam na região massas de ar equatorial e tropical com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril). Os dados climatológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, número de horas de insolação, radiação solar e evaporação do tanque classe A) foram coletados diariamente, assim como o acompanhamento da precipitação.

Neste estudo foram analisados os métodos combinados para estimativa da evapotranspiração potencial de Penman-Monteith (1965) e o método padrão proposto pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação FAO-Penman-Monteith (1998). Os equacionamentos matemáticos são apresentados a seguir. Monteith

(1965) apresenta o método conhecido como Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração potencial como:

$$ET_{PM} = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Delta(R_n + G) + 0,0864 \rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_d}{r_a}\right)} \right] \quad (1)$$

em que, ET_{PM} é a evapotranspiração de referência por Penman-Monteith (mm.dia^{-1}); λ ($2,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$) é o calor latente de evaporação da água; Δ (kPa.K^{-1}) é o gradiente da curva de saturação de vapor d'água como uma função da temperatura do ar; R_n ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o saldo de radiação; G ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o fluxo vertical de calor no solo; ρ_a (kg.m^{-3}) é a densidade do ar; D (kPa) é o déficit de pressão de vapor d'água; c_p ($1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) é o calor específico do ar; γ (kPa.K^{-1}) é a constante psicrométrica; r_a (s.m^{-1}) é a resistência aerodinâmica; r_d (s.m^{-1}) é a resistência do dossel da planta e 0,0864 é o fator de conversão de (J.s^{-1}) para (MJ.dia^{-1}).

A evapotranspiração pelo método FAO-Penman-Monteith (1998) foi determinada, conforme metodologia apresentada por Allen et al. (1998):

$$ET_{FAO-PM} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2)$$

em que, ET_{FAO-PM} é a evapotranspiração de referência por FAO-Penman-Monteith (mm.dia^{-1}); Δ ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$) é o gradiente da curva de saturação de vapor d'água como uma função da temperatura do ar, R_n ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o saldo de radiação; G ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o fluxo vertical de calor no solo; γ ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$) é a constante psicrométrica; T é a temperatura diária média a 2m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade média do vento registrada a 2 m de altura, (m.s^{-1}); e_s é a pressão de saturação do vapor d'água, kPa; e_a é a pressão atual do vapor d'água (kPa).

Para estimativa dos níveis freáticos foi utilizada a séries de dados de um poço de monitoramento com frequência quinzenal localizado na bacia experimental do Ribeirão da Onça, Brotas/SP, a aproximadamente 10 km da estação climatológica. O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçu, afluente do Rio Tietê pela margem direita, entre os paralelos 22°10' e 22°15' latitude S e entre os meridianos 47°55' e 48°00' longitude O. A região pertence à área de afloramento do Aquífero Guarani e é de extrema importância por devido a sua alta representatividade como possível área de recarga do sistema. A série compreende o período de 02 de março de 2004 a 04 de abril de 2009. Supõe-se que o comportamento de um sistema linear de entrada e saída pode ser completamente caracterizado por sua função de impulso e resposta (IR) (Ziemer et al., 1998; Von Asmuth et al., 2002). Para isso utiliza-se o modelo PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time), uma alternativa a modelos de função de transferência de ruído em intervalos de tempo discretos apresentada por Von Asmuth et al. (2002) e aplicada por Manzione (2007) nos Cerrados Brasileiros. No modelo PIRFICT o pulso de entrada é transformado em uma série de saída por uma função de transferência. Assumindo-se linearidade no sistema, uma série de níveis freáticos é uma transformação de uma série de precipitação excedente, descontando a evapotranspiração potencial. Essa transformação é completamente governada pela função IR. Para o caso de um sistema linear simples, sem perturbações, que é influenciado somente pela

precipitação excedente/déficit, o modelo a seguir descreve a relação entre níveis freáticos e a precipitação excedente (Von Asmuth et al., 2002):

$$h(t) = h^*(t) + d + r(t) \quad (3)$$

$$h^*(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta(t-\tau)d\tau \quad (4)$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t-\tau)dW(\tau) \quad (5)$$

em que $h(t)$ é o nível freático observado no instante t [T]; $h^*(t)$ é o nível freático previsto no instante t creditado ao excedente de precipitação relativo a d [L]; d é o nível de $h^*(t)$ sem a influência da precipitação ou, em outras palavras, o nível da drenagem local, relativo à superfície do solo [L]; $r(t)$ é a série dos resíduos [L]; $p(t)$ é a intensidade do excedente de precipitação no instante t [L/T]; $\theta(t)$ é a função de transferência de impulso/resposta (IR) [-]; $\phi(t)$ é a função IR do ruído [-]; e $W(t)$ é um processo de ruído branco contínuo (Wiener) [L], com propriedades $E\{dW(t)\}=0$, $E[\{dW(t)\}^2]=dt$, $E[dW(t_1)dW(t_2)]=0$, $t_1 \neq t_2$.

O nível da drenagem local d é obtido a partir dos dados como se segue:

$$d = \frac{\sum_{i=0}^N h(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N h^*(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N r(t_i)}{N} \quad (6)$$

em que N é o número de observações de nível freático.

A área e forma da função IR dependem das condições hidrologias *in situ*. $\theta(t)$ é uma função de distribuição Pearson tipo III (PIII df, Abramowitz e Stegun, 1964). A opção por esse tipo de função dá-se por sua natureza flexível, ajustando-se a uma grande gama de respostas hidrológicas. Assim, os parâmetros podem ser definidos segundo Von Asmuth et al. (2002):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad \text{e} \quad \phi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_r^2} e^{-\alpha t} \quad (7)$$

em que A , a , n , são os parâmetros da curva ajustada, $\Gamma(n)$ é a função Gamma, α controla a taxa de decaimento de $\phi(t)$ e σ_r^2 é a variância dos resíduos.

A função PIII df assume formas variando gradualmente de curva exponencial à uma gaussiana, conforme os valores de seus parâmetros. Os parâmetros apresentam sentido físico, como descrito em Von Asmuth e Knotters (2004). O parâmetro A é relacionado com a resistência à drenagem (a área da função IR é igual à razão entre nível freático e a recarga média). O parâmetro a é determinado pelo coeficiente de armazenamento do solo (porosidade) e n pelo tempo de convecção e dispersão da percolação através da zona não saturada. As bases físicas são explicadas por funções de transferência de uma série de reservatórios lineares. O parâmetro n demonstra o número de reservatórios e a é igual ao inverso do coeficiente de reservatório normalmente usado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Figura 1 apresenta as séries de ET_{PM} e ET_{FAO-PM} para o período de 02 de março de 2004 a 04 de abril de 2009. A série estimada ET_{FAO-PM} apresentou maiores valores se comparada a serie ET_{PM} . A variação dessa série no período de monitoramento também mostrou-se mais ruidosa, com mudanças abruptas nos valores em função das variáveis climatológicas. Já ET_{PM} apresentou uma variação mais suave e com menores valores totais.

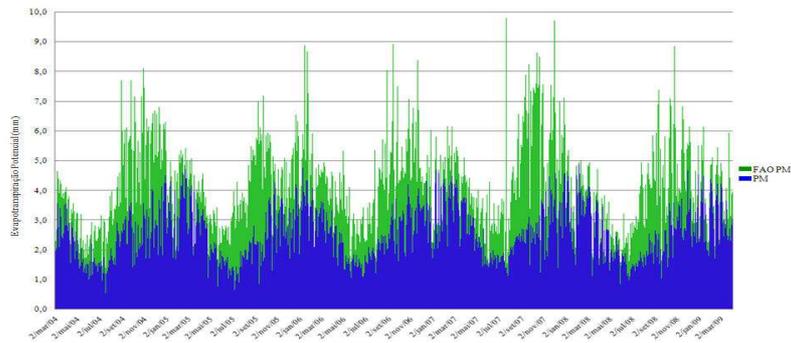


Figura 1 – Séries de ET_{PM} e ET_{FAO-PM} de 02 de março de 2004 a 04 de abril de 2009.

Os resultados da calibração do modelo PIRFICT para os diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial analisados são apresentados na Tabela 1. A série ET_{FAO-PM} apresentou uma boa calibração do modelo, mas os parâmetros da função IR na foram ajustados de maneira adequada, mostrando além de valores não realísticos, altos desvios padrões. Já a série ET_{PM} além de apresentar uma calibração bem próxima de ET_{FAO-PM} , com erros apenas 5 cm maiores (RMSE) e valores realistas dos coeficientes da função IR. O ajuste do modelo PIRFICT as séries observadas de níveis freáticos é apresentada na Figura 2.

Tabela 1 – Resultados da calibração do modelo PIRFICT para as séries de ET_{PM} e ET_{FAO-PM} .

Método	R^2	RMSE	A	a	n	E	α
ET_{PM}	73,28	0,359	1615	0,00576	1,539	1,93	123,87
			(270)	(0,0013)	(0,11)	(0,2)	(16,50)
ET_{FAO-PM}	80,15	0,309	1149000	0,00001	1,193	0,02	123,01
			(13000000)	(0,0001)	(0,03)	(0,2)	(22,04)

R^2 =percentual da variância explicada pelo modelo; RMSE=raiz do erro quadrático médio (m); A=resistência à drenagem (dias); a= coeficiente de armazenamento no solo (1/dias); n=tempo de convecção/dispersão (dias); E=fator de evapotranspiração (-); α =decaimento(-)

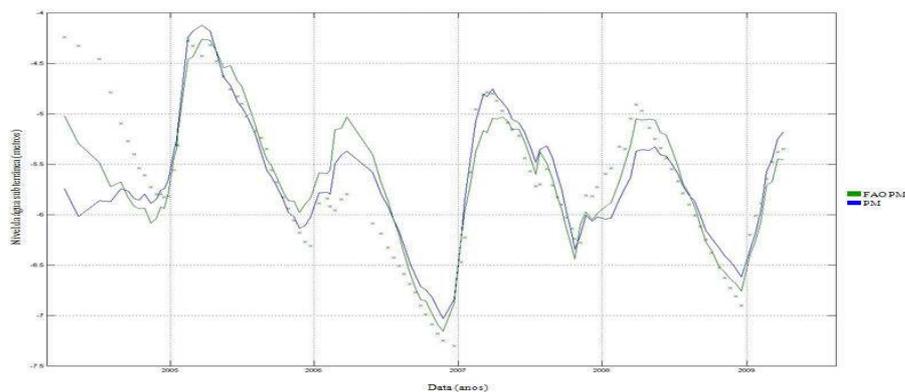


Figura 2 – Níveis freáticos simulados pelo modelo PIRFICT para séries de ET_{PM} e ET_{FAO-PM} .

CONCLUSÕES: Ambos os métodos de estimativa de evapotranspiração potencial utilizados no modelo PIRFICT para calcular níveis freáticos apresentaram bons resultados. O método Penman-Monteith caracterizou melhor a dinâmica do sistema através de funções de IR por apresentar uma estimativa mais suave das variações diárias de evapotranspiração potencial, uma vez que se trata de um sistema aquífero de resposta lenta e memória muito grande.

AGRADECIMENTOS: FAPESP (processo 2009/05204-8) e CNPq (processo 152033/2008-4) pelos auxílios financeiros que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. Handbook of mathematical functions. New York: Dover Publications Inc, 1964. 1046p.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. Time series analysis: forecasting and control. 2.ed. San Francisco: Holden-Day, 1976. 575 p.
- HIPEL, K. W.; McLEOD, A. I. Time series modelling of water resources and environmental systems. Amsterdam: Elsevier, 1994. 1013p.
- KNOTTERS, M., BIERKENS, M. F. P. Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model. Geoderma, v.103, p.51– 77, 2001.
- MANZIONE, R. L. Regionalized spatio-temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado. 2007. 141p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: Symposia of the Society for Experimental Biology, 19, 1965. p. 205-234.
- VAN GEER, F. C.; ZUUR, A. F. An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series. Journal of Hydrology, v. 192, p. 65-80, 1997.
- VON ASMUTH, J. R.; BIERKENS, M. F. P.; MAAS, C. Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions. Water Resources Research, v. 38 (12), p. 23.1-23.12, 2002.
- VON ASMUTH, J. R.; KNOTTERS, M. Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach. Journal of Hydrology, v. 296, p. 118-34, 2004.
- YI, M.; LEE, K. Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. Journal of Hydrology, v. 288, p. 272-287, 2003.
- ZIEMER, R. E.; TRANTER, W. H.; FANNIN, D. R. Signals and systems: continuous and discrete. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998. 622p.

**APÊNDICE D – Trabalho Completo Enviado ao Simpósio
Brasileiro de Recursos Hídricos de 2009 (Número 1)**

BALANÇO HÍDRICO UTILIZANDO DIFERENTES METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR TEMPERATURA

Francisco F. N. Marcuzzo¹; Rodrigo L. Manzione² & Edson Wendland³

RESUMO – A importância do balanço hídrico recai sobre identificar os períodos de excesso ou escassez de água e, principalmente, quantificar deficiências hídricas para cultivos agrícolas, geração de energia elétrica, abastecimento humano, recarga de aquíferos, entre outros. O objetivo deste trabalho foi o de apresentar um estudo de balanço hídrico calculado utilizando-se de seis diferentes metodologias de estimativa de evapotranspiração por temperatura. Os dados utilizados foram do ano de 2008, do município de Itirapina/SP, coletados na estação climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo, localizada na latitude 22°10'13,2"S e longitude 47°53'56,1" W e a uma altura de 733 metros acima do nível do mar. Como resultados são apresentados gráficos do comportamento dos diferentes métodos de evapotranspiração estudados e as respectivas análises detalhadas dos diferentes componentes dos balanços hídricos calculados. Conclui-se que, para os dados climatológicos da região estudada, a metodologia para estimativa de evapotranspiração a ser selecionado possui grande influência no resultado final do extrato do balanço hídrico.

ABSTRACT – The importance of water balance lies on identify periods of water excess or shortage, and particularly quantify water deficits for agricultural crops, electricity generation, human supply, aquifers recharge, and others. The aim of this work was present a water balance study calculated using six different methods to estimate evapotranspiration by temperature. The data used were from the year of 2008, in the municipality of Itirapina/SP. It was collected in the climatological station of the Center for Water Resources and Applied Ecology (CRHEA) in Department of Hydraulic and Sanitation, Engineering School of São Carlos, belonging to the University of São Paulo, located at latitude 22 ° 10'13, 2 "S and longitude 47 ° 53'56, 1" W and a height of 733 meters above sea level. The results are presented as graphics of the behavior of different methods of evapotranspiration studied and their detailed analysis of the different components of water balance calculated. We concluded that for the climatological data of the study region, the methodology for evapotranspiration estimation to be selected has a great influence on the outcome of the water balance extract.

Palavras-chave: Thornthwaite & Matter, Blaney-Criddle, Linacre.

¹ Eng. Agrônomo, Pós-Doutorando, Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. fmarcuzzo@gmail.com

² Engº Agrônomo, Professor Doutor, UNESP/Ourinhos. Av. Vitalina Marcusso, nº1500, CEP 19910-206 - Ourinhos/SP. manzione@ourinhos.unesp.br

³ Engº Civil, Professor Doutor, Depto. de Hidráulica e de Saneamento, EESC, USP, CEP: 13566-590 - São Carlos/SP, ew@sc.usp.br.

1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos disponíveis no Brasil são abundantes, mas nem sempre bem distribuídos e estudados nas diferentes regiões do país. Trata-se de melhor distribuí-los no espaço e no tempo, e principalmente de preservá-los planejando e projetando de forma a aperfeiçoar os sistemas de aproveitamento de recursos hídricos. Para isto, deve-se em primeiro lugar conhecer-se a hidrologia de sistemas. Deve-se antes de tudo observar os fenômenos hidrológicos peculiares às bacias em estudo e a partir dos dados observados, elaborarem estudos compreensivos de forma a caracterizar e prever seu comportamento objetivando a sua melhor utilização (Swami & Mattos, 1975).

Em ambiente de múltiplos usos, o bom conhecimento das necessidades dos diversos usuários e das disponibilidades hídricas é fundamental para uma boa gestão; entretanto, as incertezas hidrológicas, as variações das demandas e o grande número de variáveis representativas dos processos físicos, químicos e biológicos, conferem elevado nível de complexidade à análise dos sistemas de recursos hídricos (Carvalho *et al.*, 2009).

Segundo Medeiros (2002), em um projeto de irrigação, a evapotranspiração da cultura (ET_c) é a variável mais importante, pois indica a quantidade de água a ser repostada a cultura de modo a garantir um retorno satisfatório ao produtor. O mesmo autor também cita que, sendo a ET_c função da evapotranspiração de referência (ET_o), a determinação desta passa a ser importante nos projetos, no planejamento e no manejo da irrigação.

De acordo com Pereira *et al.* (1997) o balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento de perda da água do solo e resulta da aplicação do princípio de conservação da massa em um volume de solo vegetado. A variação do armazenamento representa o balanço entre as entradas (precipitação) e saídas (evaporação e transpiração) de água do volume de controle, em um intervalo de tempo. Os resultados de evapotranspiração, precipitação e o respectivo balanço hídrico podem ser utilizados no zoneamento agroclimático, na determinação da demanda hídrica potencial das culturas irrigadas, no planejamento da pesquisa e para identificar o regime hídrico de uma região (Aguilar *et al.*, 1986).

Mello *et al.* (1996) averiguaram que existem entre 50 a 60 equações para a simulação da evapotranspiração. As equações são baseadas em dados meteorológicos para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o). Como constatou Bernardo *et*

al. (2005) alguns dos métodos mais precisos são de difícil aplicação, não só pela complexidade dos cálculos, mas, também, por exigirem um grande número de dados meteorológicos, nem sempre disponíveis.

O objetivo deste trabalho foi o de apresentar um estudo do balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Matter (1955) utilizando-se de seis diferentes metodologias de estimativa de evapotranspiração por temperatura. Executa-se, no final do trabalho, uma análise dos resultados com base no princípio de conservação de massa, de modo a se aferir se a metodologia de estimativa de evapotranspiração se enquadrava no balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Matter (1955).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Dados utilizados e a localização da estação climatológica

A coleta dos dados climatológicos (Tabela 1) ocorreu durante o ano de 2008, no município de Itirapina/SP, na estação climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo. O CRHEA localizada-se na latitude 22°10'13,2"S e longitude 47°53'56,1" W, a uma altura de 733 metros acima do nível do mar.

Tabela 1 - Dados climatológicos mensais coletados na estação climatológica do campus avançado da USP no município de Itirapina/SP, em 2008.

Mês	T _{máxima}	T _{mínima}	T _{média}	UR	u ₂	n	n	RS	E _{TCA}	P
	----- °C -----	----- °C -----		%	m.s ₁ ⁻¹	h.mês ₁ ⁻¹	h.dia ₁ ⁻¹	Watt.m ₂ ⁻¹	----- mm.mês ⁻¹ -----	
Jan	33,9	11,8	23,2	85,8	2,5	127,5	4,1	424,4	121,1	270,4
Fev	33,8	15,8	25,5	79,0	1,4	165,9	5,7	523,8	123,1	157,0
Mar	32,4	14,0	23,8	84,9	1,9	217,3	7,0	512,8	126,8	228,4
Abr	31,5	10,0	22,7	85,6	1,6	153,6	5,1	303,7	117,1	98,6
Mai	28,8	5,0	18,2	81,1	1,3	206,8	6,7	245,8	102,9	44,1
Jun	28,4	4,3	17,9	81,1	1,8	191,4	6,4	209,3	88,1	43,9
Jul	29,4	4,4	17,8	70,2	2,5	267,0	8,6	278,0	128,7	0,0
Ago	31,5	4,7	19,9	74,5	3,8	233,4	7,5	296,9	143,4	63,0
Set	33,2	5,0	19,5	73,2	5,0	220,0	7,3	364,7	155,8	38,5
Out	35,0	9,8	22,8	76,2	4,9	169,8	5,5	353,9	168,8	100,5
Nov	31,2	11,2	22,4	80,2	4,2	217,9	7,3	402,6	182,7	98,8
Dez	31,6	12,5	22,4	83,1	3,6	192,3	6,2	352,1	159,2	177,2

UR - Umidade relativa média diária; u_2 - Velocidade do vento média diária a 2m de altura; n - Número de horas de insolação; RS - Radiação solar média diária; E_{TCA} - Evaporação do Tanque Classe A; P - Precipitação.

A vegetação predominante na região era o cerrado, com manchas de mata galeria nos solos mais úmidos. Atualmente, predominam o reflorestamento com *Pinus sp* e áreas de agricultura intensiva, principalmente com cana-de-açúcar e citros. O clima da região é controlado pelas massas de ar equatorial e tropical com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril). Os dados climatológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, número de horas de insolação, radiação solar e evaporação do tanque classe A) foram coletados diariamente. Os métodos de cálculo de evapotranspiração utilizados nesse estudo são descritos a seguir.

2.2 Metodologias de estimativa de evapotranspiração por temperatura

2.2.1 Thornthwaite (1948)

O método correlaciona informações de latitude e mês do ano com a variável temperatura e possibilita a estimativa da evapotranspiração com a seguinte equação:

$$ETP = Fc 16 \left(10 \frac{T}{I}\right)^a \quad (1)$$

em que, ETP – evapotranspiração potencial para meses de 30 dias e comprimentos de 12 horas (mm.mês^{-1}); T – temperatura média mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$); Fc – fator de correção em função da latitude e mês do ano (Quadro 1);

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{t_i}{5}\right)^{1,514} \quad (2)$$

$$a = 67,5 \cdot 10^{-8} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-6} I^2 + 0,01791 I + 0,492 \quad (3)$$

em que, T – média das temperaturas dos meses analisados ($^{\circ}\text{C}$); t_i – temperatura média do mês ($^{\circ}\text{C}$).

Quadro 1 - Fator de correção para a evapotranspiração potencial de Thornthwaite em função da latitude 22 e mês do ano (Tucci *et al*, 2004 - Pág. 286).

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,98	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18

Berlato & Molion (1981) citam que em regiões onde o clima difere daquele onde a equação foi desenvolvida, os resultados obtidos não são satisfatórios. Pressupõe-se que

isso ocorra porque o método não contempla explicitamente a umidade do ar. Assim, deve-se ter muita cautela ao utilizar este método, particularmente em climas de verões úmidos e invernos secos. A equação de Thornthwaite ganhou popularidade mundial mais pelo fato de necessitar somente de dados de temperatura do ar (informação disponível em grande número de estações meteorológicas) do que pela sua precisão.

2.2.2 Blaney-Criddle (1950)

Descrito por Kijne (1978), este método foi desenvolvido originalmente para estimativas de uso consultivo em regiões semi-áridas, baseado na suposição de que a disponibilidade de água para a planta em crescimento não é um fator limitante. A equação é apresentada a seguir:

$$ETP = (0,457 T + 8,13)p \quad (4)$$

em que, ETP – evapotranspiração potencial (mm.d^{-1}); T – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); p – porcentagem diária de horas de luz, tabulada no Quadro 2 (Tucci *et al.*, 2004).

Quadro 2 - Proporção média diária (p) de horas de luz na latitude 22 (Tucci *et al.*, 2004 - Pág. 286).

JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30

2.2.3 Hamon (1961)

O método desenvolvido por Hamon (1961) é expresso pela equação abaixo:

$$ETP = 0,55 \left(\frac{N}{12} \right)^2 \left(\frac{4,95 \exp^{0,062 T}}{100} \right) 25,4 \quad (5)$$

em que, ETP – evapotranspiração potencial (mm.d^{-1}); T – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); N – insolação máxima diária teórica em função da latitude e época do ano, calculada pela seguinte equação:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (6)$$

em que, ω_s é o ângulo horário do pôr do sol (radianos), obtido por:

$$\omega_s = \arccos[-tg(\varphi) \cdot tg(\delta)] \quad (7)$$

em que, φ – latitude local (radianos); δ – declinação solar (radianos), localizado pela equação:

$$\delta = 0,4093 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (8)$$

em que, J é a ordem dos dias do calendário Juliano no ano (1 a 365 ou 366).

2.2.4 Linacre (1977)

A evapotranspiração pelo método de Linacre (1977) é obtida pela seguinte equação:

$$ETP = \frac{700 \frac{(T + 0,006z)}{100 - \varphi} + 15(T - T_d)}{(80 - T)} \quad (9)$$

em que, ETP – evapotranspiração potencial (mm.d^{-1}); T – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); z – altitude do local, (m); φ – latitude do local (graus); T_d – temperatura de ponto de orvalho, ($^{\circ}\text{C}$).

2.2.5 Hargreaves-Samani-T (1985)

O modelo proposto por Hargreaves & Samani (1982; 1985) para estimar a evapotranspiração considera as variáveis latitude, temperatura diária máxima, média e mínima, e é expresso pela seguinte equação:

$$ETP = 0,0023(T + 17,8)(T_{\max} - T_{\min})^{0,5} R_a \quad (10)$$

em que, ETP – evapotranspiração potencial (mm.d^{-1}); T – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_{\max} – temperatura máxima diária ($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} – temperatura mínima diária ($^{\circ}\text{C}$); R_a – radiação solar extraterrestre incidente acima da atmosfera, ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), obtida por:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \operatorname{sen}(\varphi) \operatorname{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \operatorname{sen}(\omega_s)] \quad (11)$$

em que, G_{sc} – constante solar = $0,0820$ ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); d_r – distância relativa do Sol a Terra (radianos), cuja equação é:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (12)$$

2.2.6 Kharrufa (1985)

O método desenvolvido por Kharrufa (1985), a partir da relação entre evapotranspiração e a porcentagem de insolação máxima diária, é descrito segundo a equação:

$$ETP = 0,34 p T^{1,3} \quad (13)$$

em que, *ETP* – evapotranspiração potencial (mm.d^{-1}); *p* – porcentagem diária de horas de luz, tabulada no Quadro 2 (Tucci *et al.*, 2004); *T* – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$).

2.3 Balanço hídrico pela metodologia de Thornthwaite-Matter (1955)

Thornthwaite e Matter (1955) desenvolveram o balanço hídrico climatológico para determinar o regime hídrico de um local, sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para sua elaboração, há necessidade de se definir, para uma determinada região ou local a Capacidade de Água Disponível (*CAD*) no solo, os valores de Precipitação (*P*) e Evapotranspiração (*ET*) para um período considerado. Com essas informações básicas, a metodologia permite estimar, para o mesmo período, o Armazenamento da Água no solo (*ARM*), a Evapotranspiração Real (*ER*), Deficiência (*DEF*) e Excedente Hídrico (*EXC*) (Ometto, 1981; Pereira *et al.*, 1997). Toda a metodologia utilizada neste estudo é descrita em Thornthwaite e Matter (1955) e Pereira *et al.*, (1997).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evapotranspiração

Comparando as curvas de evapotranspiração (Figura 1), no decorrer dos meses do ano de 2008, nota-se que nos meses mais chuvosos (Tabela 1), que vai de outubro a março, o método Kharrufa (1985) obteve os maiores valores de evapotranspiração, sendo que neste método de estimativa, além da temperatura, tem maior peso a quantidade de horas de luz durante o dia (equação 13). Já para os meses mais secos do ano, que vai de abril a setembro (Tabela 1), em média, o método que obteve os maiores valores de estimativa de evapotranspiração foi o de Blaney-Criddle (1950), que também usa a quantidade de horas de luz durante o dia e a temperatura (equação 4), contudo, este método foi desenvolvido para regiões com baixa temperatura e pouca pluviosidade (Kijne, 1978).

O método que obteve os menores valores de estimativa de evapotranspiração para os meses chuvosos, de outubro a março (Tabela 1), em média, foi o método Linacre (1977), que além da temperatura média do ar leva em consideração a temperatura do ponto de orvalho, a altitude e a latitude do local (equação 9). Já nos meses mais secos, de abril a setembro (Tabela 1), o método de Hamon (1985) obteve os menores valores

de estimativa de evapotranspiração, sendo que este método, além da temperatura utiliza a insolação máxima diária teórica em função da latitude e época do ano (equação 5).

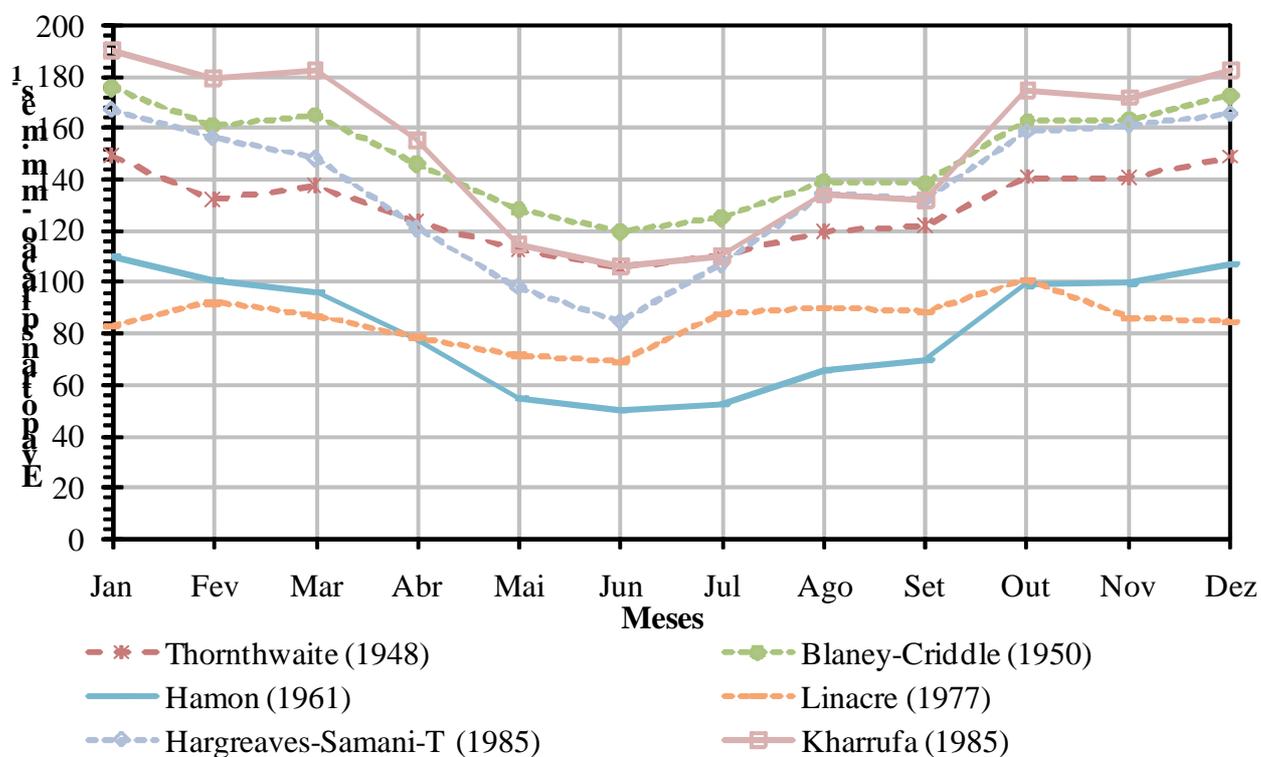


Figura 1 – Evolução das estimativas de evapotranspiração mensal, para o ano de 2008, dos diferentes métodos de estimativa utilizados.

3.2 Balanço hídrico

O resultado de grande importância, nos gráficos analisados a seguir, é a deficiência de água, que, por exemplo, pode causar problemas para o abastecimento humano e/ou agricultura, e o excesso de água, que, por exemplo, pode fomentar a recarga de aquífero.

São apresentados para cada método de estimativa de evapotranspiração testado, de forma complementar, três diferentes tipos de gráfico. O primeiro mostra o extrato simples do balanço hídrico, ou seja, se há deficiência ou excedente hídrico no decorrer do ano. O segundo mostra a precipitação, evapotranspiração potencial estimada pelos diferentes métodos estudados e armazenamento de água no solo máximo, mínimo e efetivo. No terceiro obtém-se o excedente hídrico, reposição, deficiência, retirada, precipitação e a evapotranspiração potencial estimada.

3.2.1 Balanço hídrico com a evapotranspiração calculada por Thornthwaite (1948)

Analisando as Figuras 2, 3 e 4 nota-se que a grande influencia no extrato do balanço hídrico, calculada pela evapotranspiração por Thornthwaite (1948), foi provocada pela pluviosidade.

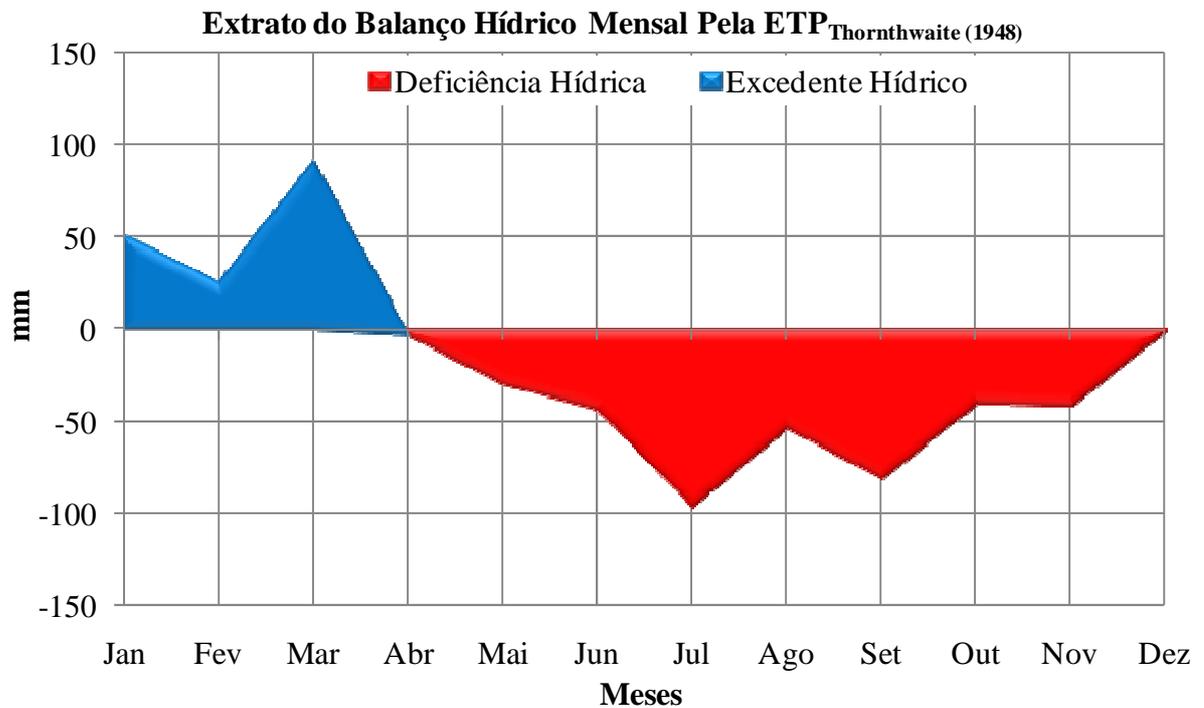


Figura 2 - Extrato do balanço hídrico mensal calculado com a evapotranspiração potencial estimada por Thornthwaite (1948), para o ano de 2008.

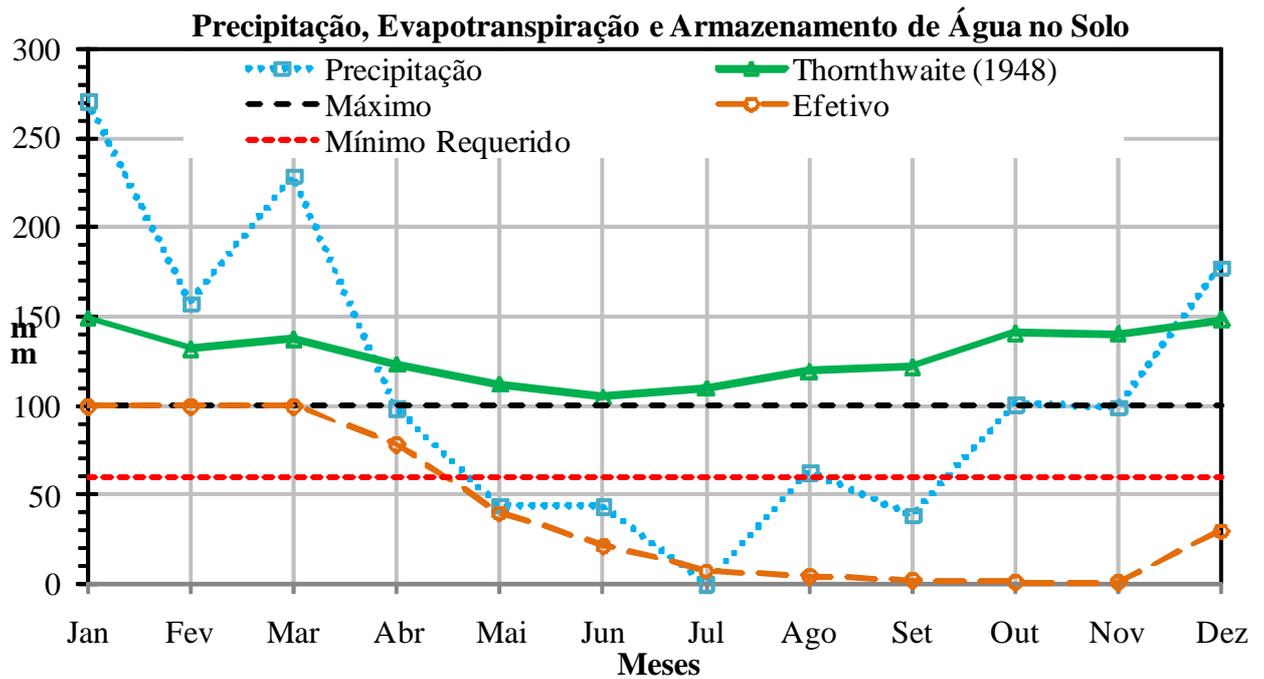


Figura 3 - Precipitação, evapotranspiração potencial estimada por Thornthwaite (1948) e armazenamento de água no solo máximo, mínimo e efetivo, para o ano de 2008.

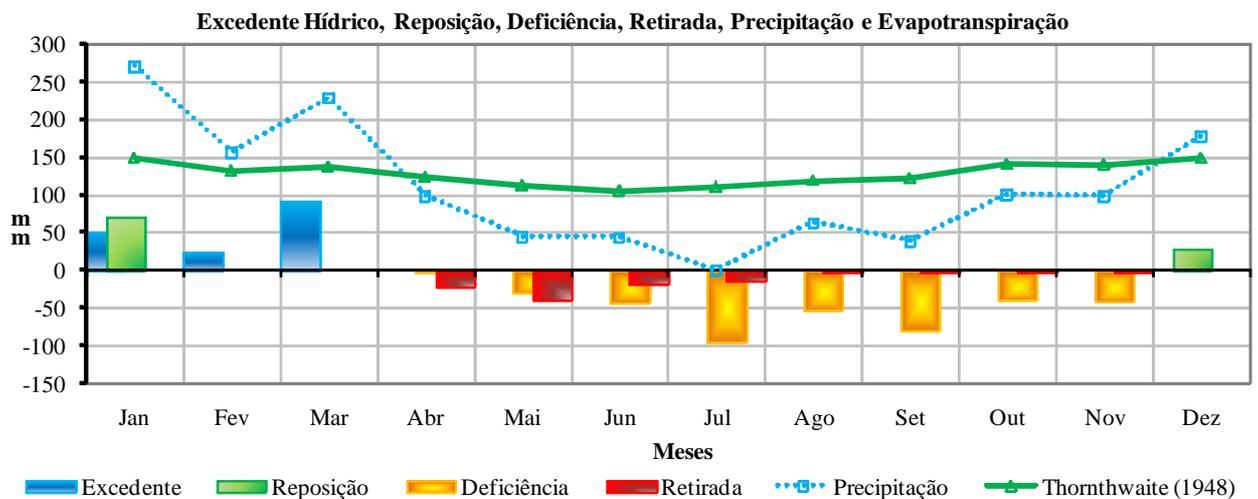


Figura 4 - Excedente hídrico, reposição, deficiência, retirada, precipitação e evapotranspiração potencial estimada por Thornthwaite (1948), para o ano de 2008.

3.2.2 Balanço hídrico com a evapotranspiração calculada por Blaney-Criddle (1950)

Avaliando as Figuras 5, 6 e 7 verifica-se que a queda acentuada da pluviosidade a partir do mês de abril, atrelada aos elevados valores médios da estimativa de evapotranspiração pelo método de Blaney-Criddle (1950), provocou a maior deficiência

hídrica no extrato do balanço hídrico dentre os outros métodos de estimativa de evapotranspiração estudados.

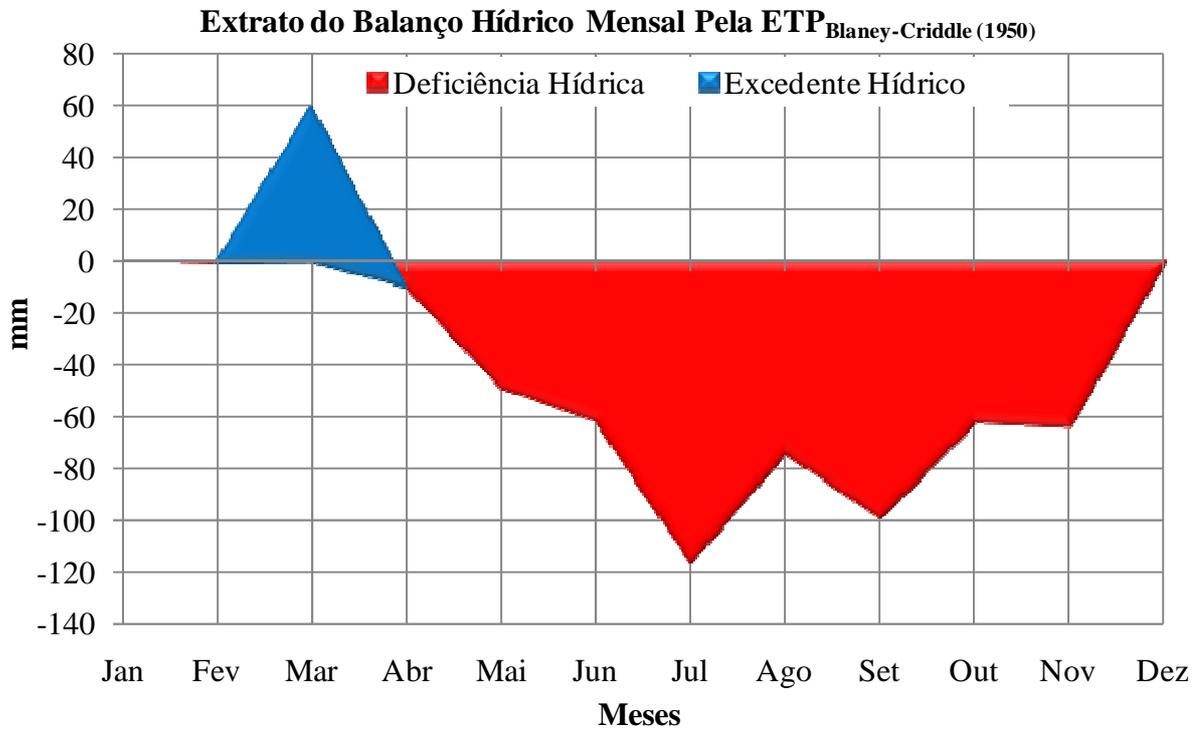


Figura 5 - Extrato do balanço hídrico mensal calculado com a evapotranspiração potencial estimada por Blaney-Criddle (1950), para o ano de 2008.

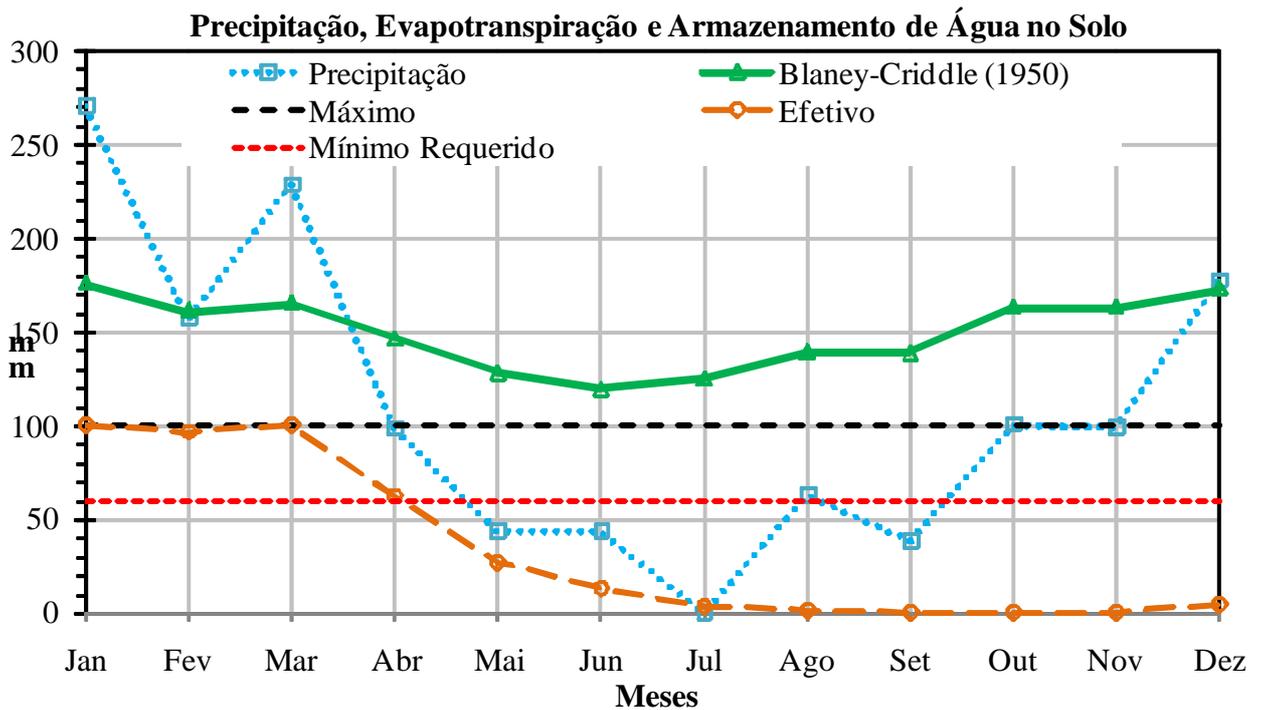


Figura 6 - Precipitação, evapotranspiração potencial estimada por Blaney-Criddle (1950) e armazenamento de água no solo máximo, mínimo e efetivo, para o ano de 2008.

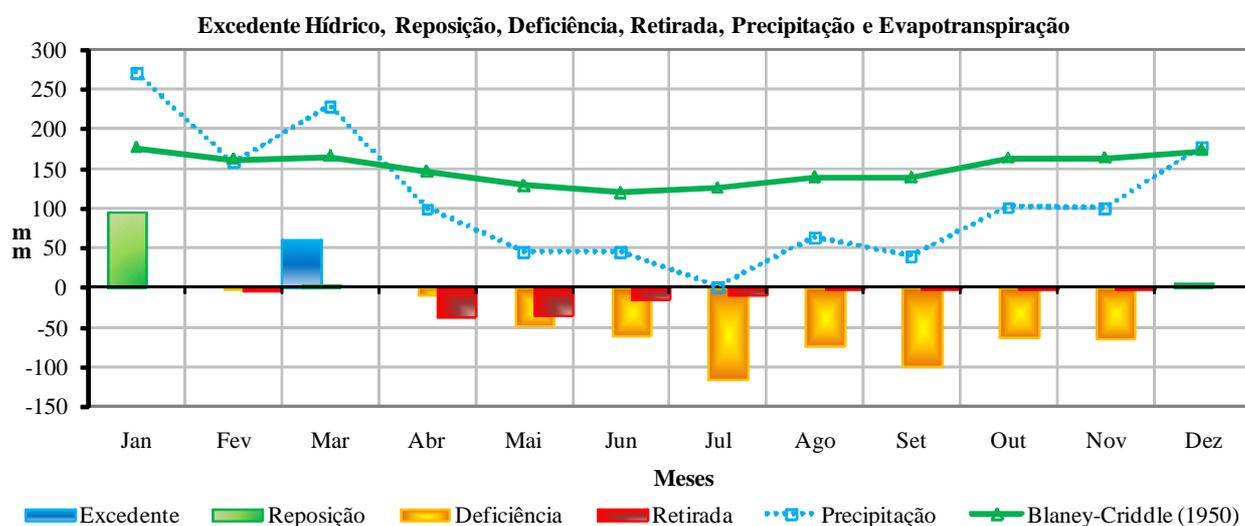


Figura 7 - Excedente hídrico, reposição, deficiência, retirada, precipitação e evapotranspiração potencial estimada por Blaney-Criddle (1950), para o ano de 2008.

3.2.3 Balanço hídrico com a evapotranspiração calculada por Hamon (1961)

As Figuras 8, 9 e 10 mostram que, mesmo com a queda acentuada da pluviosidade a partir do mês de abril, devido aos baixos valores médios da estimativa de evapotranspiração pelo método de Hamon (1961), este método provocou a menor deficiência hídrica no extrato do balanço hídrico dentre os outros métodos de estimativa de evapotranspiração estudados.

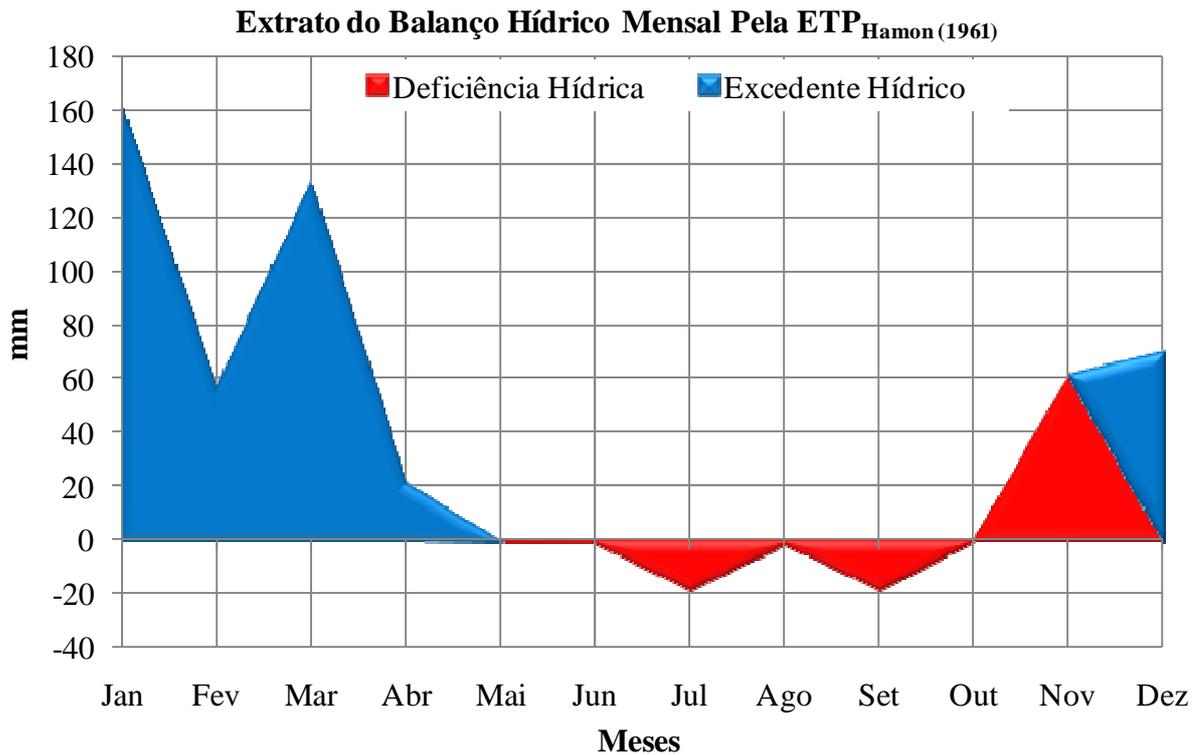


Figura 8 - Extrato do balanço hídrico mensal calculado com a evapotranspiração potencial estimada por Hamon (1961), para o ano de 2008.

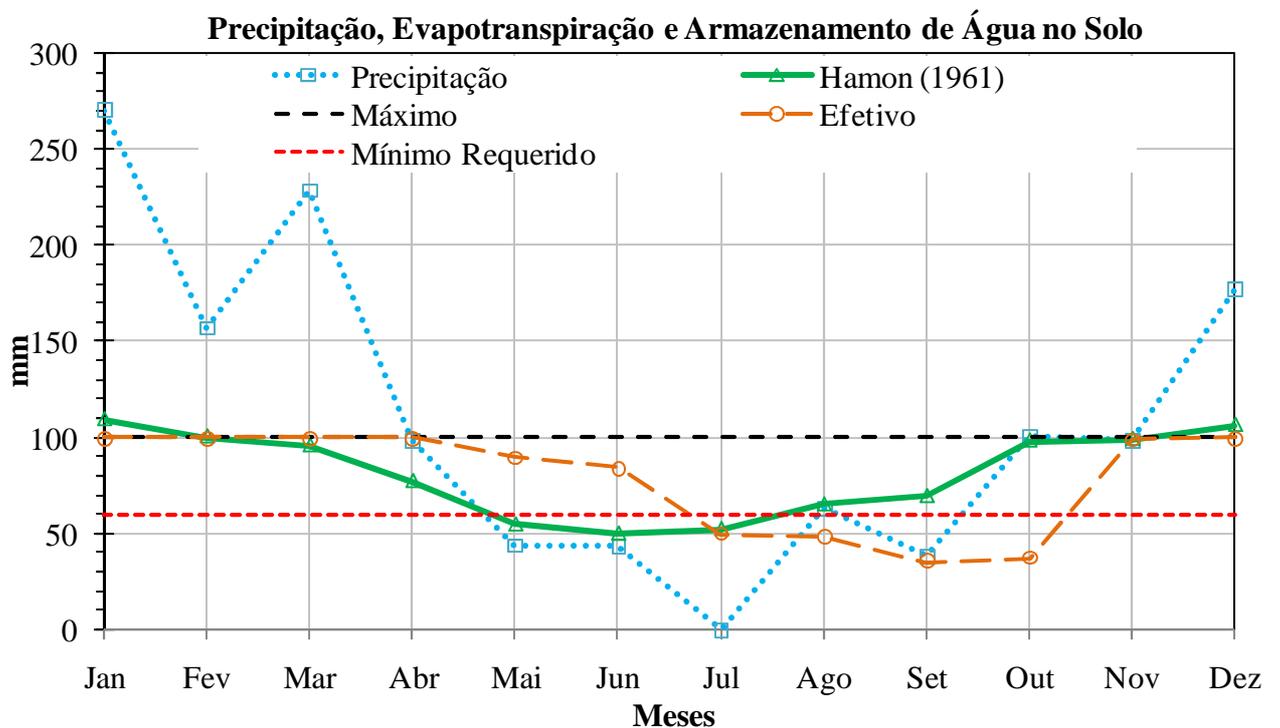


Figura 9 - Precipitação, evapotranspiração potencial estimada por Hamon (1961) e armazenamento de água no solo máximo, mínimo e efetivo, para o ano de 2008.

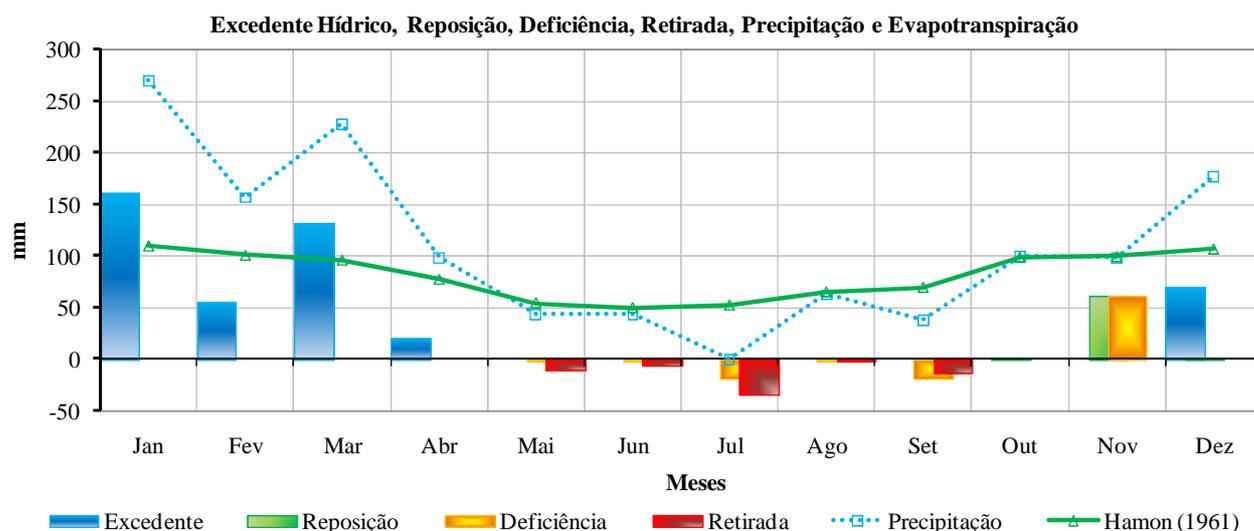


Figura 10 - Excedente hídrico, reposição, deficiência, retirada, precipitação e evapotranspiração potencial estimada por Hamon (1961), para o ano de 2008.

3.2.4 Balanço hídrico com a evapotranspiração calculada por Linacre (1977)

As Figuras 11, 12 e 13 mostram os resultados do balanço hídrico e seus componentes para o método de estimativa de evapotranspiração por Linacre (1977). Conforme o comportamento da evapotranspiração durante o ano nota-se que este método foi o que acarretou menor influência no extrato do balanço hídrico durante o ano estudado, tendo, portanto, maior influência no déficit hídrico a baixa pluviosidade nos meses secos do ano (Tabela 1), que vai de abril a setembro.

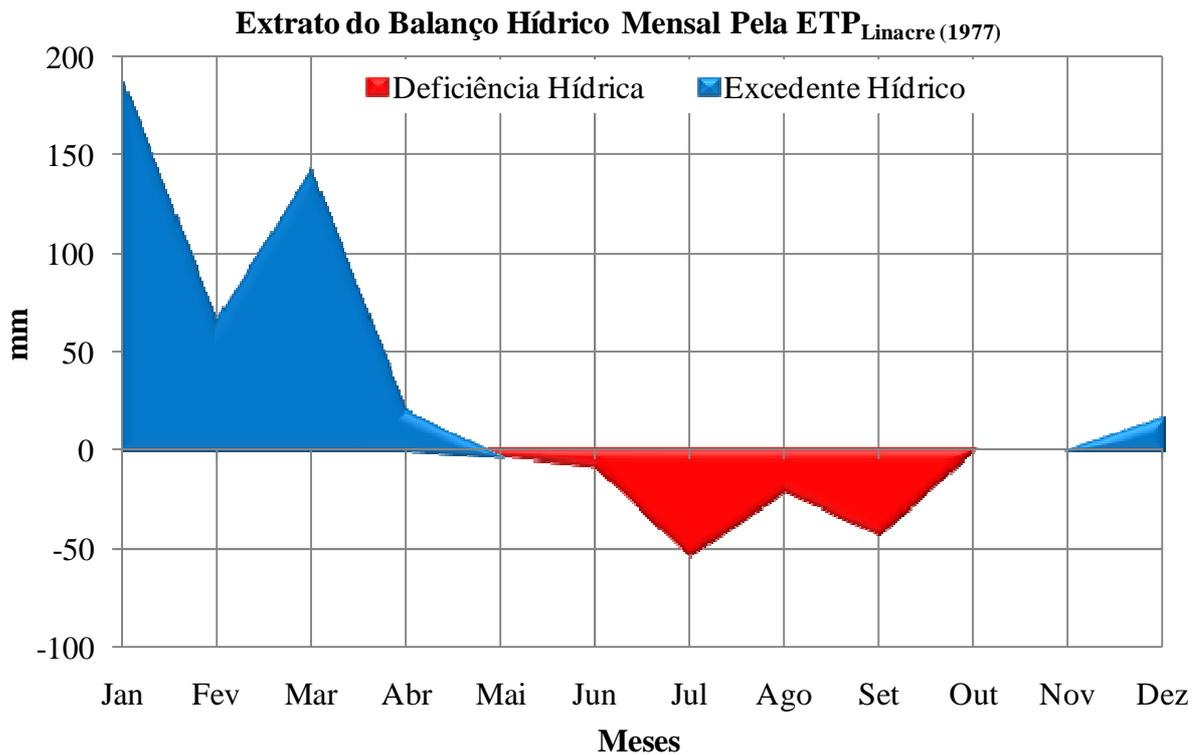


Figura 11 - Extrato do balanço hídrico mensal calculado com a evapotranspiração potencial estimada por Linacre (1977), para o ano de 2008.

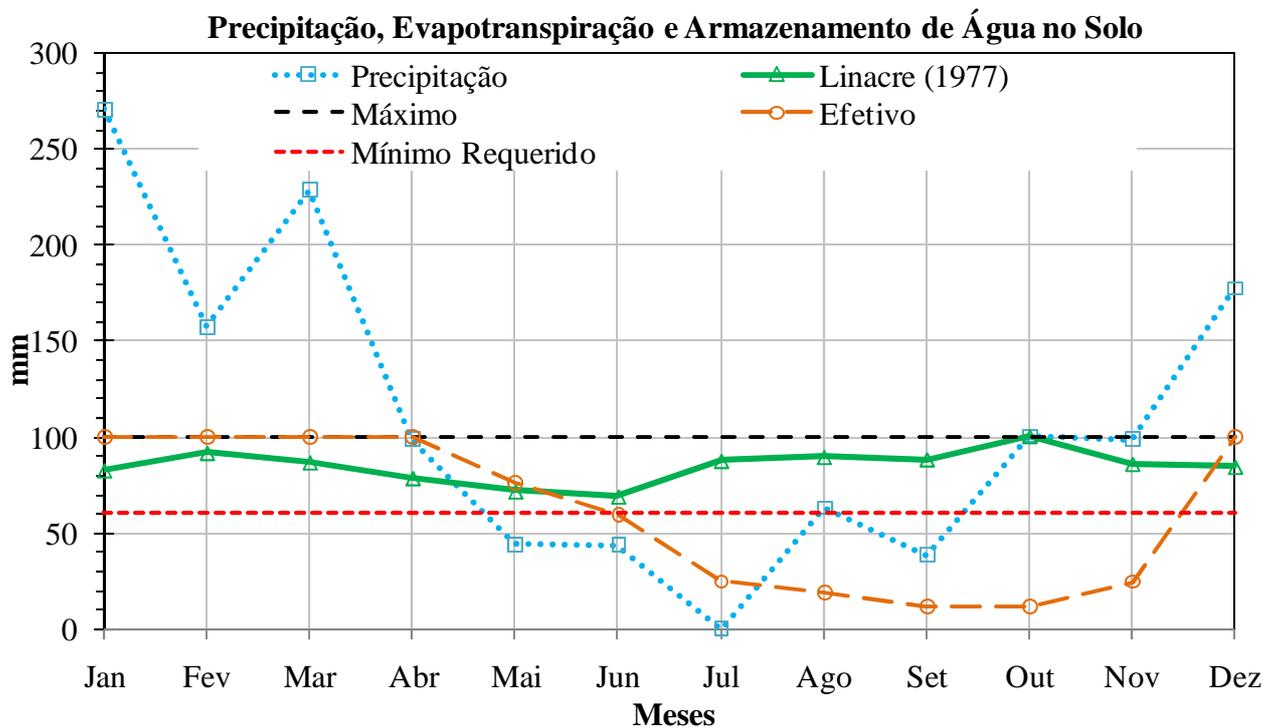


Figura 12 - Precipitação, evapotranspiração potencial estimada por Linacre (1977) e armazenamento de água no solo máximo, mínimo e efetivo, para o ano de 2008.

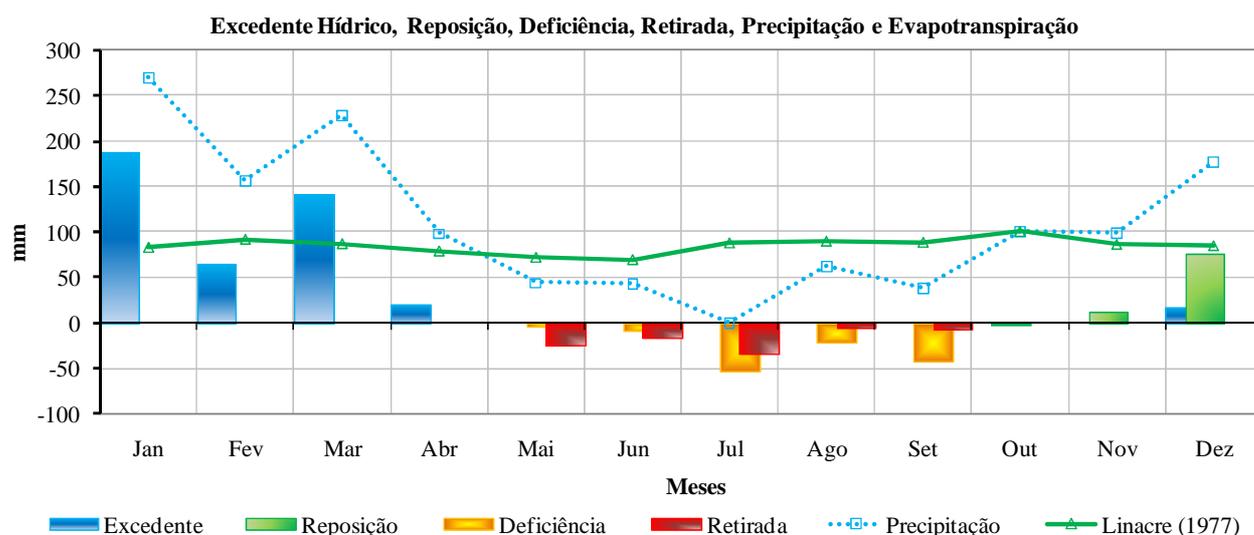


Figura 13 - Excedente hídrico, reposição, deficiência, retirada, precipitação e evapotranspiração potencial estimada por Linacre (1977), para o ano de 2008.

3.2.5 Balanço hídrico com a evapotranspiração calculada por Hargreaves-Samani-T (1985)

As Figuras 14, 15 e 16 expõem os resultados do balanço hídrico e seus componentes para o método de estimativa de evapotranspiração por Hargreaves-Samani-T (1985). Devido ao comportamento da evapotranspiração durante o ano, e a lenta recuperação dos valores de pluviosidade (Tabela 1) no segundo semestre do ano, nota-se que este método acarretou um baixo armazenamento efetivo de água no solo.

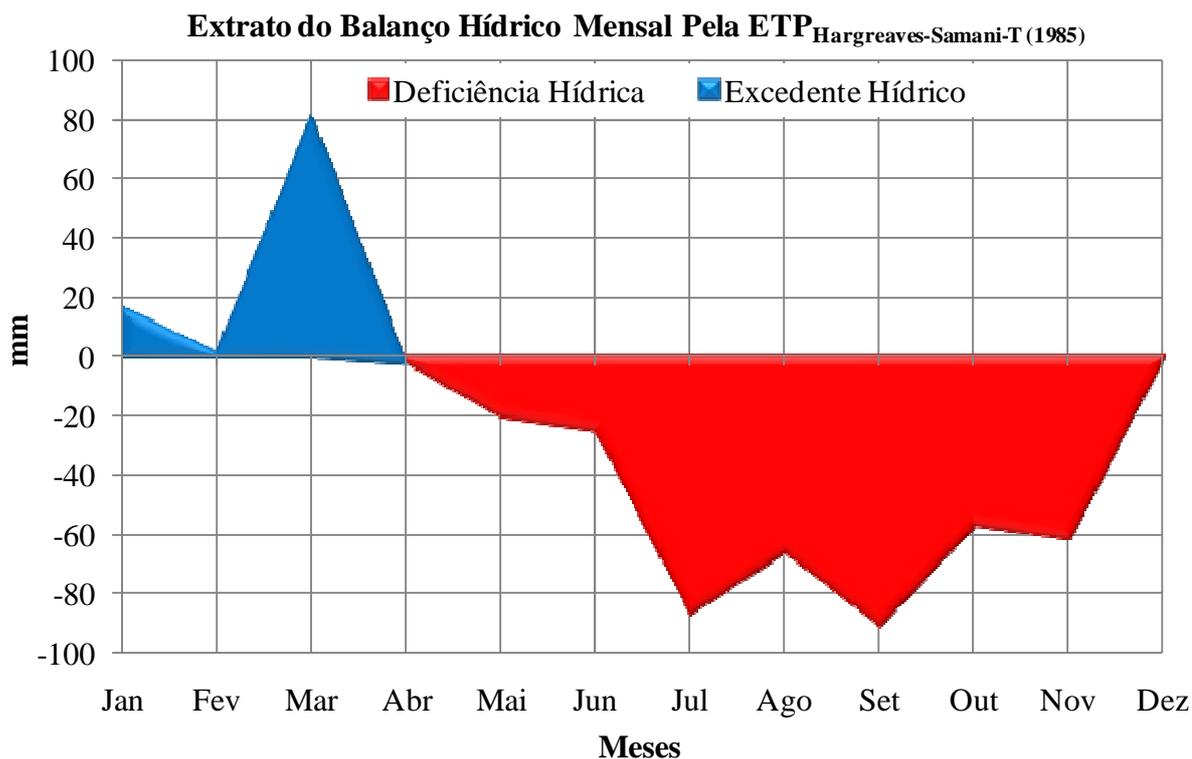


Figura 14 - Extrato do balanço hídrico mensal calculado com a evapotranspiração potencial estimada por Hargreaves-Samani-T (1985), para o ano de 2008.

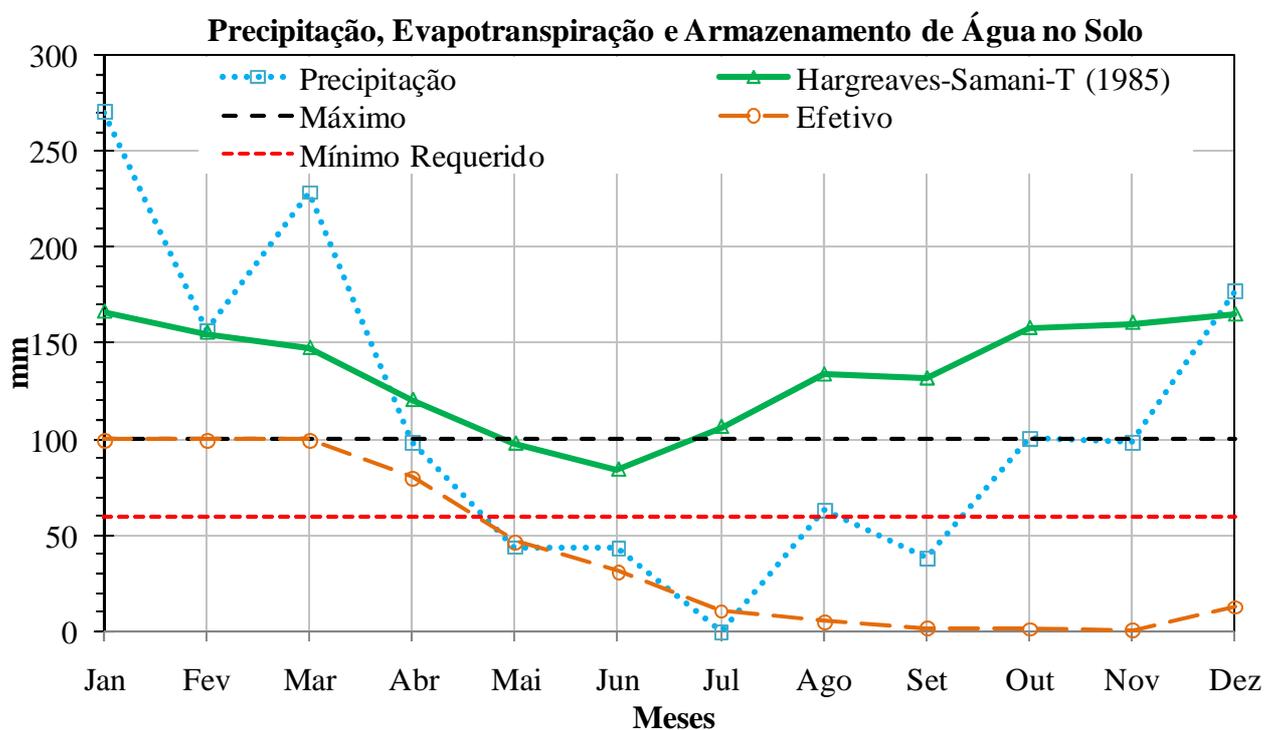


Figura 15 - Precipitação, evapotranspiração potencial estimada por Hargreaves-Samani-T (1985) e armazenamento de água no solo máximo, mínimo e efetivo, para o ano de 2008.

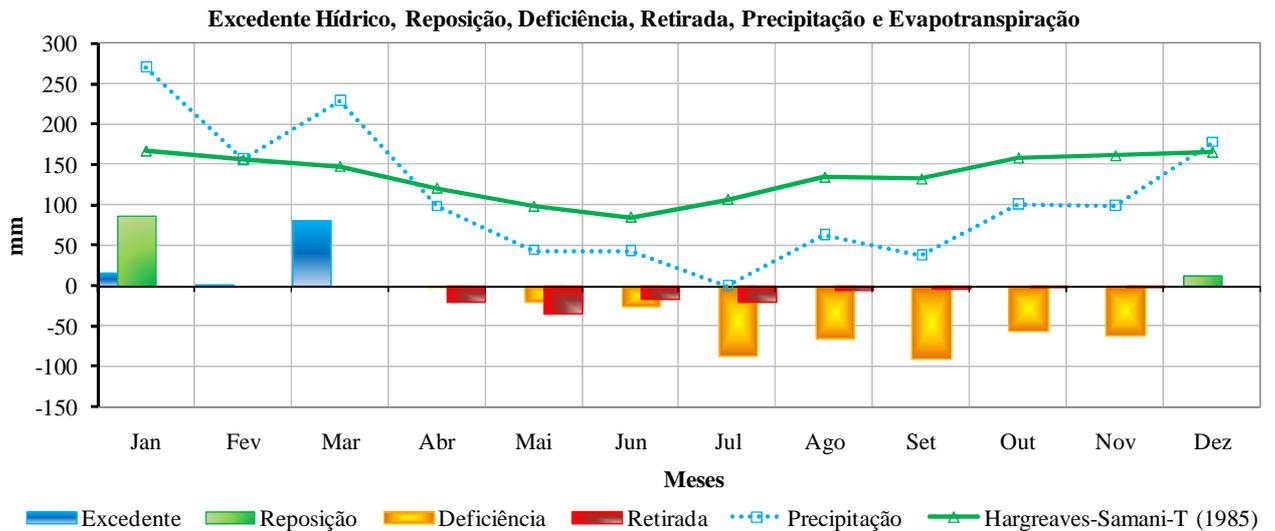


Figura 16 - Excedente hídrico, reposição, deficiência, retirada, precipitação e evapotranspiração potencial estimada por Hargreaves-Samani-T (1985), para o ano de 2008.

3.2.6 Balanço hídrico com a evapotranspiração calculada por Kharrufa (1985)

As Figuras 17, 18 e 19 expõem os resultados do balanço hídrico e seus componentes para o método de estimativa de evapotranspiração por Kharrufa (1985). Os elevados números mensais da estimativa de evapotranspiração, principalmente nos meses chuvosos (Tabela 1), atrelados a elevada reposição de água ao solo em janeiro, acarretaram a maior média anual de deficiência hídrica e o menor armazenamento efetivo de água no solo dentre os métodos de evapotranspiração estudados.

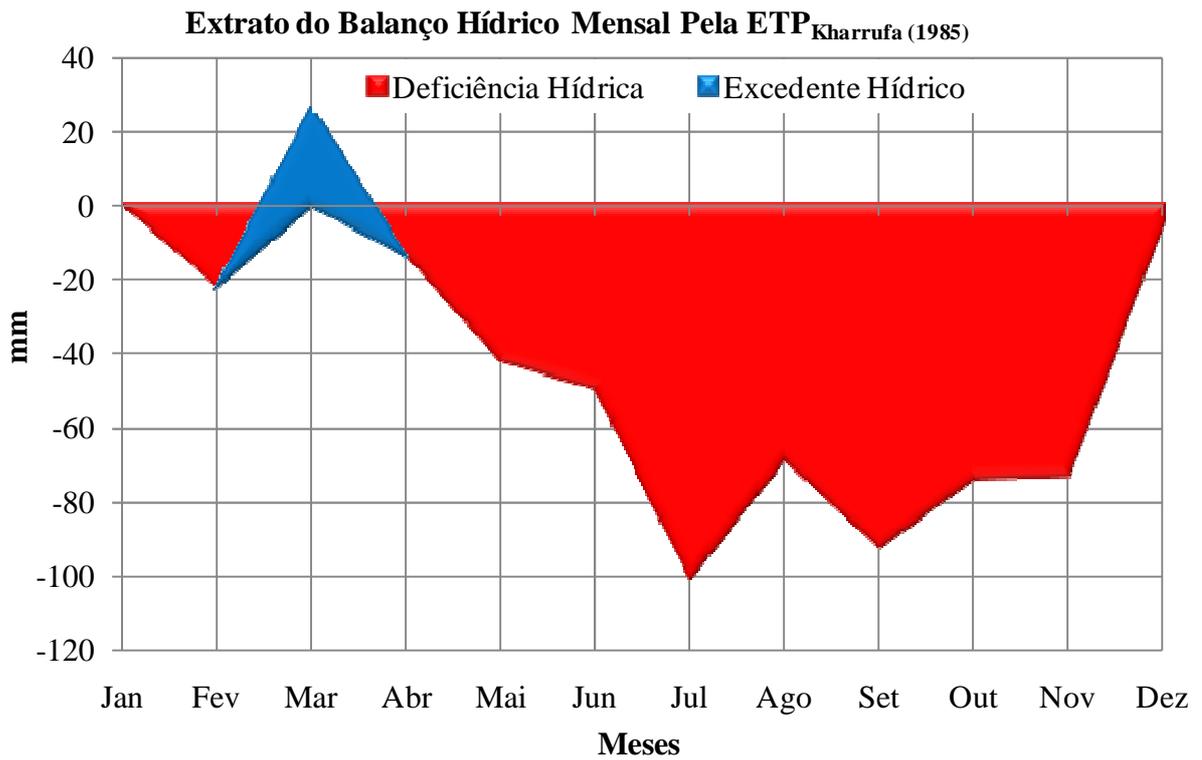


Figura 17 - Extrato do balanço hídrico mensal calculado com a evapotranspiração potencial estimada por Kharrufa (1985), para o ano de 2008.

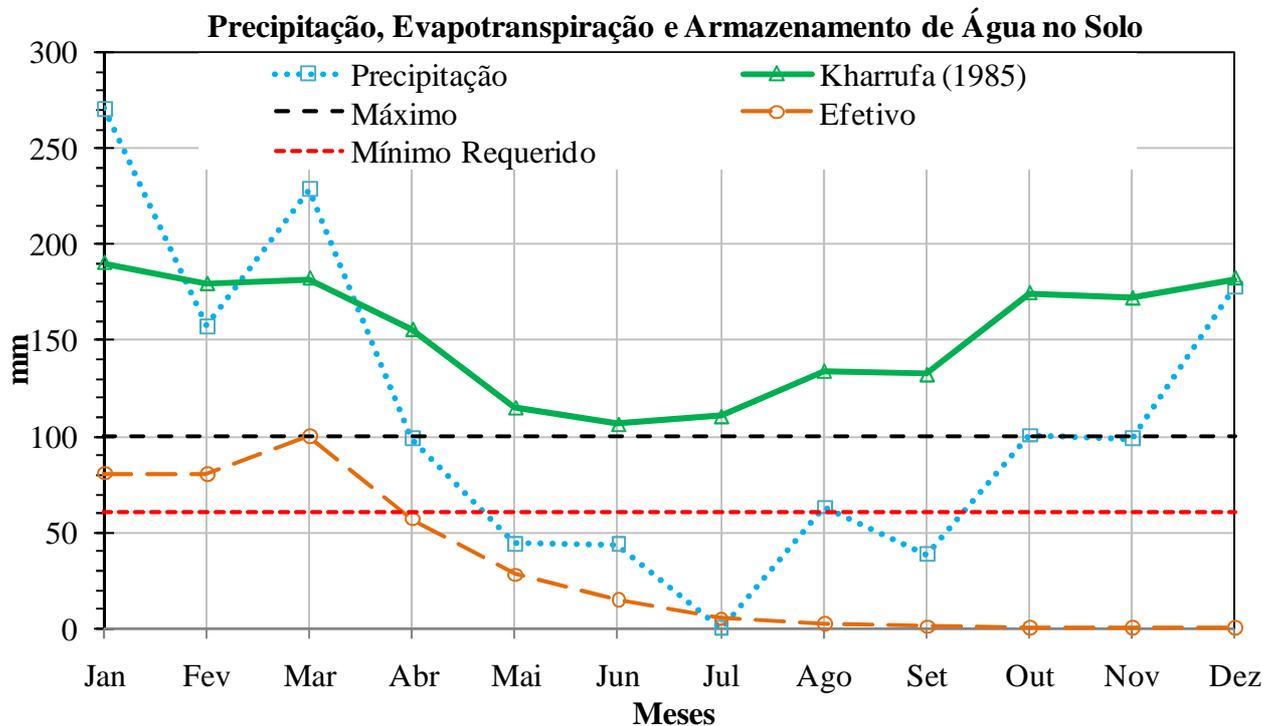


Figura 18 – Precipitação, evapotranspiração potencial estimada por Kharrufa (1985) e armazenamento de água no solo máximo, mínimo e efetivo, para o ano de 2008.

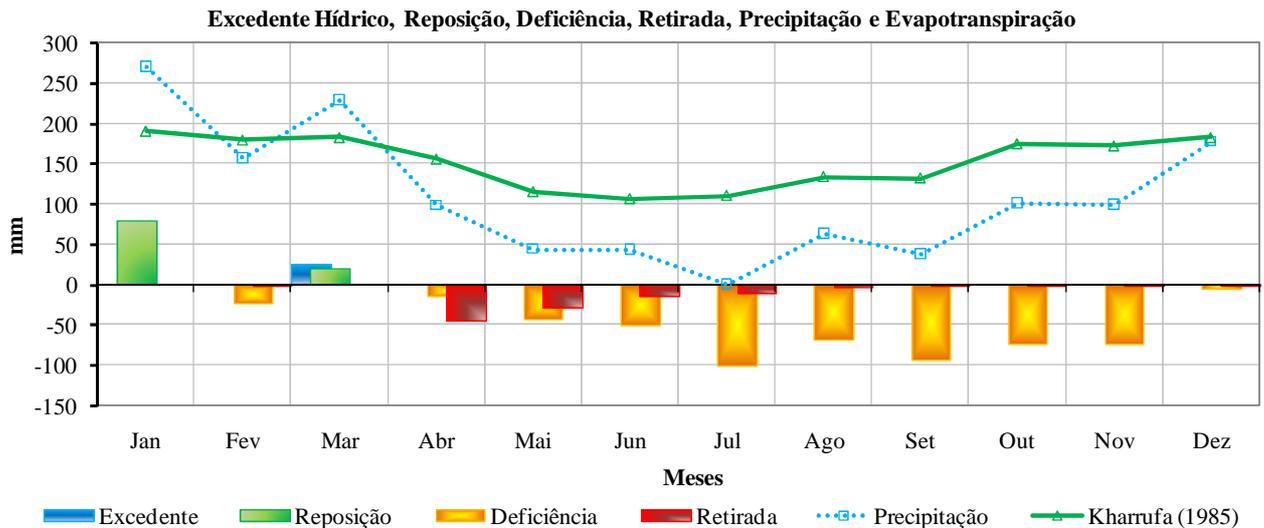


Figura 19 - Excedente hídrico, reposição, deficiência, retirada, precipitação e evapotranspiração potencial estimada por Kharrufa (1985), para o ano de 2008.

3.3 Aferição dos resultados de balanço hídrico

O balanço hídrico nada mais é do que computar as entradas e saídas de água de um sistema, ou seja, é um produto do princípio da conservação de massa à água. Pode-se averiguar ou aferir a exatidão dos cálculos executados através do profundo conhecimento dos componentes físicos do balanço hídrico e do princípio fundamental da conservação de massa (Lei de Lavoisier).

Na Tabela 2 são mostradas as aferições dos balanços hídricos obtidos pelos diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração pelo princípio de conservação de massa. Nota-se que todos os valores obtidos com os métodos de estimativa de evapotranspiração se adequaram ao balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Matter (1955) segundo o princípio da conservação de massa aplicado à água.

Tabela 2 – Aferição dos balanços hídricos obtidos pelos diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração pelo princípio de conservação de massa.

Aferição do Balanço Hídrico	Thornthwaite (1948)	Blaney-criddle (1950)	Hamon (1961)	Linacre (1977)	Hargreaves-Samani-T (1985)	Kharrufa (1985)
	----- mm.ano ⁻¹ -----					
ETP=	1538	1795	982	1016	1628	1832
ETR+DEF=	1538	1795	982	1016	1628	1832
ET=ETR+DEF=	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro
P=	1320	1320	1320	1320	1320	1320
ETR+EXC=	1320	1320	1320	1320	1320	1320
P=ETR+EXC	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro
P-ETP=	-217	-474	339	304	-308	-511
EXC-DEF=	-217	-474	339	304	-308	-511
P-ETP=EXC-DEF	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro
Σ(ALT)=	0	0	0	0	0	0
=0	0	0	0	0	0	0
Σ(ALT) = 0	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro
P=	1320	1320	1320	1320	1320	1320
ETP+(P-ETP)=	1320	1320	1320	1320	1320	1320
P=ETP+(P-ETP)	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro	Verdadeiro

P - Precipitação; ETR - Evapotranspiração Real; ETP - Evapotranspiração Potencial; DEF - Deficiência; EXC - Excedente Hídrico; ALT – Alteração no Armazenamento.

4 CONCLUSÕES

Executou-se um estudo do balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Matter (1955) utilizando-se de seis diferentes metodologias de estimativa de evapotranspiração que utiliza a temperatura como principal variável.

Os métodos de estimativa de evapotranspiração utilizados como componente do balanço hídrico climatológico que resultaram em maiores excedentes hídricos, em ordem decrescente, foram: Hamon (1961), 440,2 mm.ano⁻¹; Linacre (1977), 432,1 mm.ano⁻¹; Thornthwaite (1948), 167,6 mm.ano⁻¹; Hargreaves-Samani-T (1985), 99,0 mm.ano⁻¹; Blaney-Criddle (1950), 59,6 mm.ano⁻¹; Kharrafu (1985) 26,6 mm.ano⁻¹.

Conclui-se que, para os dados climatológicos da região estudada, a metodologia para estimativa de evapotranspiração a ser selecionado possui grande influência no resultado final do extrato do balanço hídrico.

A avaliação dos resultados do balanço hídrico com base no princípio de conservação de massa, de modo a se aferir se a metodologia de estimativa de

evapotranspiração se enquadrou no balanço hídrico proposto por Thornthwaite e Matter (1955).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Brasil (processo 152033/2008-4) e à FAPESP (processo 2009/05204-8) pelos auxílios financeiros que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- AGUILAR, D.J.; KRUKER, J.M.; CALHEIROS, R. de O.; SILVA, C.A.S. (1986). *“Determinação da evapotranspiração potencial e balanço hídrico climático da região da Grande Dourados, MS”*. Dourados: EMBRAPA-UEPAE Dourados, 150 p.
- BERLATO, M.A., MOLION, L.B. (1981). *Evaporação e evapotranspiração*. Boletim Técnico IPAGRO. Porto Alegre, n.7, pp. 3-95.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. (2005). *Manual de irrigação*. 7ª ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 611 p.
- BLANEY, H.F.; CRIDDLE, W.D. (1950). *“Determining water requirement in irrigated areas from climatological and irrigation data”*. Washington. USDA Soil Conserv. Serv. TP-96, 48 p.
- CARVALHO, M.A. de; MELLO JUNIOR, A.V.; SCHARDONG, A.; PORTO, R.L.L. (2009). *“Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação”*. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental. v.13, n.1, pp. 10-17 .
- HAMON, W. R. (1961). *“Estimating potential evapotranspiration”*. Journal of Hydraulics Division ASCE, New York, v.87, n.3, pp. 107-120.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. (1982). *“Estimation of potential evapotranspiration”*. Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE, New York, v.108, n.3, pp. 225-230.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. (1985). *“Reference crop evapotranspiration from temperature”*. Journal of Applied Engineering in Agriculture, St Joseph, v.1, n.2, pp. 96-99.
- KHARRUFA, N. S. (1985). *“Simplified equation for evapotranspiration in arid regions”*. Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten, Sonderheft 5.1, pp. 39-47.
- KIJNE, J.W. (1978). Determinación de la evapotranspiración. In: ILRI. *“Principios y aplicaciones del drenaje”*. Wageningen. v.3, cap. 19, pp. 59-108.

- LINACRE, E. T. (1977). "A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone". *Agricultural Meteorology*, v.18, pp. 409-424.
- MEDEIROS, A.T. (2002). "Estimativa de evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE". Tese Doutorado. Piracicaba: ESALQ, 103 p.
- MELLO, J.L.P.; SEDIYAMA, G.C.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. (1996). *Evaporação e evapotranspiração*. Viçosa: UFV. 62 p.
- OMETTO, J.C. (1981). *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo: Ceres, 425 p.
- PEREIRA, A.R.; VILA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. (1997). *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 183 p.
- SWAMI, M.V.; MATTOS, A. (1975). *Hidrologia Aplicada*. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 246 p.
- THORNTHWAITE, C.W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate". *Geographic Review*, New York, v. 38, n. 1, pp. 55-94.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. (1955). "The water balance". Centerton: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. *Publications in Climatology*, v. 8, n. 1. 104 p.
- TUCCI, C. E. M. (org.) (2004). *Hidrologia – Ciência e Aplicação*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 3ª ed., ABRH. 944 p.

**APÊNDICE E – Trabalho Completo Enviado ao Simpósio
Brasileiro de Recursos Hídricos de 2009 (Número 2)**

FUNÇÕES DE IMPULSO E RESPOSTA APLICADAS À MODELAGEM DE NÍVEIS FREÁTICOS EM ÁREA DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

Rodrigo L. Manzione⁴; Francisco F. N. Marcuzzo⁵ & Edson Wendland⁶

RESUMO - O monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos fornece informações para o planejamento e uso sustentável da água, atendendo a demanda sem afetar a oferta e não comprometendo reservas importantes do sistema aquífero. Na modelagem desse tipo de fenômeno é necessário considerar as variações climáticas sazonais para que seja caracterizada a dinâmica do sistema. O objetivo desse trabalho foi verificar a aplicabilidade de modelos de séries temporais para caracterizar a relação entre precipitação e variação de nível freático na bacia do Ribeirão da Onça, Brotas-SP, pertencente à área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. Para isso foi utilizado o modelo PIRFICT, uma alternativa a modelos de função de transferência de ruído em intervalos de tempo discretos, que usa funções de impulso e resposta para caracterizar a relação dinâmica entre o excedente hídrico e os níveis freáticos. Foram analisados dois poços de monitoramento freático localizados sob os mesmos substratos geológicos, tipo e uso do solo, porém com profundidades diferentes. Os resultados demonstram que a forma das funções de impulso e resposta calibradas para cada caso variam conforme a profundidade dos níveis e o tempo de dispersão da percolação da água na zona não saturada até causar reação no sistema aquífero.

ABSTRACT - Water resources monitoring provides information for planning and sustainable use of water. It should be done serving the demand without affect the offer, and also not compromising important aquifer reserves. To model this kind of phenomenon is necessary to consider seasonal climate variations to characterize the system dynamics. The aim of this work was verify the applicability of time series models to characterize the relationship between precipitation surplus and water table depths at Ribeirão da Onça basin, municipality of Brotas-SP. This basin belongs to Guarani Aquifer System recharge area. For this purpose we used an alternative to transfer function noise models in discrete intervals, the so called PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time) model,. The model uses impulse response function to model the dynamic relationship between precipitation surplus and water table depths. We analyzed two monitoring wells, located under same geological strata, soil type and land use, differing only in their depths. The results showed the shape of impulse response functions calibrated for each well varying according to water table depths and dispersion time of water percolation through the unsaturated zone until it cause reaction in the aquifer system.

Palavras-chave: monitoramento, séries temporais, modelo PIRFICT.

⁴ Prof. Assistente Dr., UNESP/Ourinhos. Av. Vitalina Marcusso, nº1500, CEP 19910-206, Ourinhos (SP). Fone: (14) 3302-5716 manzione@ourinhos.unesp.br

⁵ Eng. Agrônomo, Pós-Doutorando, Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. fmarcuzzo@gmail.com

⁶ Prof. Associado Dr., Departamento de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP. ew@sc.usp.br

1 - INTRODUÇÃO

Mudanças da disponibilidade de recursos hídricos apresentam impactos no meio ambiente e na ocupação do solo pela agricultura e demais atividades antrópicas. O volume explotável de um aquífero é uma variável de decisão a ser determinada como parte de um plano de gestão do sistema de águas de uma região, uma vez que os recursos hídricos possuem influências muitas vezes em nível regional, municipal, estadual e até mesmo federal, e não apenas no nível da bacia hidrográfica. Deve-se tomar cuidado na exploração desse tipo de recurso, já que a renovação das águas retiradas, ou recarga do aquífero, não se faz na mesma velocidade da extração. Isso pode resultar em uma exploração de partes das reservas permanentes do aquífero, com riscos até mesmo de exaustão quando a captação não é devidamente monitorada.

Modelos têm sido aplicados à descrição de fenômenos naturais por se tratarem de abstrações da realidade encontrada, uma tentativa de representação de uma ou todas as propriedades de um fenômeno, sistema ou objeto, que tem com propósito compreender melhor a resposta de processos a partir de observações realizadas, ou mesmo deduzir efeitos (Tucci, 2005). Sua construção é uma tentativa de ganho em conhecimento sobre determinado fenômeno. À medida que o conhecimento sobre um processo se expande, a complexidade dos modelos tende a aumentar. Modelos estocásticos é uma maneira simples e elegante de se tratar dados hidrológicos (Hipel e McLeod, 1994). Sua principal vantagem em relação a modelos puramente determinísticos é permitir através de sua componente aleatória acessar informações sobre a incerteza associada às estimativas.

Prever a resposta de um aquífero (em termos de quantidade e qualidade) quanto às atividades de exploração propostas e em tempo hábil para gerar políticas racionais de exploração em determinada região é uma questão complicada, devido à complexidade dos processos envolvidos (Manoel Filho, 2000), fazendo com que muitas vezes a gestão de águas subterrâneas não seja incluída no planejamento e gestão de recursos hídricos. O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma importante reserva mundial de água subterrânea. Só no Brasil, estima-se que 1.443 municípios se localizam na área do SAG

(Borghetti *et al.*, 2004), constituindo uma área de grande importância econômica e apresentando diversos usos como urbano, industrial e rural. Em áreas dependentes das reservas de água subterrânea, os níveis de reserva hídrica podem se tornar críticos. Assim, existe a necessidade de que sejam feitas previsões seguras a respeito das oscilações dos níveis freáticos, que auxiliem no suporte a tomada de decisão no planejamento dos recursos hídricos. Um melhor conhecimento dos processos que ocorrem no sistema solo-planta-água-atmosfera visa o planejamento e o uso eficiente da água, além da redução dos impactos antrópicos negativos no uso da água.

O objetivo desse trabalho foi verificar a aplicação de modelos estocásticos baseados em observações e séries temporais para compreensão dos processos que ocorrem durante o ciclo hidrológico em área de recarga do Aquífero Guarani. São aplicados modelos de funções de transferência de ruído, utilizando séries de níveis freáticos, como variável endógena e séries de precipitação e evapotranspiração potencial, como variáveis exógenas. A relação entre as variáveis e conseqüentemente a dinâmica do sistema aquífero é determinada por funções de impulso e resposta, implementadas através do modelo PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time) (Von Asmuth *et al.*, 2002).

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Área de estudo

A Bacia do Ribeirão da Onça localiza-se na região do Município de Brotas-SP, no centro-norte do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22°10' e 22°15' de latitude sul e entre os meridianos 47°55' e 48°00' de longitude oeste (Figura 1).

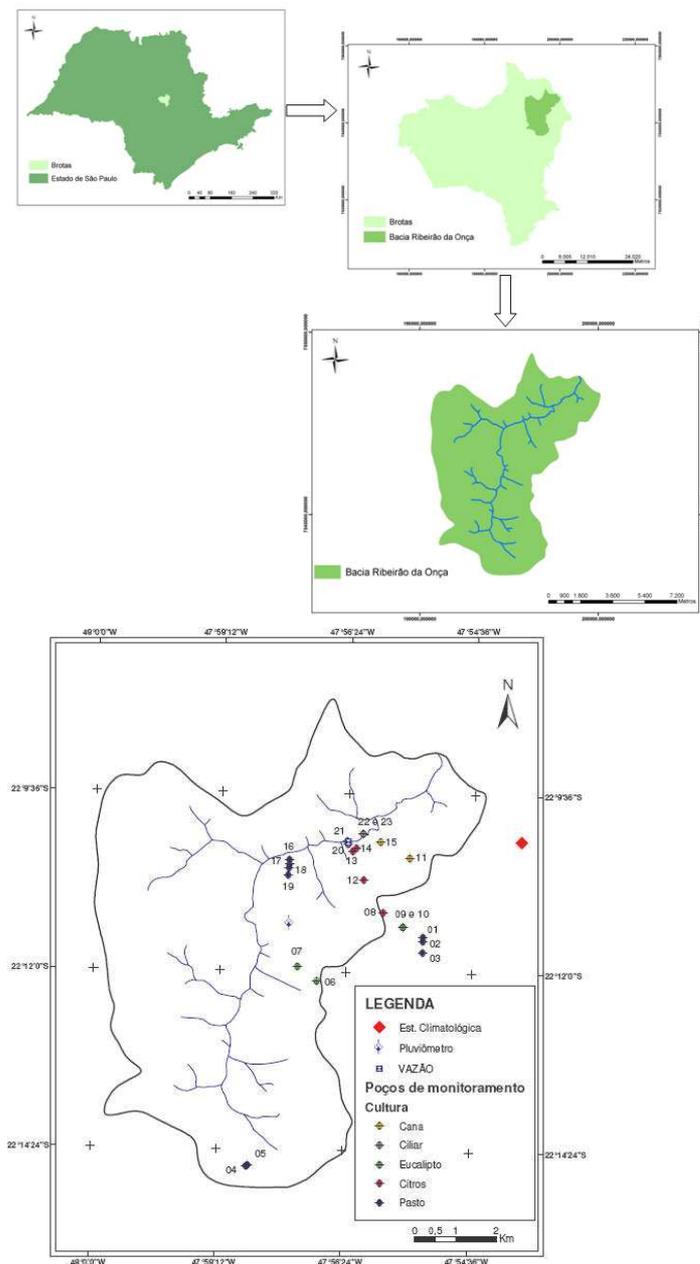


Figura 1 - Localização da Bacia do Ribeirão da Onça, Brotas-SP e distribuição dos poços.

O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçu, afluente do Rio Tietê pela margem direita. A região pertence à área de afloramento do Aquífero Guarani e é de extrema importância por apresentar características representativas típicas da região de afloramento do SAG no Estado de São Paulo e devido a sua alta representatividade como possível área de recarga do sistema. Uma característica importante desta bacia é situar-se quase inteiramente em uma região de afloramento da Formação Botucatu, podendo fornecer elementos de interesse para o aprofundamento

dos conhecimentos sobre o comportamento do SAG. As regiões de afloramento são estratégicas para a sustentação do Aquífero e têm merecido atenção de diversos trabalhos no sentido de entender e avaliar a quantidade em que essa recarga ocorre.

2.2 - Dados disponíveis

Os níveis freáticos são observados em 23 poços distribuídos ao longo da bacia com uma frequência quinzenal (Figura 1). Os poços estão localizados em regiões de diferentes ocupações do solo na bacia (eucalipto, cana, pastagens e citros), permitindo observar as variações dos níveis freáticos sob diferentes exigências hídricas. O monitoramento dos níveis freáticos teve início em 2004 compondo uma série histórica contínua até 2009. A uma distância de 1,5 km (Barreto, 2006) encontra-se a Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Universidade de São Paulo (USP) onde são registradas séries de precipitação e obtidos os dados climatológicos para a estimativa da evapotranspiração, utilizadas como variáveis explicativas no modelo de oscilação dos níveis freáticos. Os dados climáticos disponíveis na Estação Climatológica formam uma série temporal com início em 1974. As séries foram utilizadas a partir do início do monitoramento, em 02/03/2004. A precipitação no período é exibida na Figura 2.

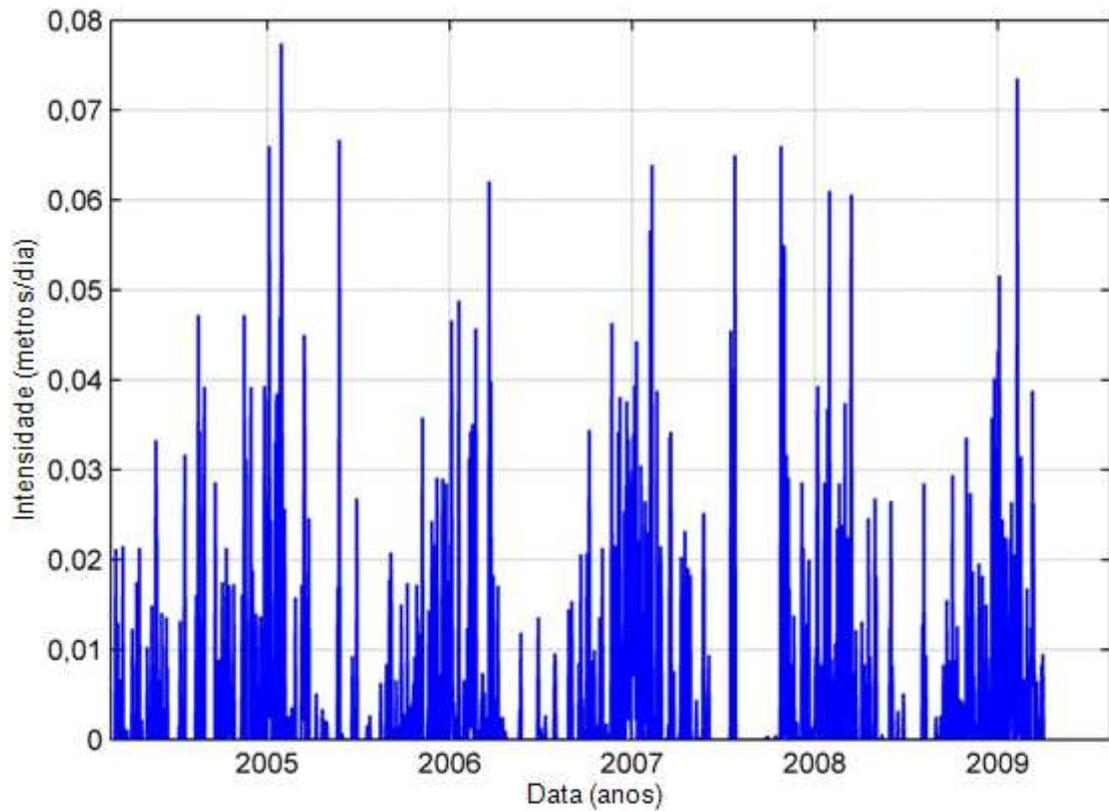


Figura 2 - Precipitação no período de 02/03/2004 a 03/04/2009.

A evapotranspiração potencial foi calculada pelo método de Penman-Monteith (1965):

$$ETP = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{\Delta(R_n + G) + 0,0864 \rho_a c_p \frac{D}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_d}{r_a})} \right] (\text{mm.dia}^{-1}) \quad (1)$$

em que λ ($2,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$) é o calor latente de evaporação da água, Δ (kPa.K^{-1}) é o gradiente da curva de saturação de vapor d'água como uma função da temperatura do ar, R_n ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o saldo de radiação, G ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) é o fluxo vertical de calor no solo, ρ_a (kg.m^{-3}) é a densidade do ar, D (kPa) é o déficit de pressão de vapor d'água, c_p ($1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) é o calor específico do ar, γ (kPa.K^{-1}) é a constante psicrométrica, r_a (s.m^{-1}) é a resistência aerodinâmica, r_d (s.m^{-1}) é a resistência do dossel da planta e 0,0864 é o fator de conversão de (J.s^{-1}) para (MJ.dia^{-1}).

Para esse estudo foram selecionados os poços 4 e 5, localizados na cabeceira da bacia piloto de monitoramento (Figura 1). Esses poços encontram-se sob o mesmo domínio geológico, tipo de solo e cultivo (pastagem), diferindo apenas quanto à profundidade.

2.3 - Modelagem dos dados proposta

2.3.1 Modelos de séries temporais

Informações sobre a dinâmica de níveis freáticos são importantes para balancear os interesses econômicos e ecológicos quanto ao uso do solo e da água (Von Asmuth e Knotters, 2004). Em hidrologia, a dinâmica do lençol freático tem sido explicada de diversas formas. No campo das análises de séries temporais, modelos de função de transferência de ruído (transfer-function noise models-TFN) têm sido aplicados para descrever a relação dinâmica entre a precipitação excedente e os níveis freáticos (Box e Jenkins, 1976; Hipel e McLeod, 1994; Tankersley e Graham, 1994; Van Geer e Zuur, 1997; Yi e Lee, 2003).

Nesse tipo de modelo, o sistema transforma séries de observações de entrada (variáveis explicativas, como precipitação, evapotranspiração potencial) em séries de saída (variável de resposta, no caso níveis freáticos), conforme a Figura 3. A relação dinâmica entre a precipitação e os níveis freáticos pode também ser descrita por modelos físico-mecanísticos de fluxo. Entretanto, modelos muito menos complexos como os modelos de função de transferência de ruído são uma opção elegante de modelar esse tipo de fenômeno e geralmente obtêm predições tão acuradas quanto modelos físico-mecanísticos (Knotters e Bierkens, 2001).

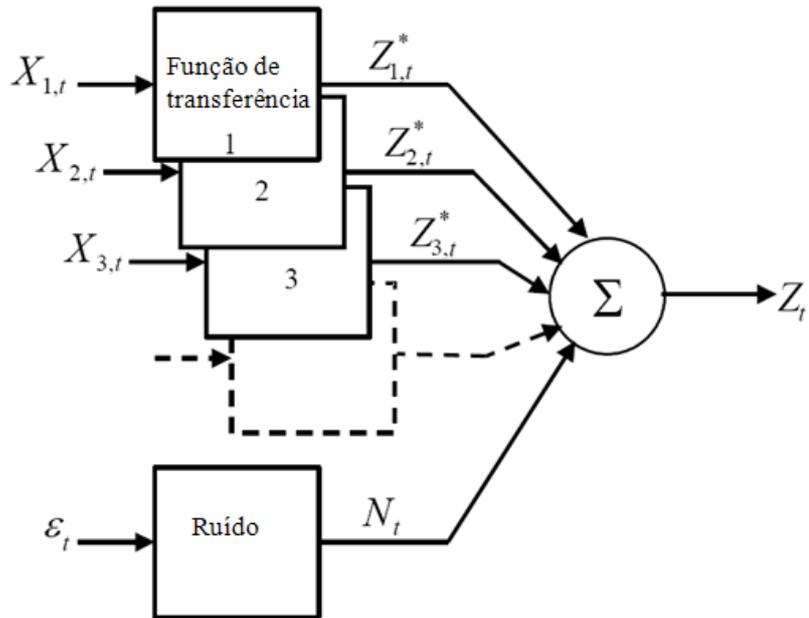


Figura 3 - Representação esquemática de um modelo de função de transferência de ruído.

Os parâmetros do modelo de séries temporais também podem ser regionalizados, usando informações auxiliares relacionadas às bases físicas do processo (Knotters e Bierkens, 2000; Knotters e Bierkens, 2001). Assim, as variações do nível freático são descritas assumindo que diferenças espaciais na dinâmica da superfície livre são determinadas pela variação espacial das propriedades do sistema, enquanto sua variabilidade temporal é dada pela dinâmica das variáveis de entrada no sistema (Manziona, 2007).

2.3.2 O modelo PIRFICT

O comportamento de um sistema linear de entrada e saída pode ser completamente caracterizado por sua função de impulso e resposta (IR) (Ziemer *et al.*, 1998; Von Asmuth *et al.*, 2002). O modelo PIRFICT (Predefined Impulse Response Function In Continuous Time) é uma alternativa a modelos de função de transferência de ruído em intervalos de tempo discretos apresentada por Von Asmuth *et al.* (2002). No modelo PIRFICT o pulso de entrada é transformado em uma série de saída por uma função de transferência em tempo contínuo. Os coeficientes dessa função não dependem da frequência de observação. Assumindo-se linearidade no sistema, uma série de níveis freáticos é uma transformação de uma série de precipitação excedente, descontando a

evapotranspiração potencial. Essa transformação é completamente governada pela função IR. Para o caso de um sistema linear simples, sem perturbações, que é influenciado somente pela precipitação excedente, o modelo TFN a seguir (escrito como uma convolução integral) pode ser usado para descrever a relação entre níveis freáticos e a precipitação excedente (Von Asmuth *et al.*, 2002):

$$h(t) = h^*(t) + d + r(t) \quad (2)$$

$$h^*(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)\theta(t-\tau)d\tau \quad (3)$$

$$r(t) = \int_{-\infty}^t \phi(t-\tau)dW(\tau) \quad (4)$$

em que $h(t)$ é o nível freático observado no instante t [T]; $h^*(t)$ é o nível freático predito no instante t creditado ao excedente de precipitação relativo a d [L]; d é o nível de $h^*(t)$ sem a influência da precipitação ou, em outras palavras, o nível da drenagem local, relativo à superfície do solo [L]; $r(t)$ é a série dos resíduos [L]; $p(t)$ é a intensidade do excedente de precipitação no instante t [L/T];

$\theta(t)$ é a função de transferência de impulso/resposta (IR) [-]; $\phi(t)$ é a função IR do ruído [-]; e $W(t)$ é um processo de ruído branco contínuo (Wiener) [L], com propriedades $E\{dW(t)\}=0$, $E[\{dW(t)\}^2]=dt$, $E[dW(t_1)dW(t_2)]=0$, $t_1 \neq t_2$.

O nível da drenagem local d é obtido a partir dos dados como se segue:

$$d = \frac{\sum_{i=0}^N h(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N h^*(t_i)}{N} - \frac{\sum_{i=0}^N r(t_i)}{N} \quad (5)$$

em que N é o número de observações de nível freático.

A área e forma da função IR dependem muito das condições hidrologias *in situ*. $\theta(t)$ é uma função de distribuição Pearson tipo III (PIII df, Abramowitz e Stegun, 1964). A opção por esse tipo de função dá-se por sua natureza flexível, ajustando-se a uma grande gama de respostas hidrológicas. Assumindo-se linearidade, a componente determinística da dinâmica do nível freático é completamente descrita pelos momentos da função IR. Nesse caso, os parâmetros podem ser definidos segundo Von Asmuth *et al.* (2002):

$$\theta(t) = A \frac{a^n t^{n-1} e^{-at}}{\Gamma(n)} \quad (6)$$

$$\phi(t) = \sqrt{2\alpha\sigma_r^2} e^{-\alpha t} \quad (7)$$

em que A , a , n , são os parâmetros da curva ajustada, $\Gamma(n)$ é a função Gamma, α controla a taxa de decaimento de $\phi(t)$ e σ_r^2 é a variância dos resíduos.

A função PIII df assume formas variando gradualmente de curva exponencial à uma gaussiana, conforme os valores de seus parâmetros (Figura 4). As equações 6 e 7 e seus parâmetros apresentam sentido físico como descrito em Von Asmuth e Knotters (2004). O parâmetro A é relacionado com a resistência à drenagem (a área da função IR é igual à razão entre nível freático e a recarga média). O parâmetro a é determinado pelo coeficiente de armazenamento do solo (porosidade) e n pelo tempo de convecção e dispersão da percolação através da zona não saturada. As bases físicas são explicadas por funções de transferência de uma série de reservatórios lineares (Nash, 1958). O parâmetro n demonstra o número de reservatórios e a é igual ao inverso do coeficiente de reservatório normalmente usado. Como explicam Knotters e Bierkens (2000), um simples reservatório linear (PIII df com $n=1$) é igual a um simples modelo físico de coluna de solo unidimensional, descartando o fluxo lateral e a influência da zona não-saturada. Von Asmuth e Knotters (2004) chamam atenção para cuidados ao interpretar esses parâmetros da PIII df quanto a seu sentido físico no processo, uma vez que suas bases são empíricas.

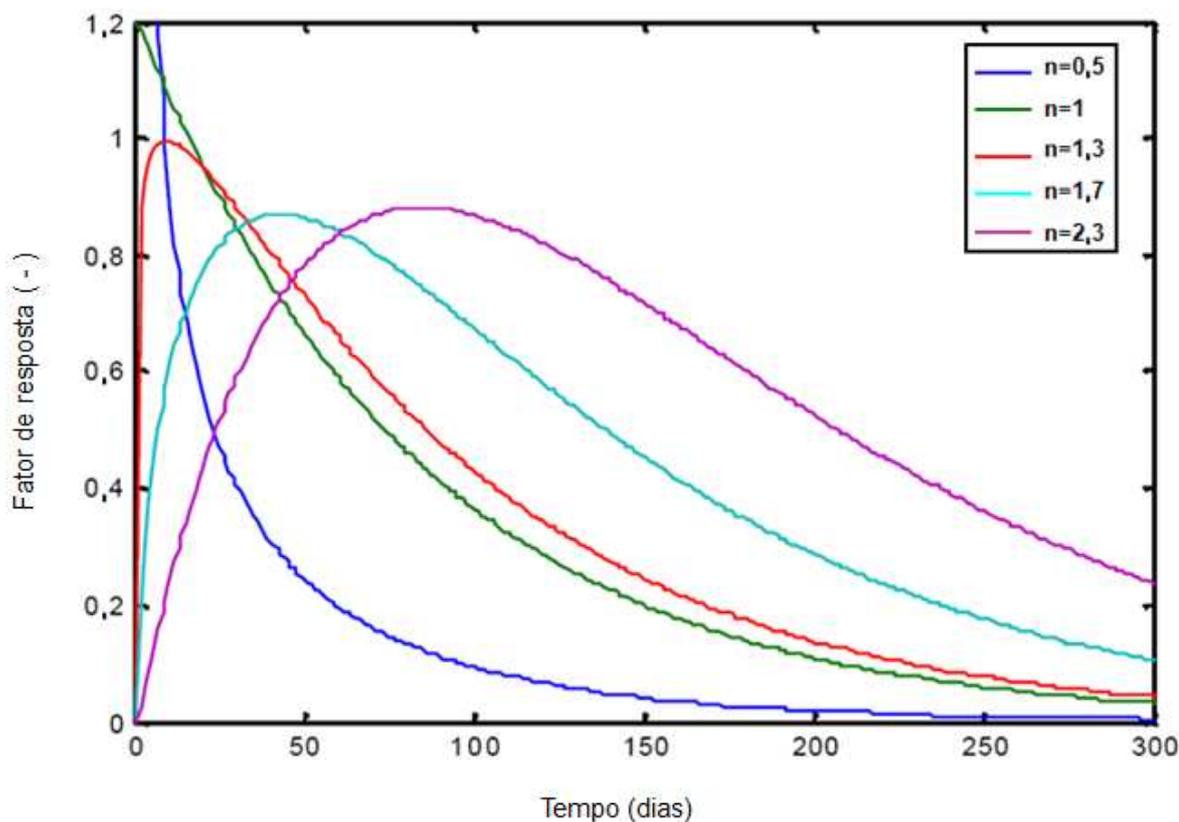


Figura 4 - Exemplo das formas que uma função de distribuição Pearson tipo III pode assumir ($n = [0,5; 1,0; 1,3; 1,7; 2,3]$, $A = n \times 100$, $a = 0,01$).

O modelo PIRFICT é capaz de lidar com qualquer frequência de dados por ser contínuo no tempo. Além disso, o modelo PIRFICT oferece uma vantagem adicional ao calibrar modelos TFN em séries irregulares, comparado a modelos autoregressivos combinados ao filtro de Kalman (Knotters e Bierkens, 2001), já que o formato da função de transferência não é restrita a um formato exponencial (Von Asmuth e Bierkens, 2005).

Originalmente formulado para descrever a variação dos níveis freáticos nos diques holandeses, o modelo PIRFICT demonstrou grande potencial de aplicação à realidade brasileira através dos estudos de Manzione (2007). A flexibilidade da função de impulso e resposta que estabelece a relação entre as variáveis climáticas e os níveis freáticos (Pearson III df) permite ao modelo ajustar-se a diferentes sistemas hidrológicos, como nos cerrados brasileiros.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo PIRFICT foi ajustado para os poços de monitoramento 4 e 5. Os resultados da calibração foram resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatísticas e parâmetros dos modelos ajustados para os poços 4 e 5.

	EVP	RMSE	RMSI	<i>A</i>	<i>a</i>	<i>n</i>
Poço 4	75,51	0,240	0,083	1724 (560)	0,0025 (0,0008)	1,435 (0,075)
Poço 5	85,00	0,274	0,120	1453 (160)	0,0058 (0,0009)	1,528 (0,077)

EVP=percentual da variância explicada pelo modelo; RMSE=raiz do erro quadrático médio; RMSI=raiz das inovações quadráticas médias; *A*=resistência à drenagem (metros); *a*=coeficiente de armazenamento no solo (1/dias); *n*=tempo de convecção e dispersão (dias). Valores entre parênteses são desvios.

Os resultados demonstram um bom ajuste para ambos os poços. O poço 5 apresentou valores Percentuais da Variância Explicada (EVP) pelo modelo superiores ao poço 4 em virtude de um melhor ajuste no início da série temporal, conforme pode ser observado na Figura 5. Apesar dos valores de EVP serem superiores para o poço 5, os valores da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) em ambos os casos são baixos, menores que 0,30 metros, o que ratifica um bom ajuste do modelo PIRFICT ao conjunto de dados. Erros dessa magnitude podem ocorrer em campo ao se utilizar equipamentos de sondagem para medição dos níveis. O mesmo se aplica aos valores da Raiz das Inovações Quadráticas Médias (RMSI), que mostra o erro relativo às inovações, ou seja, quanto o modelo erra em um instante *t* em relação a *t-1* (Von Asmuth e Bierkens, 2005).

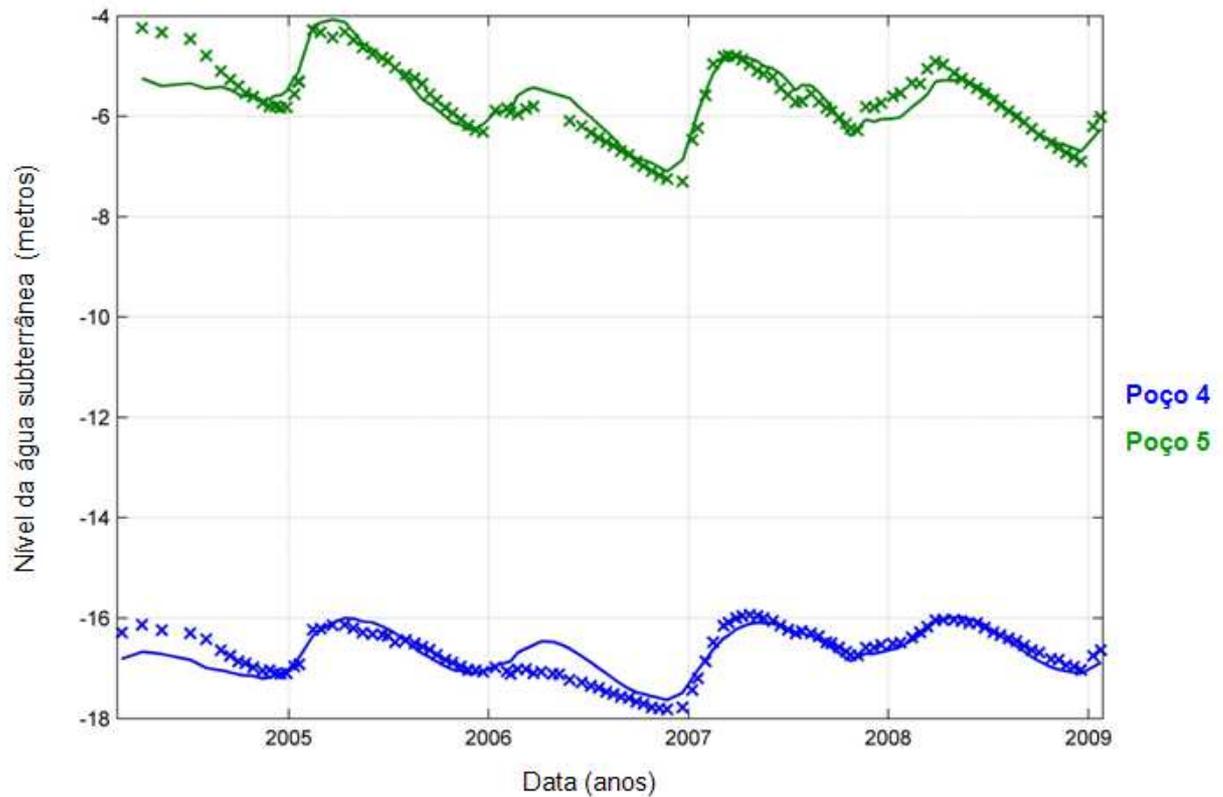


Figura 5 - Comparação entre os dados observados (x) e calibrados (-) pelo modelo PIRFICT para os poços 4 e 5.

Apesar dos poços estarem em profundidades diferentes, a Figura 5 demonstra que os níveis freáticos têm um comportamento semelhante ao longo dos cinco anos de monitoramento, quando submetidas ao mesmo estímulo de precipitação. As funções de impulso e resposta que determinam a relação dinâmica entre as variáveis de entrada no modelo e os níveis freáticos, para cada poço calibrado, são exibidas na Figura 6.

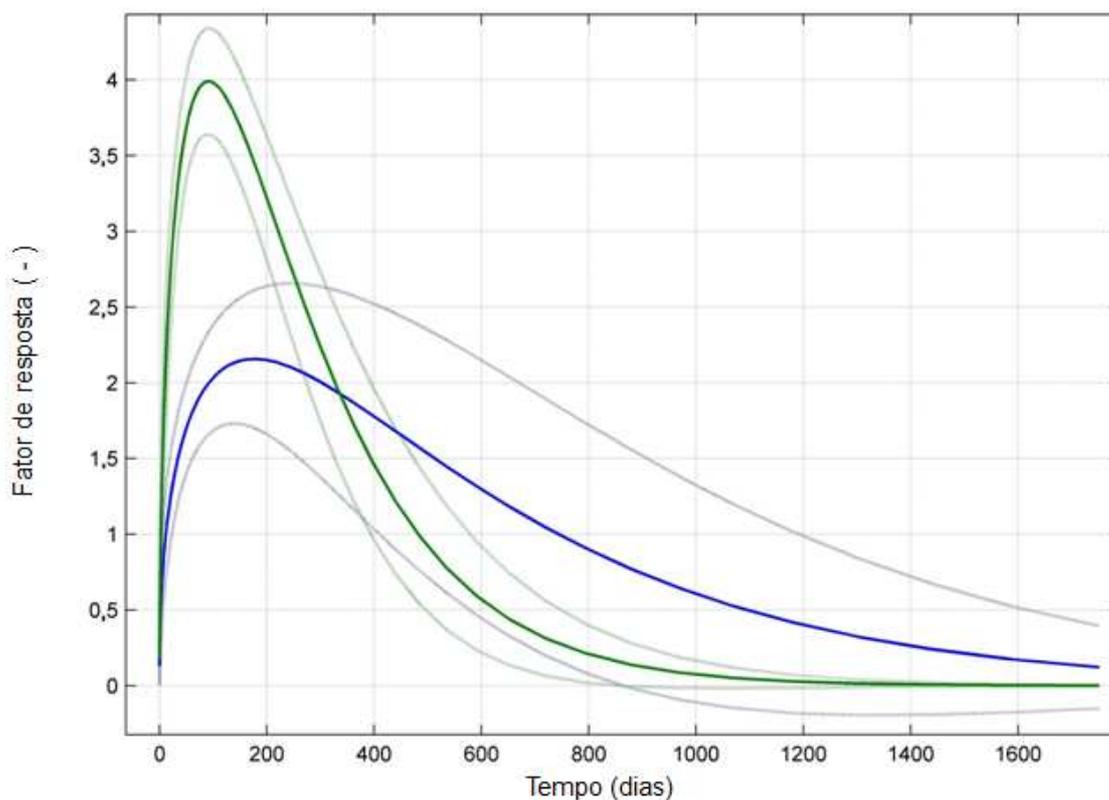


Figura 6 - Funções de impulso e resposta calibradas para os poços 4 e 5 (linhas sólidas) e seus respectivos intervalos de confiança (linhas claras).

As funções de impulso e resposta revelam o momento em que os níveis freáticos respondem ao estímulo da precipitação. Por estarem em profundidades diferentes, os níveis do poço 4 demoram mais para responder, o que denota uma curva com área maior que a curva calculada para o poço 5. Os parâmetros das funções de impulso e resposta denotam sua área. Fisicamente, faz sentido que o parâmetro A da função de impulso e resposta para o poço 4 seja maior, já que o tempo de resposta é maior. Já o parâmetro a se comporta de maneira inversa, sendo maior onde a resposta é mais rápida (poço 5). Os valores entre parênteses na Tabela 1 são os desvios das estimativas dos parâmetros. Os altos valores obtidos para o poço 4 revelam uma maior incerteza relacionada às estimativas, como visto também nos intervalos na Figura 6. Nesse caso, possivelmente também há outros fatores influenciando na relação entre as variáveis de entrada do modelo e níveis freáticos. A base empírica do método apresentado recomenda que para uma interpretação física mais fidedigna dos parâmetros do modelo, sejam feitos ensaios a campo para determinar analiticamente valores de condutividade hidráulica e porosidade. Entretanto, a dificuldade de se obter tais valores em diferentes

profundidades reforça a aplicabilidade do modelo PIRFICT para simular alturas de lençol freático a partir de funções de impulso e resposta.

4 - CONCLUSÕES

O modelo PIRFICT mostrou-se eficaz na modelagem de séries temporais de níveis freáticos em função das séries observadas e das séries exógenas de precipitação e evapotranspiração potencial.

As funções de impulso e resposta calculadas caracterizaram a dinâmica do sistema aquífero quanto à espessura do meio poroso que a água tem que atravessar para que haja uma resposta nos níveis.

O método demonstra potencial para modelagem de níveis em áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani, assim como aplicações em outros domínios aquíferos livres.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (processo 2009/05204-8) e ao CNPq - Brasil (processo 152033/2008-4) pelos auxílios financeiros que viabilizaram o desenvolvimento deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I.A. (1964). *Handbook of mathematical functions*. Dover Publications Inc, New York, 1046 p.

BARRETO, C.E.A.G. (2006). “*Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa*”. 2006. 249 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Sanamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP), São Carlos.

BORGHETTI, N.R.B.; BORGHETTI, J.R.; ROSA FILHO, E.F. (2004). *Aquífero Guarani, a verdadeira integração dos países do Mercosul*. Curitiba, 214 p.

- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. (1976). *Time series analysis: forecasting and control*. 2.ed. Holden-Day, San Francisco, 575 p.
- HIPEL, K.W.; McLEOD, A.I. (1994). *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Elsevier, Amsterdam, 1013 p.
- KNOTTERS, M.; BIERKENS, M.F.P. (2000). “Physical basis of time series models for water table depths”. *Water Resources Research* 36, pp. 181-188.
- KNOTTERS, M., BIERKENS, M.F.P. (2001). “Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model”. *Geoderma* 103, pp. 51– 77.
- MANOEL FILHO, J. (2000). “Água subterrânea: história e importância”, in *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. Org. por Feitosa, F.A.C. e Manoel Filho, J., CPRM/REFO-UFPE, Fortaleza-CE, pp. 3-12.
- MANZIONE, R.L. (2007). “Regionalized spatio-temporal modeling of water table depths in the Brazilian Cerrado”. 2007. 141p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.
- MONTEITH, J.L. (1965). “Evaporation and environment” in XIX Symposia of the Society for Experimental Biology, Cambridge, 1965, pp. 205-234.
- NASH, J.E. (1958). “Determining runoff from rainfall”. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 10, pp.163-184.
- TANKERSLEY, C.D.; GRAHAM, W.D. (1994). “Development of an optimal control system for maintaining minimum groundwater levels”. *Water Resources Research* 30, pp. 3171-3181.
- TUCCI, C. E. M. (2005). *Modelos hidrológicos*. 2.ed., Ed. UFRGS, Porto Alegre, 678 p.
- VAN GEER, F.C.; ZUUR, A.F. (1997). “An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series”. *Journal of Hydrology* 192, pp. 65-80.
- VON ASMUTH, J.R.; BIERKENS, M.F.P.; MAAS, C. (2002). “Transfer function noise modelling in continuous time using predefined impulse response functions”. *Water Resources Research* 38 (12), pp. 23.1-23.12.
- VON ASMUTH, J.R.; KNOTTERS, M. (2004). “Characterising groundwater dynamics based on a system identification approach”. *Journal of Hydrology* 296, pp. 118-34.

VON ASMUTH, J.R.; BIERKENS, M.F.P. (2005). “*Modelling irregularly spaced residual series as a continuous stochastic process*”. *Water Resources Research* 41, pp. W12404.

YI, M.; LEE, K. (2003). “*Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data*”. *Journal of Hydrology* 288, pp. 272-287.

ZIEMER, R.E.; TRANTER, W.H.; FANNIN, D.R. (1998). *Signals and systems: continuous and discrete*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, 622 p.