

ISSN 0104-1347

Análise espaço-temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do rio Piracicaba, SP

Spatial and temporal analysis of hidrometeorological parameters in the Piracicaba river, SP, Brazil

Giampaolo Queiroz Pellegrino¹, Jorge Marcos de Moraes², Manuel Enrique Gamero Guandique³, Maria Victoria Ramos Ballester², Reynaldo Luiz Victoria² e Luiz Antonio Martinelli²

Resumo - A intensa atividade agrícola aliada ao crescimento urbano e industrial na bacia do rio Piracicaba, faz com que exista uma preocupação crescente quanto à qualidade e à quantidade de seus recursos hídricos e quanto à variabilidade de alguns elementos climáticos. A necessidade da racionalização do uso e conservação dos recursos naturais dessa bacia, faz com que uma melhor compreensão da distribuição espacial e da variação temporal dos principais componentes do ciclo hidrológico sejam de fundamental importância. Neste trabalho, o estudo da variabilidade espacial da precipitação, evapotranspiração e vazão da bacia do rio Piracicaba no período de 1947 a 1991, foi realizado através de bancos de dados georeferenciados num Sistema de Informações Geográficas (SIG) e a variação temporal desses elementos foi analisada através dos testes estatísticos não-paramétricos de Mann-Kendall e Pettitt. A análise da distribuição espacial dos principais elementos hidrológicos permitiu entender o efeito das massas de ar atuantes na América do Sul sobre as chuvas na bacia. A análise das séries temporais mostrou aumentos estatisticamente significativos da precipitação e da evapotranspiração no período estudado.

Palavras-chave: balanço hídrico, bacia hidrográfica, análise de séries temporais, análise de tendência.

Abstract - The intensive land-use for crop production, associated with strong industrial and urban growth, has led to the urgent need to address the issue of both quantity and quality of water resources in the Piracicaba river basin. One of the primary basic steps is to understand the spatial and temporal variations of the three key components of the hydrological cycle: precipitation, evapotranspiration and streamflow. In this paper, the spatial and temporal variations of these parameters, for a period ranging from 1947 to 1991, were addressed by using a georeferenced data base coupled to a Geographic Information System (SIG), and the Man-Kendall and Pettitt non-parameteric statistical tests. The analysis of the spatial distribution of precipitation showed that the effects of the atmospheric circulation on South America on the rainfall patterns over the basin. The temporal analysis resulted in increasing trends for both precipitation and evapotranspiration in the period.

Key words: water balance, watershed, temporal analysis, trend analysis.

Introdução

Uma das principais características de um rio é a quantidade ou volume de água que o mesmo trans-

porta, que por sua vez, é uma função direta do balanço entre a precipitação e a evapotranspiração ocorridas na bacia. A definição desses elementos que compõem o ciclo hidrológico, e suas variações no tempo

¹ Pesquisador, Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura, UNICAMP, CEP 13081-970, Campinas, SP.

² Pesquisadores, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, Av. Centenário 303, CEP 13416-000, Piracicaba, SP.

³ Pós-Doutorando, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, Av. Centenário 303, CEP 13416-000, Piracicaba.

e no espaço, são de fundamental importância tanto para caracterizar e entender os aspectos básicos de funcionamento de uma bacia hidrográfica, quanto para gerenciar seus recursos hídricos.

A bacia do rio Piracicaba (12.400km²), localizada no Estado de São Paulo, é um exemplo típico de bacia “desenvolvida”, onde o uso e cobertura do solo têm sido dramaticamente alterados neste último século. Esse quadro é agravado pelo fato que, com o desenvolvimento de alguns municípios da bacia, a região passou a ser um pólo de atração de diversas atividades altamente consumidoras e degradadoras dos recursos hídricos (GANZELLI, 1991).

As mudanças na cobertura e uso do solo, aliadas ao uso da água para abastecimento público, industrial e agrícola, alteram as características hidrológicas básicas de uma bacia (BAHC, 1983). Alterações na cobertura do solo modificam o albedo e, conseqüentemente, o balanço de energia, influenciando o retorno de água para a atmosfera através da evapotranspiração (SHUKLA *et al.*, 1991). Adicionalmente, a retirada de água dos rios para abastecimento pode levar a uma alteração nos fluxos naturais, com conseqüente concentração de agentes poluidores.

Diante deste quadro, uma melhor compreensão do funcionamento da bacia do rio Piracicaba, em seu aspecto hidro-climatológico e suas interações com as atividades antrópicas, é de fundamental importância como subsídio para a tomada de decisões em relação à racionalização do uso da água e à conservação desse recurso.

Os principais objetivos deste estudo consistem na caracterização da variabilidade espacial e na realização de análise estatística exploratória das séries temporais dos principais componentes do ciclo hidrológico da bacia do rio Piracicaba. A análise temporal fundamentou-se na localização de sinais de eventuais mudanças naturais ou antrópicas no período de estudo, e não consiste, portanto, num estudo de tendências de longo prazo.

Material e métodos

Considerou-se nos cálculos apenas a porção da bacia do rio Piracicaba que vai até o posto fluviométrico do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) em Artemis (latitude: 22° 40'; longitude: 47° 46' e altitude: 540m), totalizando uma área de 10.956km² (Figura 1). Para uma melhor reso-

lução espacial, essa bacia foi dividida em cinco sub-bacias: Piracicaba(3.164 km²), Jaguari (2.492km²), Atibaia (2.769km²), Camanducaia (910km²) e o Corumbataí (1.621km²).

A quase totalidade da bacia hidrográfica apresenta clima subtropical Cwa, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais entre 18 e 22°C (SÃO PAULO, 1991). A precipitação anual média da bacia é de aproximadamente 1400mm (variando de 1300 mm na sua parte oeste a 1800 mm na sua parte leste, nas proximidades da Serra da Mantiqueira). Segundo CHRISTOFOLETTI (1991) cerca de 70% do volume de precipitação ocorre no verão, situação característica de clima tropical. Baseando-se nas medições de vazão feitas entre 1947 e 1991 pelo DAEE em vários pontos da bacia (Figura 1), a vazão média do rio Piracicaba em Artemis, considerado como exutório nesse estudo, é igual a 156 m³/s. As vazões médias dos rios Atibaia, Jaguari (antes da afluência do rio Camanducaia), Camanducaia e Corumbataí são de 37, 41, 14 e 24 m³/s, respectivamente. Segundo PELLEGRINO (1995), cerca de 30% da água de precipitação são convertidos em escoamento superficial, sendo o restante basicamente perdido por evapotranspiração.

As vazões dos rios Jaguari, Atibaia e conseqüentemente o Piracicaba, estão sujeitos à reversão de água para a bacia do Alto Tietê, através do Sistema Cantareira da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Esse sistema compreende quatro reservatórios localizados nas cabeceiras dos formadores do rio Piracicaba (Jaguari, Jacareí, Atibainha e Cachoeira) e um reservatório situado na cabeceira do rio Juqueri (fora da bacia do rio Piracicaba). Os reservatórios encontram-se interligados por túneis e canais até a Estação de Tratamento de Água do Guarau, na cidade de São Paulo. A construção do sistema teve início em 1965 (união dos rios) e foi implantada em duas etapas: a primeira compreendeu o aproveitamento dos rios Juqueri, Atibainha e Cachoeira, fornecendo a vazão nominal de 11m³/s para São Paulo, com início em 1975. Em 1976, tiveram início as obras relativas à segunda etapa, compreendendo as barragens dos rios Jaguari e Jacareí, que propiciou a adução de 33m³/s, dos quais 31m³/s provem da bacia do rio Piracicaba e 2m³/s provem da bacia do rio Juqueri (SÃO PAULO, 1989).

A coleta de dados foi planejada para cobrir o período mais longo possível em que houvessem re-

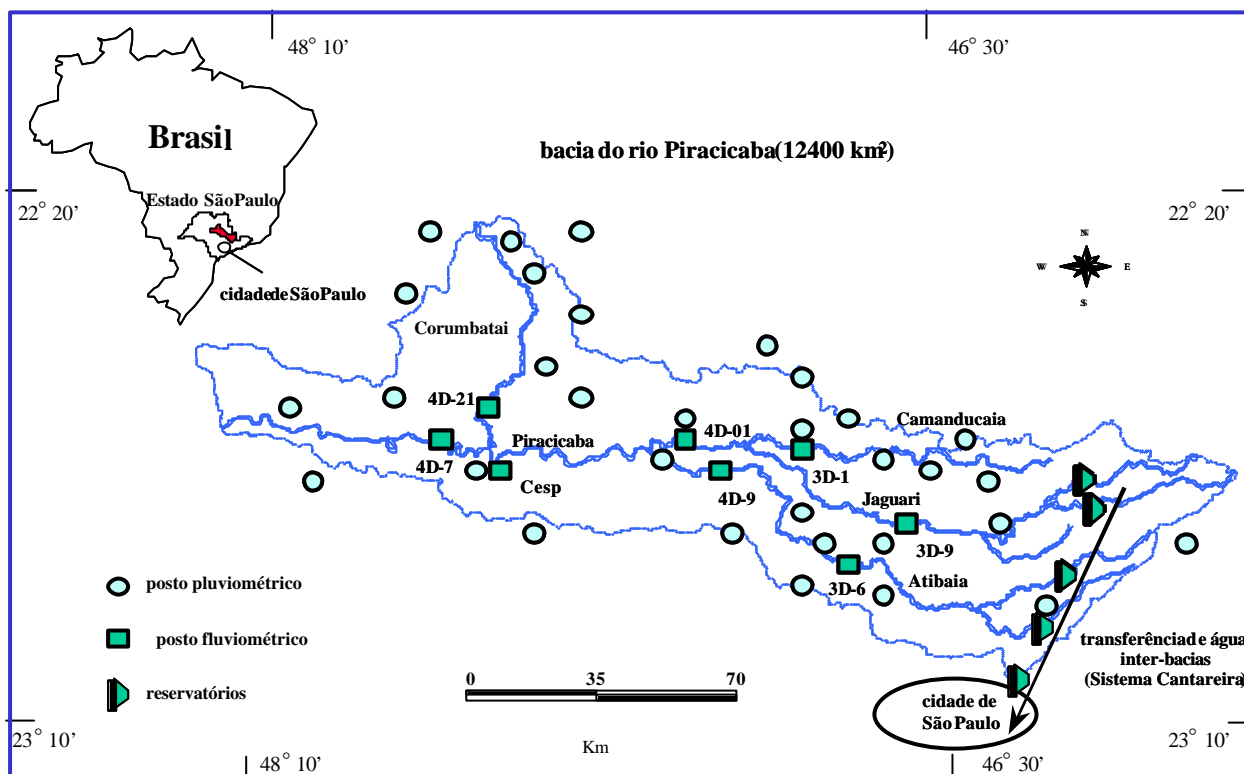


Figura 1 Localização da Bacia do rio Piracicaba, principais cidades, postos fluviométricos e pluviométricos utilizados e o esquema do Sistema Cantareira.

gistros simultâneos de precipitação e vazão, com uma boa densidade de distribuição das estações de medidas dentre os postos do DAEE. Considerando-se os compromissos entre a escolha de séries históricas longas, aliada a uma boa densidade de postos na bacia e vizinhanças, com qualidade e disponibilidade de dados, escolheu-se o período 1947-1991 para a realização do estudo. As correções das falhas e a análise de consistência dos dados foram realizadas através dos métodos clássicos apresentados por DUNNE & LEOPOLD (1978), UNESCO (1982) e TUCCI & BELTRAME (1993).

Nos cálculos da evapotranspiração e na análise da variabilidade das vazões dos principais rios da bacia foram utilizadas vazões reconstituídas através dos dados de operação do Sistema Cantareira fornecidos pela SABESP. A vazão líquida, também utilizada neste trabalho, foi calculada através da subtração das vazões entrando e saindo da região estudada. Esta consideração evita o efeito das barragens e das transferências de água inter-bacias e permite uma

observação mais detalhada da região em foco. Os dados de vazão foram também analisados usando os valores médios anuais e também as médias dos períodos secos e úmidos (trimestres julho-agosto-setembro e janeiro-fevereiro-março, respectivamente). A precipitação foi analisada através dos totais anuais, assim como, os totais dos períodos secos e úmidos (trimestres junho-julho-agosto e dezembro-janeiro-fevereiro, respectivamente).

Considerando-se a inexistência de medições diretas de evapotranspiração com períodos de observações compatíveis com os do presente trabalho, optou-se pela sua determinação através do balanço hídrico aplicando o princípio de conservação de massa a um corpo d'água para períodos anuais.

Os mapas foram gerados através de um SIG, com o objetivo de realizar a análise da distribuição espacial, assim como, para o cálculo dos valores médios da precipitação e da evapotranspiração em cada sub-bacia. Foi utilizado o programa IDRISI (EASTMAN, 1993). Os mapas anuais de precipita-

ção foram obtidos a partir dos arquivos de dados dos postos interiores e vizinhos à bacia, referenciados geograficamente. A interpolação, na obtenção da lâmina média de precipitação nas diversas sub-bacias, foi feita utilizando-se o Método do Inverso do Quadrado da Distância (WEI & MCGUINNESS, 1973 e EASTMAN, 1993).

Os mapas de vazão foram gerados através dos arquivos da seqüência das vazões totais anuais de cada sub-bacia, convertidas de m³/s para mm/ano.

A evapotranspiração foi calculada através do balanço hídrico, pela diferença entre precipitação e vazão, uma vez que para grandes áreas e períodos longos, a influência da variação de armazenamento do solo pode ser desprezada em relação às demais grandezas (UNESCO, 1982). Portanto, a criação dos mapas de evapotranspiração real (ETR) foi feita pela sobreposição por diferença dos mapas de precipitação e vazão de cada ano. Os resultados obtidos por esse método foram comparados aos estimados pelos métodos de Thornthwaite & Mather e de Turc, ambos recomendados pela UNESCO (1982). Foram utilizados nessa comparação os dados dos postos de Campinas, Limeira e Monte Alegre do Sul, do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e do posto de Piracicaba, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ).

A análise das séries temporais consistiu na verificação da existência ou não de tendências e mudanças bruscas nas médias e se estas eram estatisticamente significativas. Devido ao caráter exploratório dessa análise a filtragem dos valores extremos não foi realizada para não mascarar os eventuais sinais de mudanças devido a fatores naturais ou antrópicos. Foram utilizados dois métodos estatísticos não-paramétricos: a versão seqüencial do teste de Mann-Kendall (SNEYERS, 1975) e o teste de Pettitt (PETTITT, 1979). O primeiro atesta ou não a presen-

ça de uma tendência, o momento aproximado em que ela se torna significativa e também uma mudança brusca na média. O segundo detecta com mais precisão uma mudança brusca na média e a sua significância estatística. O equacionamento de ambos os testes pode ser encontrado em MORAES *et al.* (1995,1997) e PELLEGRINO (1995). Antes da aplicação desses testes, foi realizada a verificação da independência das séries temporais através da autocorrelação serial, sem o qual, tendências inexistentes podem ser detectadas (CLARKE & BRUSA, 1997; MARENGO *et al.*; 1996). Com tal finalidade foi utilizado o programa MHTS, “McLeod-Hipel Time Series Package” (MCLEOD & HIPEL, 1995).

Resultados e discussão

Um dos resultados do trabalho é a própria geração de um banco de mapas anuais de precipitação, evapotranspiração e vazão. Devido ao grande número de mapas gerados por 45 anos de dados, optou-se por apresentar somente os mapas de valores médios para os três tipos de dados.

Os valores médios anuais e dos trimestres úmido e seco para cada sub-bacia e para a bacia hidrográfica como um todo estão resumidos na Tabela 1, onde as vazões sujeitas à reversão de água pelo Sistema Cantareira já estão reconstituídas e os valores são expressos em mm de lâmina de água. As isoietas da Figura 2 representam os pontos onde os dados médios assumem exatamente os valores dos centros de classes. Essas são representadas em cores homogêneas onde os dados assumem valores de ± 25 mm em relação ao valor da isolinha. Observa-se claramente na Figura 2a, uma tendência crescente de chuva em dois sentidos: para nordeste, onde a variação é mais acentuada e onde o maior valor (1850mm) foi encontrado próximo da serra da Mantiqueira; e

Tabela 1. Dados de precipitação (P) e vazão (V) em valores médios anual, do trimestre úmido (tru) e do trimestre seco (trs), de evapotranspiração anual (ET- anual), e da relação ET/P (em %), expressos em mm, por sub-bacia e para toda bacia do rio Piracicaba.

Bacia hidrográfica	Precipitação			Vazão			Evapotranspiração	
	anual	tru	trs	anual	tru	trs	ET-anual	ET/P
Piracicaba	1353	630	110	389	172	49	964	72
Jaguari	1531	704	128	561	233	80	971	64
Atibaia	1452	657	126	461	177	72	991	68
Corumbataí	1390	659	103	460	191	65	930	67
Camanducaia	1537	719	126	490	202	72	1074	68
Toda a Bacia	1439	655	119	465	466	192	974	68

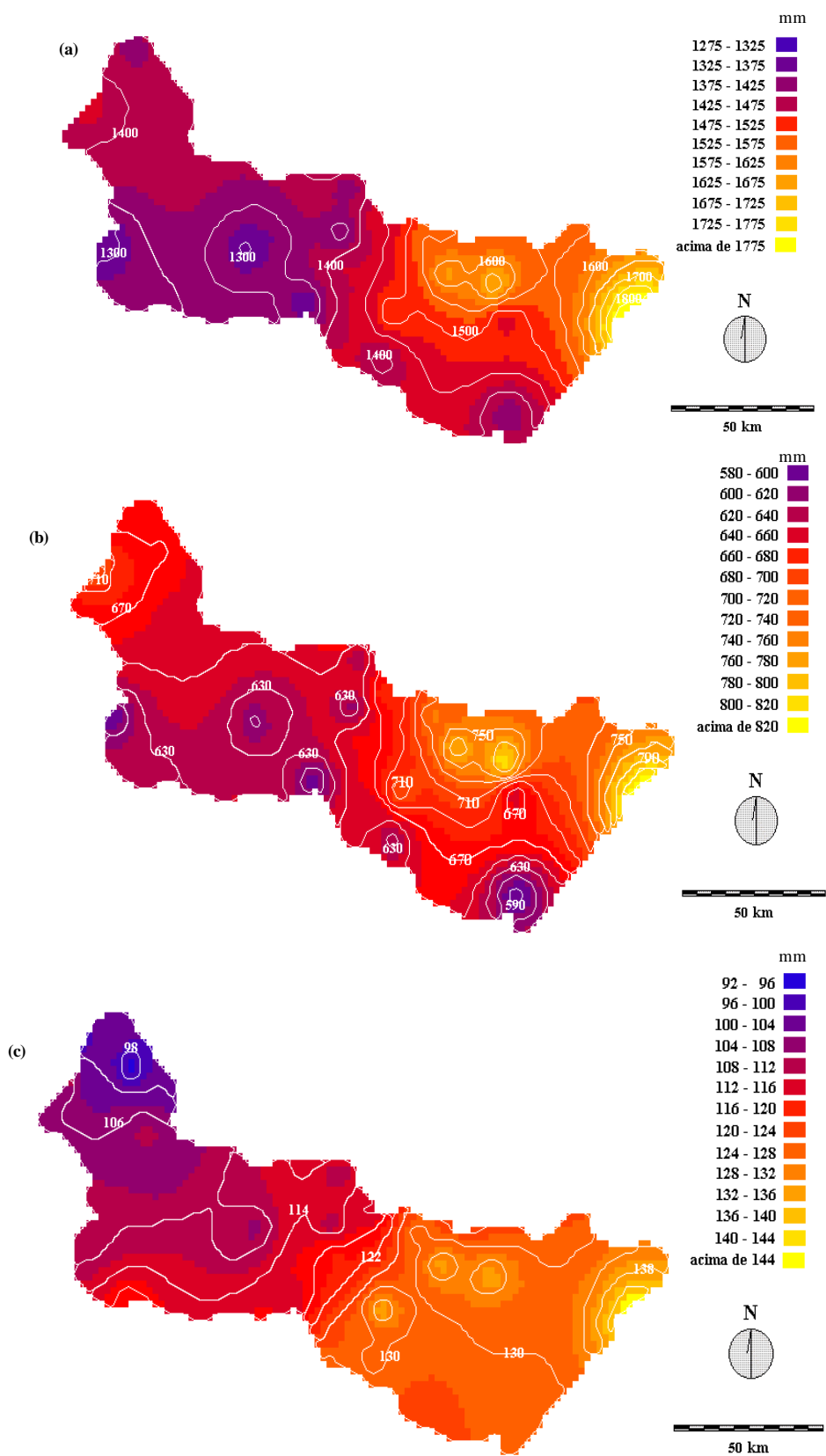


Figura 2 Distribuição espacial da precipitação média anual (a), trimestre úmido(b) e trimestre seco (c).Valores expressos em mm. As isoietas representam os pontos onde a variável assume os valores correspondentes aos centros de classe.

para noroeste, na sub-bacia do Corumbataí, com valores máximos em torno de 1500mm. Nesses dois sentidos o aumento da precipitação ocorre devido à influência do relevo. A região central e a oeste da bacia foram as que apresentaram menores valores, atingindo aproximadamente 1300mm, sendo baixos também os valores em todo o seu eixo sul.

Esses dados apresentam grande semelhança com os apresentados por SETZER (1966). Tendências espaciais semelhantes foram observadas também para as normais dos trimestres úmido (dezembro a fevereiro) e seco (junho e agosto) Figura 2b e 2c, respectivamente. A principal diferença observada foi a ausência de uma tendência crescente de precipitação no sentido noroeste durante o trimestre seco. Pelo contrário, foi observada uma tendência decrescente nesse sentido (Figura 2c). Essa alteração está relacionada à mudança na circulação atmosférica cujos detalhes podem ser encontrados em MONTEIRO (1973). No trimestre úmido (associado ao mês de janeiro no estudo de MONTEIRO (1973), a massa tropical atlântica (Ta) tem atuação pequena ou nula na costa do Brasil, e o encontro entre a massa equatorial continental (Ec) e a polar atlântica (Pa) é que provoca as chuvas em toda a região de estudo, ficando sua distribuição diretamente relacionada à elevação do relevo. Portanto, em direção às maiores elevações a chuva tende a aumentar. Já no trimestre seco (associado ao mês de julho no estudo de MONTEIRO, 1973), a atuação da massa Ec se desloca para o hemisfério norte e não se encontra mais com a Pa, diminuindo drasticamente a chuva. A Ta tem maior penetração nessa situação, sendo responsável pela maior parte das poucas chuvas que ocorrem na bacia nesse período, principalmente na sua porção leste, face ao efeito orográfico, o que explica que não haja aumento das chuvas em direção à serra na sub-bacia do Corumbataí.

Para a vazão foram utilizados dados reconstituídos e líquidos por sub-bacia, ou seja, foi retirado o efeito de operação de barragens e retiradas as entradas de vazões das bacias à montante. Portanto, não há mapas com a variação espacial contínua como para a precipitação, mas sim dados tabelados contendo os valores médios anuais e dos trimestres úmido e seco para cada sub-bacia e para a bacia como um todo (Tabela 1). As sub-bacias com maiores vazões anuais normais foram as do Jaguari e Camanducaia. Esses valores podem ser facilmente explicados pela maior contribuição da zona serrana, que apresenta os maiores índices pluviométricos e também as maiores declividades, fazendo, provavel-

mente, com que uma maior porcentagem da água daquela região seja destinada ao escoamento superficial. A sub-bacia que apresentou menor vazão foi a do Piracicaba, provavelmente devido à menor altura pluviométrica observada na mesma. As bacias do Corumbataí e do Atibaia tiveram vazões médias semelhantes, com valores intermediários.

O método do balanço hídrico não permite estimar a evapotranspiração real para períodos menores que um ano apenas com os dados disponíveis, por isso, não são apresentados dados trimestrais para essa característica (Tabela 1). Os valores médios de evapotranspiração não diferiram acentuadamente entre as sub-bacias. O maior valor encontrado foi na sub-bacia do Camanducaia e o menor na do Corumbataí. Entre esses dois extremos a diferença foi de 100mm. Outra característica importante é a fração da chuva que retorna à atmosfera via evapotranspiração (ET/P). A média para toda a bacia foi de 68%, sendo o restante (32%) escoado pelos rios.

A Figura 3 mostra a distribuição espacial da evapotranspiração média anual na bacia. Nesse caso as isolinhas da evapotranspiração não foram traçadas devido as descontinuidades observadas na representação desse parâmetro. Essa característica ocorreu principalmente pelo fato da vazão ter sido representada por sub-bacias, ressaltando a importância dos seus limites. Quando se compara essa figura à carta de evapotranspiração potencial de SETZER (1966), detecta-se diferenças fundamentais na distribuição dos valores, principalmente no início da região serrana do extremo leste da bacia. Como o método de Thornthwaite & Mather empregado por esse autor baseia-se fundamentalmente na temperatura, o mesmo apresentou valores mais baixos nessa região. Por outro lado, o balanço hídrico, da maneira como foi utilizado neste trabalho, fornece valores mais elevados, pois baseia-se no balanço de entrada da água pela precipitação que, como já visto, é bem maior na região serrana, e da saída através da vazão, que não é tão maior que nas demais sub-bacias. Um aprimoramento nesse aspecto seria a elaboração de mapas de valores contínuos também para a vazão. Comparando-se valores de evapotranspiração calculados a partir do balanço hídrico, em pontos isolados do mapa, com os obtidos pelos métodos de Turc e de Thornthwaite & Mather (TUCCI & BELTRAME, 1993), observaram-se discrepâncias médias em torno de 15% para o método de Turc e 20% para o de Thornthwaite & Mather.

As séries temporais não apresentaram autocorrelação serial significativa. Os valores são

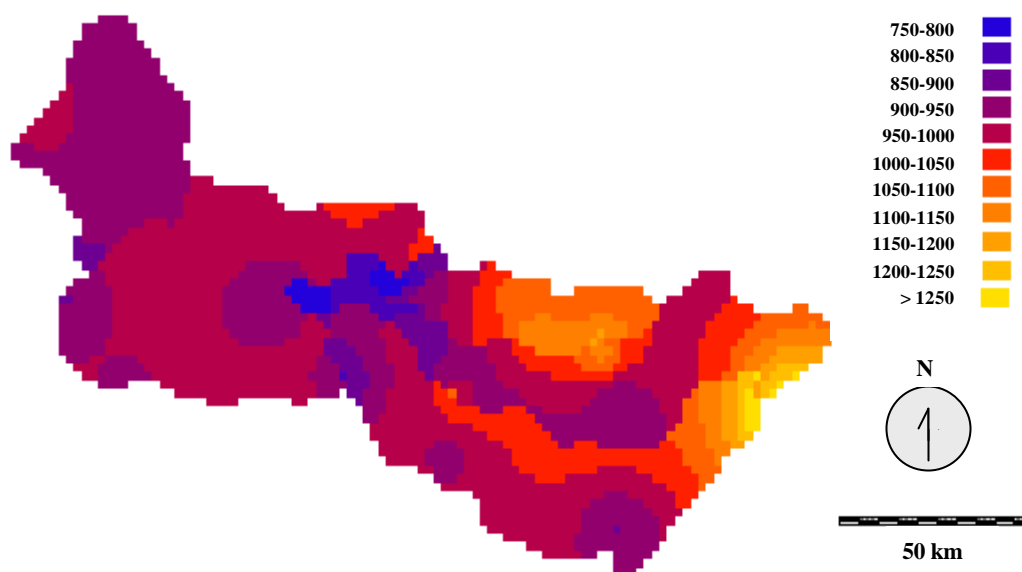


Figura 3. Distribuição espacial da evapotranspiração real anual média (mm) na área da bacia do rio Piracicaba, SP.

portanto, independentes e os testes estatísticos não paramétricos puderam ser aplicados. O teste estatístico de Mann-Kendall (SNEYERS, 1975) em sua versão seqüencial aplicado ao total anual de precipitação para a bacia total é apresentado na Figura 4a. Essa forma gráfica do teste mostra as aplicações direta $u(t)$, e inversa $u^*(t)$, na série temporal, isto é, ele é aplicado aos valores de precipitação no sentido crescente (1947-1991) e decrescente (1991-1947) em relação ao tempo. As linhas horizontais representam os intervalos de confiança bilaterais de 90% (linha tracejada) e 95% (linha contínua). Esse teste permite a detecção de uma tendência significativa quando os valores absolutos de $u(t)$ ultrapassam os limites de confiança (levemente significativo quando $1,65 < u(t) < 1,96$ e significativo quando $u(t) > 1,96$). Na existência de uma mudança brusca na variabilidade estatística da série, a mesma é localizada pela interseção das curvas $u(t)$ e $u^*(t)$ se ela ocorre dentro dos valores críticos do intervalo de confiança (GOSENS & BERGER, 1986).

No caso mostrado na Figura 4a, observa-se uma tendência crescente da precipitação na bacia total, começando a se tornar significativa após 1975, quando a curva $u(t)$ ultrapassa a linha do intervalo de confiança, mas as múltiplas interseções tornam difícil a localização exata do ponto onde uma mudança brusca ocorreu.

Por outro lado, esse ponto de inflexão na série temporal pode ser detectado de uma forma mais precisa utilizando-se o teste estatístico de Pettitt (PETTITT, 1979), onde uma variação brusca na média em um tempo desconhecido é localizada no ponto onde o máximo valor absoluto da estatística $k(t)$ ocorre. A Figura 4b mostra a variação da estatística $k(t)$ em relação ao tempo para a mesma série de precipitação da bacia total, onde as linhas horizontais como no caso anterior, representam os intervalos de confiança bilaterais de 90% (linha tracejada) e 95% (linha inteira). Nessa figura observa-se uma mudança brusca na média da série temporal ocorrendo no ano de 1969, com significância aproximada de 0,05.

Para as sub-bacias do Corumbataí, Piracicaba e Atibaia a significância da tendência aparece a partir do começo da década de 80 e pelo método de Pettitt, o fim da década de 60 foi apontada como o início da tendência, ou então, o ponto onde a série pode ser dividida em duas amostras estatisticamente diferentes (ponto de quebra de série). Para as sub-bacias do Jaguari e Camanducaia, a significância da tendência surgiu aproximadamente 10 anos antes em relação às outras sub-bacias e o ponto de quebra de série também ocorre cerca de 10 anos antes nessas duas sub-bacias. Finalmente, para a bacia como um todo, a tendência aparece significativamente a partir do meio

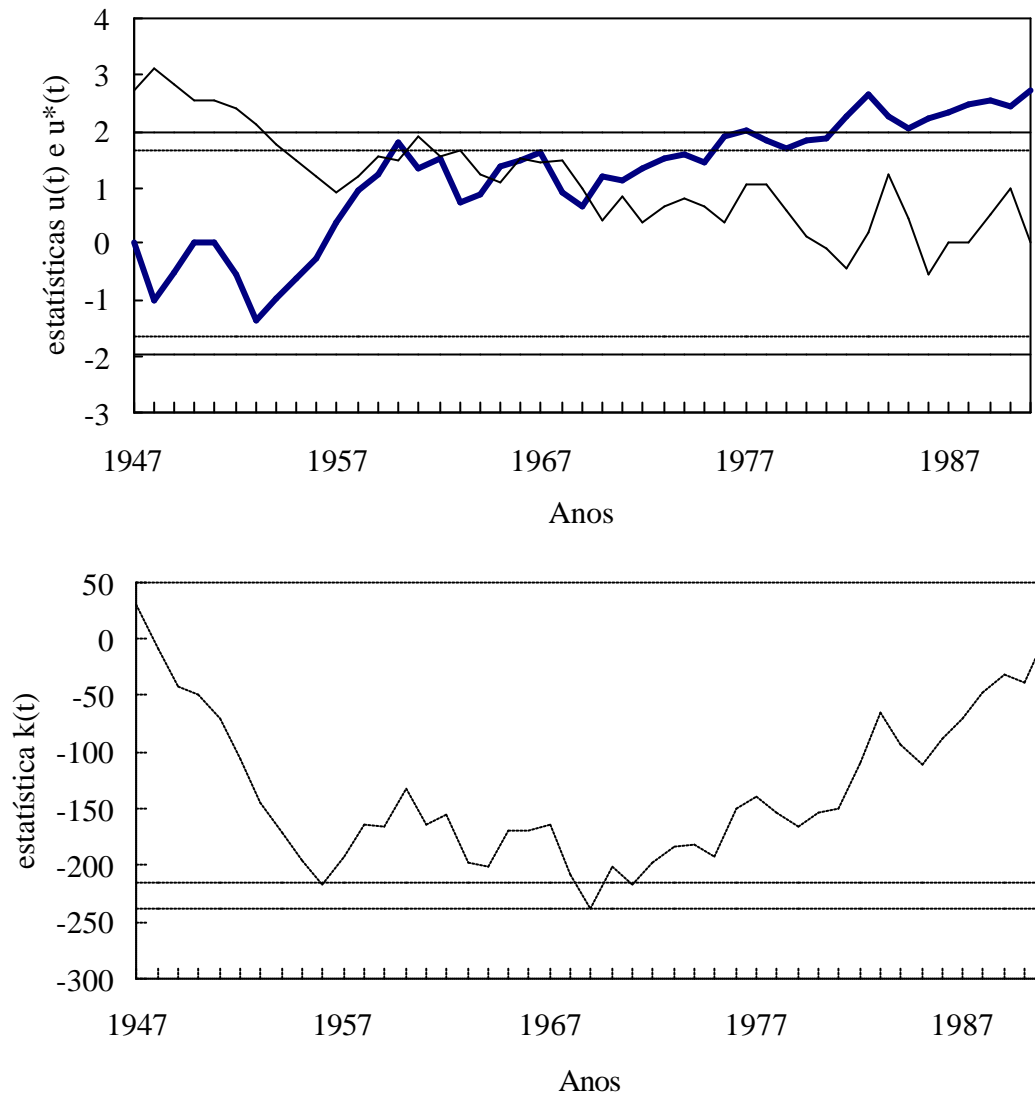


Figura 4. Exemplo do resultado gráfico gerado a partir do método de (a) Mann-Kendall (SNEYERS, 1975) e (b) Pettitt (PETTITT, 1979). As linhas horizontais representam os intervalos de confiança de 90% (linhas tracejadas) e 95% (linhas contínuas) para a bacia do rio Piracicaba, SP.

da década de 70 e a ocorrência de mudanças bruscas na média foram detectadas a partir do fim da década de 60.

Analisou-se também a tendência da precipitação para os trimestres úmido e seco. Não foi observada tendência alguma para o trimestre úmido, tanto para a sub-bacias como para a bacia como um todo. Para o trimestre seco, no entanto, todas apresentaram tendência de aumento, com ruptura em 1969 segundo o método de Pettitt e significância iniciando entre

1978 e 1981, segundo o método de Mann-Kendall (Tabela 2). Portanto, é interessante notar que o aumento das chuvas no período estudado não ocorreu de forma homogênea durante todas as estações, mas sim foi provocado principalmente pelo aumento observado no período seco.

Quanto às vazões reconstituídas e líquida dos rios, na maioria dos casos, os testes de Mann-Kendall e de Pettitt indicaram que os dados de vazão natural líquida não apresentaram tendência significativa em

nenhuma sub-bacia e nem na série anual ou trimestre úmido e seco. Como houve um aumento significativo na precipitação da bacia, esperava-se que a vazão dos rios também estivesse aumentando.

Finalmente, os resultados dos testes estatísticos mostraram que em todas as sub-bacias, com exceção da sub-bacia do rio Piracicaba, houve uma tendência crescente na evapotranspiração. Na sub-bacia do rio Piracicaba houve também uma tendência crescente, mas a mesma não foi estatisticamente significativa. Nas sub-bacias do Corumbataí e Atibaia e na bacia como um todo, a tendência é positiva, passando a ser significativa por volta de 1973, com ponto de ruptura em 1968/1969. A bacia do rio Jaguari começou a ter uma tendência crescente significativa a partir de 1955, mas seu pico de quebra ocorreu em 1968/1969. As explicações para os aumentos na precipitação e evapotranspiração detectados neste trabalho não são fáceis de serem encontradas pelos dados que dispomos atualmente e pela própria metodologia utilizada. A explicação mais simples para o aumento observado na evapotranspiração seria o aumento observado na precipitação, ou seja, havendo mais água disponível, maior seria a evapotranspiração. No entanto, as variáveis que interferem no processo de evapotranspiração são inúmeras e não permitem uma pressuposição tão simplista. Algumas especulações, no entanto, podem ser feitas. Um dos elementos mais importantes no processo de evapotranspiração é a temperatura do ar. Como é sabido, tanto no Hemisfério Sul como no Norte, tem sido detectado um aumento de temperatura da ordem de 0,5°C por século (JONES et al., 1986a, 1986b). Alguns autores, como SCHÄDLER (1987), consideram essa como sendo umas das causas principais para aumentos de evapotranspiração em bacias européias. Outro fator que reconhecidamente interfere nesse processo são as mudanças no uso da terra. Tanto em bacias menores (da ordem de 2000 km²), como em grandes bacias (6.400.000 km² - Amazônia) foi demonstrado, através de modelos numéricos, que mudanças no uso da terra interferem no processo de evapotranspiração. A maneira com que interferem é muito complexa, dependendo de várias características específicas de cada bacia, incluindo fatores biológicos, físicos e climatológicos (LEAN & WARRILOW, 1989; NOBRE et al., 1991). A diminuição da evapotranspiração na Amazônia (NOBRE et

al., 1991) é decorrente da mudança floresta-pastagem, onde as mudanças na captação de água em camadas mais profundas do solo pela floresta, no albedo e em outros fatores intervenientes no processo de evapotranspiração são extremos. Já em bacias impactadas, como é o caso da bacia do rio Piracicaba, a mudança no uso da terra não é uma mudança direta floresta-pasto, principalmente no período estudado. Podem haver, por exemplo, mudanças pasto-cana-de-açúcar, pasto-citrus ou ainda outras culturas com sistema radicular e cobertura foliar diferentes, onde as mudanças nos processos relativos à evapotranspiração não são tão óbvias. A cobertura do solo na área da bacia do Piracicaba vem sendo modificada nestes 50 anos que a base de dados engloba, e um estudo detalhado dessa variação pode trazer novas perspectivas à compreensão das mudanças hidro-climáticas detectadas.

Conclusões

O trabalho gerou um banco de dados espacializado de precipitação, evapotranspiração e vazão, período de 1947 a 1991, utilizando um Sistema Geográfico de Informações (SIG). Os padrões de distribuição podem ser explicados pelo efeito das

Tabela 2 Tendências positivas de precipitação anual (P) e do trimestre seco (trs) e de evapotranspiração real (ETR) do trimestre seco e pontos de ruptura nos níveis de significância de 5% (**), 10% (*) e acima de 10% (ns), por sub-bacia e para toda a bacia do rio Piracicaba.

Bacia		P-anual	P-trs	ETR-trs
Piracicaba	Tendência	1982**	1980**	1991*
	Ruptura	1969ns	1969*	1969ns
	Nível sig.	11%	6.6%	21%
Jaguari	Tendência	1973**	1980**	1956**
	Ruptura	1956**	1969*	1969**
	Nível sig.	3.4%	6.6%	0.5%
Atibaia	Tendência	1982**	1981**	1972**
	Ruptura	1969**	1969*	1969**
	Nível sig.	3.4%	5.9%	0.9%
Corumbataí	Tendência	1982**	1977**	1976**
	Ruptura	1969**	1969*	1968**
	Nível sig.	5.5%	5.9%	1.3%
Camanducaia	Tendência	1972**	1979**	1955**
	Ruptura	1956**	1969ns	1954**
	Nível sig.	5.5%	11%	4.3%
Toda a Bacia	Tendência	1976**	1979**	1972**
	Ruptura	1969**	1969*	1969**
	Nível sig.	5.2%	6.6%	2.0%

massas de ar atuantes na América do Sul e pela influência do relevo. O aumento da precipitação ao longo dos anos é devido principalmente ao aumento da mesma no período seco. Nenhuma tendência significativa é detectada nas vazões reconstituídas.

Referências bibliográficas

- BAHC. **Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle : The Operational Plan**. Stockholm : BAHC, 103 p. 1993. (Report n° 27).
- CHRISTOFOLETTI, A.L.H. **Estudo sobre a sazonalidade da precipitação na bacia do Piracicaba**. São Paulo : USP, 1991. 238 p. Dissertação (Mestrado em Filosofia, Letras e Ciências Humanas), Curso de Pós-Graduação em Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1993.
- CLARKE, R.T., BRUSA, L.C. O método *bootstrap* para detectar tendências em séries de vazão, In: 12., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., Vitória, ES, 1997. **Anais...**, v 2, Vitória : Sociedade Brasileira de Recursos Hídricos, 1997, p. 621-628.
- DUNNE, T., LEOPOLD L.B. **Water in the Environmental Planning**. San Francisco : Freeman and Company, 1978. 818 p.
- EASTMAN, J.R.- **IDRISI Version 4.1 - Update Manual**. Massachusetts, USA : Clark University, 1993. 209 p.
- GANZELLI, J.P. Aspectos ambientais do planejamento dos recursos hídricos: a bacia do rio Piracicaba. In: TAUK, S.M.; GOBBI, N.; FOWLER H.G. **Análise ambiental: uma visão multidisciplinar**. São Paulo : UNESP/FAPESP, 1991. p. 108-113.
- GOSENS, C., BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, Louvain-la-Neuve, v. 4, n. B,4, p. 385-400, 1986.
- JONES, P.D., RAPER, S.C.B., BRADLEY, R.S. et al.. Northern hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984. **Journal Climate Applied Meteror**, Boston, v. 25, p. 161-179, 1986a.
- JONES, P.D., RAPER, S.C.B., WIGLEY, T.M.L. Southern hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984. **Journal Climate Applied Meteror**, Boston, v. 25, 1213-1230, 1986b.
- LEAN, J., WARRILOW, D.A. Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation. **Nature**, London, v. 342, p. 411-413, 1989.
- MARENGO, J.A., TOMASELLA, J., UVO, C.R.B. On the Suitability of Non-Parametric Tests for Detection of Trends in Brazilian Rivers, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Campos de **Jordão, 1996 Anais...**, Campos de Jordão : Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1996. p. 1492-1495.
- MCLEOD, A. I., HIPEL, K. W. **Reference Manual**, The McLeod-Hipel Time Series Package, 1995. 117 p.
- MONTEIRO, C.A.F. **A dinâmica climática e as chuvas no estado de São Paulo estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo : Instituto de Geografia/USP, 1973. 130 p.
- MORAES, J.M., PELLEGRINO, G., BALLESTER, M.A. et al. Estudo Preliminar da Evolução Temporal dos Componentes do Ciclo Hidrológico da Bacia do Rio Piracicaba. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS E DO II SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 11., Recife, PE, 1995. **Anais...**, Recife : Sociedade Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. p. 27-32.
- MORAES, J.M., GENOVEZ, A.M., MORTATTI, J. M. V. et al. Análise de Intervenção das Séries Temporais de Vazão dos Principais Rios da Bacia do Rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 65-79, 1997.
- NOBRE, C.A., SELLERS, P.J., SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal Climate**, Fort Collins, v. 4, p. 957-988, 1991.
- PETTITT, A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Applied Statistics**, London, v. 28, n. 2, p. 126-135. 1979.
- PELLEGRINO, G.Q. **Análise Espaço-temporal de dados hidrológicos da bacia do rio Piracicaba**. Piracicaba : ESALQ/USP, 1995. 117 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1995.
- SÃO PAULO. **Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Data Oper - Sistema Cantareira**. São Paulo : Governo do Estado de São Paulo, 1989. 82 p.
- SÃO PAULO, **Alternativas de Gestão do Meio Ambiente da Bacia do Rio Piracicaba**. São Paulo : Fundação de Desenvolvimento Administrativo (Fundap), 1991. 180 p.
- SCHÄDLER, B. Long water balance time series in the upper basins of four important rivers in Europe - indicators for climatic changes? In: **The influence of climatic change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources**. Vancouver : IAHS, 1987. 640 p. (Publ. n°168. Proceedings of the Vancouver Symposium. August 1987).
- SETZER, J. **Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo : Comissão Interestadual das Bacias do Paraná-Uruguai - CESP, 1966. 60 p.

- SNEYERS, R. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Genève : OMM, 1975. 192 p. (Note Technique n. 143).
- SUCKLA, J., NOBRE, C., SELLERS, P. Amazon deforestation and climate change. **Science**, Washington, v. 247, p. 1322-1325, 1991.
- TUCCI, C.E.M., BELTRAME, L.F.S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C.E.M. (org.) **Hidrologia - Ciência e Aplicação**. Porto Alegre : UFRGS/Edusp/ABRH, 1993. cap. 7, p. 253-287.
- UNESCO **Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur**. Montevideo : Rostlac, 1982. 130 p.
- WEI, E.C., MCGUINNESS, J.L. **Reciprocal distance squared method - A computer technique for estimating areal precipitation**. Illinois : Agricultural Research Service - U.S. Department of Agriculture, 1973. (Repport ARS-NC-8. 30 p.).