

ANÁLISE DA CHUVA E VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO

Natale CHIERICE JÚNIOR¹, Paulo Milton Barbosa LANDIM²

- (1) Área de Ciências Exatas, Academia da Força Aérea. Estrada de Aguai, s/nº, Campo Fontenelle. CEP 13643-000. Pirassununga, SP. Endereço eletrônico: natalejunior@yahoo.com.br
- (2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, Avenida 24-A, 151, Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço Eletrônico: plandim@rc.unesp.br

Introdução
Área de Estudo
Materiais e Métodos
Método da dupla massa
Método de Sturges
Painel temporal - espacial
Método de Pettitt
Análise de agrupamentos
Resultados e Discussão
Anos com as mesmas características pluviométricas
Escolha dos "anos-padrão"
Escolha dos postos pluviométricos e fluviométricos
Identificação do período seco e chuvoso na bacia
Análise da vazão diária nos "anos-padrão" com curvas de tendências
Valores estimados de vazão por meio da chuva anual
Valores estimados de vazão no posto Fazenda Bela Vista
Valores ajustados de vazão no posto Fazenda Bela Vista
Vazões, estimadas ajustadas e medidas, no posto Fazenda Bela Vista
Conclusão
Referências Bibliográficas

RESUMO - O objetivo deste trabalho foi analisar e comparar chuva e vazão na bacia hidrográfica do Rio Pardo, no período de 1974 a 1999, visando avaliar o grau de relação entre chuva e vazão desse rio. Utilizou-se as vazões, diárias e anuais do Rio Pardo e as chuvas anuais da bacia. Nos anos, seco, chuvoso e habitual, selecionados por meio do Método de Sturges e do Método Aglomerativo Hierárquico, com a Técnica de Ward, a vazão do Rio Pardo respondeu, com um mesmo sinal, às chuvas anuais que ocorreram nesses anos, conforme se observou nas curvas de permanência. Os períodos, chuvoso – 1974 a 1983, e seco – 1984 a 1999, interferiram no volume escoado do Rio Pardo, com mudança na vazão média diária o que, foi notado, à jusante do rio, um ano depois do início do período seco e, à montante, no mesmo ano. O Método de Pettitt revelou os locais do rio e as datas, em que essa mudança ocorreu. As análises revelaram que as vazões diárias diminuíram 18%, à montante do Rio Pardo, depois de 1984, à jusante, depois de 1985 e que, na relação chuva e vazão, 13,3% do volume médio precipitado na bacia escoou pelo exutório.

Palavras-chave: chuva, vazão, bacia hidrográfica do rio Pardo, exutório.

ABSTRACT - The aim of this study was to analyze and compare rainfall and flow rate in the watershed of the Pardo River, in the period 1974-1999, to assess the degree of relationship between rainfall and runoff of this river. We used flow rates, daily and annual of the Pardo River and annual rainfall in the basin of this river. Over the years, dry, pluvius, and habitual, selected through the Method of Sturges and Agglomerative Hierarchical Method, with the Ward technique, the flow of the Pardo River replied, with the same sign, the annual rainfall that occurred in those years, as observed in the flow duration curves. Periods, pluvius 1974-1983, and dry 1984-1999, interfered in the volume drained from the Pardo River, with change in average daily flow which was noticed, downstream of the river, a year after the beginning of the dry period and the amount in the same year. The method of Pettitt revealed the locations and dates of the river, on which this change occurred. Analyses revealed that the daily flow decreased by 18%, upstream of the Pardo River, after 1984, downstream, after 1985 and that in respect rainfall and runoff, 13,3% of the average volume precipitated in the basin drained by mouth of the basin.

Keywords: rainfall, flow rate, River watershed Pardo, mouth of the basin.

INTRODUÇÃO

Na sua constante movimentação, a água muda de estado, de posição com relação à Terra, em um ciclo que se convencionou chamar de ciclo hidrológico, cujas linhas principais são a precipitação, o escoamento superficial ou subterrâneo e a evaporação. O componente fundamental de análise do ciclo hidrológico é a bacia hidrográfica que é definida por uma área de captação natural de

água da precipitação, a qual faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2000), (Naghettini, [20--?]).

Com a comparação do fenômeno da vazão ao da precipitação que é o componente alimentador da fase terrestre do ciclo hidrológico e, portanto, um fator importante para os processos de escoamentos superficiais e

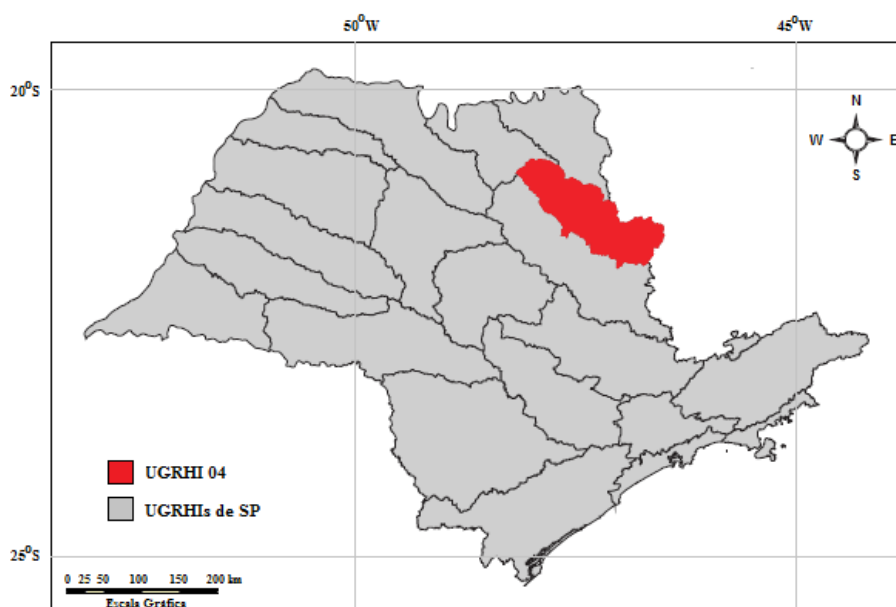
subterrâneos, infiltração, evaporação, transpiração, recarga de aquíferos e vazão, o que se busca são resultados para solucionar questões que envolvem o gerenciamento de recursos hídricos, tais como a avaliação da disponibilidade de água em uma bacia hidrográfica e sua variação de ano para ano

(Tucci, 2009), (Pinto et al., 1976). O que se pretende nesse trabalho é analisar e comparar chuva (entrada) e vazão (saída) para compreender a relação entre esses fenômenos e, assim, buscar informações qualitativas e quantitativas para uma melhor gestão dos recursos hídricos da região.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo selecionada refere-se à região da bacia hidrográfica do Rio Pardo localizada no Estado de São Paulo, entre as coordenadas 22° 00' e 20° 45' de Latitude Sul e 48° 15' e 46°45' de Longitude Oeste de Greenwich e possui área de drenagem igual a 8991,02 km² (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2000). Ela está situada na região sudeste brasileira, abrangendo parte da porção nordeste do Estado de São Paulo. Essa bacia se estende por quatro grandes províncias geomorfológicas, encontrando-se, de montante a jusante, Planalto Atlântico, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental.

O Estado de São Paulo está dividido, de acordo com Lei Estadual nº 9.034, de 27 de dezembro de 1994, em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHIs (Figura 1), sendo cada uma delas estruturada de acordo com o conceito de bacia hidrográfica, em que os recursos hídricos convergem para um corpo de água principal, de forma que na análise dos resultados consideram-se os acontecimentos do trecho do rio inserido na respectiva UGRHI. No caso do Rio Pardo, a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos é a UGRHI 04, que corresponde à parte paulista da Bacia Hidrográfica desse rio (Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2000).



Fonte: Adaptado de Geociências (Groppo et al., 2005)

Figura 1. Divisão do Estado de São Paulo em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos

MATERIAIS E MÉTODOS

A precipitação é a principal variável de informação de entrada de água em uma bacia e o escoamento, variável de saída, se origina das precipitações, influenciado pela forma e

topografia da bacia hidrográfica e pela porosidade e capacidade de infiltração do solo. O volume de água escoado, na unidade de tempo, é a vazão que, quando medida no exutório, permite medir

a saída da água da bacia hidrográfica (Tucci, 2009). A chuva e a vazão serão os objetos de estudo deste trabalho, das quais serão consideradas apenas as características da distribuição temporal e espacial para a chuva anual e as vazões diárias e anuais do rio principal da bacia, o Rio Pardo.

Os dados pluviométricos e uma parte dos dados fluviométricos utilizados neste estudo foram obtidos no Banco de Dados Hidrológicos do Estado de São Paulo (São Paulo (Estado), [20--?]). A outra parte foi obtida no Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. Esses dados fazem parte das séries históricas de vazões naturais que o setor elétrico tem adotado para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio, se não houvesse as ações antrópicas na sua bacia contribuinte, tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial). A vazão natural é obtida por meio de um processo de reconstituição, que considera a vazão observada no local e as informações relativas às ações antrópicas na bacia. Os dados obtidos no Operador Nacional do Sistema Elétrico referem-se às Usinas Hidrelétricas de Caconde, Euclides da Cunha e Armando de Salles Oliveira, todas localizadas no Rio Pardo (Operador Nacional do Sistema Elétrico, c2013).

Método da dupla massa

O Método da Dupla Massa, desenvolvido pelo U.S. Geological Survey – USGS, segundo Tucci (2009), é comumente usado no Brasil para verificar o grau de homogeneidade em séries mensais ou anuais. O método consiste em construir um gráfico cartesiano, relacionando os totais anuais (ou mensais) acumulados do posto a consistir (nas ordenadas) e a média acumulada dos totais anuais (ou mensais) de todos os postos da região (nas abscissas), hipoteticamente considerada homogênea do ponto de vista hidrológico (Oliveira et al., 2010). Se os valores do posto a consistir são proporcionais aos observados na base de comparação, os pontos devem estar alinhados em uma única reta. A declividade da reta determina o fator de proporcionalidade entre ambas as séries.

Método de Sturges

A distribuição de frequências é um método com que se agrupa um conjunto de dados em intervalos de classes, para melhor visualizar esse conjunto, sem precisar levar em conta os valores individuais desses dados (Spiegel, 1977). Das regras existentes para o cálculo da quantidade de intervalos de classes, em uma distribuição de frequências, optou-se pelo Método de Sturges que estima essa quantidade pela fórmula:

$$k = 1 + 3,3 \log N$$

na qual, log é o logaritmo na base 10 e N é o número total de frequências. A amplitude desses intervalos de classes foi obtida dividindo-se a amplitude total dos dados de uma série única por k (Sturges, 1926).

Painel temporal - espacial

Essa técnica é utilizada para representar gráficos no plano cartesiano, ou seja, em eixos ortogonais, em que um deles representa o espaço (geográfico) e o outro o tempo (cronológico) (Zavattini & Boin, 2013). Às coordenadas do tempo e espaço são atribuídos os valores correspondentes das variáveis, e que, nesse trabalho, serão os dados das chuvas anuais ou das vazões diárias, dependendo do painel que se quer criar. Esses painéis foram gerados com o objetivo de analisar, no período de 1974 a 1999, o comportamento das chuvas anuais na bacia do Rio Pardo e das vazões diárias em seu exutório. Para isso considerou-se os anos do período estudado (eixo dos y) e os postos pluviométricos selecionados (eixo dos x) para gerar o painel das chuvas anuais e os anos do período estudado (eixo dos y) e os postos fluviométricos selecionados (eixo dos x) para gerar o painel das vazões diárias. Os mapas foram gerados por interpolação das variáveis (chuva e vazão) pelo método do inverso do quadrado da distância, utilizando-se o software Surfer 8 (Surfer, 2002) com intervalos de classes de amplitude sugerida pelo Método de Sturges. A esses intervalos foram associadas tonalidades da cor azul para representarem a chuva anual referente aos postos pluviométricos escolhidos (Landim et al., 2002). Com as tonalidades da cor azul refletindo a

pluviosidade da bacia, fez-se uma classificação de dois períodos: um seco e outro chuvoso.

Método de Pettitt

O teste não paramétrico de Pettitt utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney (Bussab & Morettin, 2002), no qual se verifica se duas amostras Y_1, \dots, Y_t e Y_{t+1}, \dots, Y_T são da mesma população (Groppo et al., 2005).

A grande vantagem do Método de Pettitt (Pettitt, 1979) é não requerer que os dados

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^T D_{ij}$$

2

com D_{ij} igual a:

$$D_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{para } (x_i - x_j) < 0 \\ 0 & \text{para } (x_i - x_j) = 0 \\ 1 & \text{para } (x_i - x_j) > 0 \end{cases}$$

3

A estatística $U_{t,T}$ é então calculada para os valores de $1 \leq t \leq T$ e a estatística $k(t)$ do teste de Pettitt é o máximo valor absoluto de $U_{t,T}$ para o caso de duas caudas. Esta estatística localiza o ponto onde houve uma mudança brusca (*changing point*) em uma série temporal e o ponto onde houve essa mudança é o valor onde ocorre o máximo valor de $k(t)$. Esse máximo valor tem um nível de significância α que é calculado utilizando-se o método de Monte Carlo (Xlstat, 2011) (Bussab & Morettin, 2002).

Análise de agrupamentos

Classificar conjuntos de dados em grupos discretos, com características semelhantes, é

obedeçam qualquer distribuição de probabilidade para sua aplicação e ter a propriedade de apontar, em uma série temporal, o valor de ruptura de uma tendência como, também, o local (tempo) da série onde ela ocorreu.

A estatística $U_{t,T}$, faz uma contagem do número de vezes que um membro da primeira amostra é maior que um membro da segunda, e pode ser escrita pela fórmula (Xlstat, 2011):

uma necessidade que facilita a análise e a interpretação de resultados. Nesse sentido, a literatura estatística apresenta alguns métodos de classificação dos quais o método multivariado da análise de agrupamentos, usando o método aglomerativo hierárquico. Das diversas medidas de similaridade e dos diversos métodos de agrupamento, existentes, optou-se por usar a medida de distância euclidiana e o método aglomerativo hierárquico, com o coeficiente de Ward (Ward, 1963). Buscou-se, com esse método, classificar os anos com mesmas características pluviométricas por meio de software estatístico (Xlstat, 2011) (Hair et al., 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

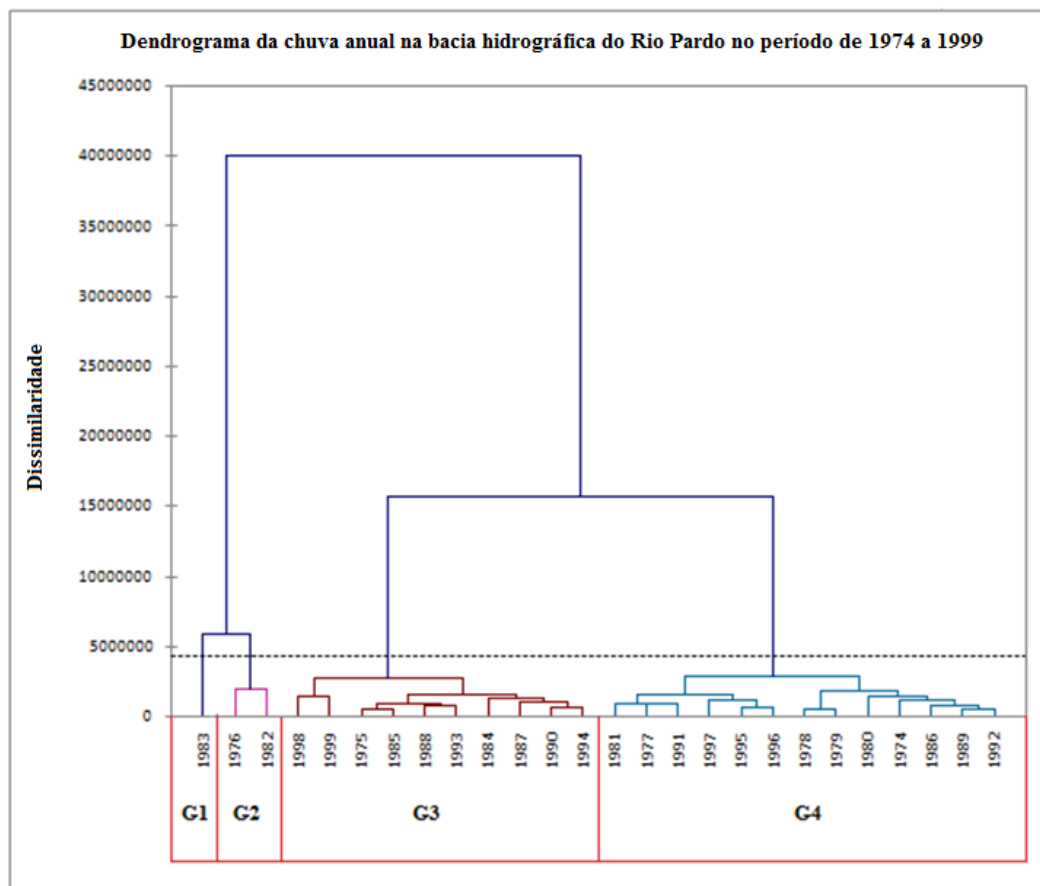
Anos com as mesmas características pluviométricas

O agrupamento dos anos com características pluviométricas semelhantes foi realizado por meio do software estatístico Xlstat (Xlstat, 2011), aplicado à matriz formada por elementos que representam as chuvas anuais que ocorreram em todos os postos pluviométricos e em todo período de estudo.

Esses 1014 elementos, distribuídos em 39 linhas (postos pluviométricos) e 26 colunas, estão assim configurados: cada linha é constituída de 26 colunas em que cada coluna representa a chuva anual que, ocorreu em cada ano do período, naquele posto. Esses anos foram agrupados de acordo com suas características pluviométricas e representados em um dendrograma, resultado da aplicação da

Análise de Agrupamentos, pelo Método Aglomerativo Hierárquico, com a Técnica de Ward, cujo objetivo é formar grupos heterogêneos entre si, contendo cada grupo anos de chuvas anuais com máxima homogeneidade, com relação à variância (Hair et al., 2005). Os quatro grupos de anos encontrados, agrupados de acordo com as

características das chuvas anuais, estão indicados no dendrograma (Figura 2). Para classificar os anos dos grupos homogêneos (G1, G2, G3 e G4) obtidos como “anos-padrão”: seco, chuvoso e habitual, recorreu-se à distribuição de frequências com intervalos estimados pelo Método de Sturges.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de software estatístico (XLstat, 2011)

Figura 2. Dendrograma dos anos de chuvas anuais que ocorreram na bacia do Rio Pardo, no período de 1974 a 1999.

Escolha dos “anos-padrão”

As chuvas que ocorreram na bacia, no período de 1974 a 1999, variaram entre os extremos de um intervalo com valor mínimo igual a 876,1 mm e valor máximo igual a 2836,8 mm. Para estimar o número de intervalos de classes que tornasse possível melhorar as observações sobre as chuvas anuais, optou-se pelo Método de Sturges (Sturges, 1926) que, para essa finalidade, estima o número de intervalos com pouca perda de detalhes (Zavattini & Boin, 2013). Pelo método obteve-se 11 intervalos de classe

($k = 11$) com amplitude igual a 178 mm.

Para classificar a ocorrência da chuva, nesses 26 anos de estudo, optou-se por atribuir cores aos intervalos de classes. Atribuiu-se, a cor verde, em três tonalidades, aos intervalos de classes com alta ocorrência de chuvas e, para a baixa ocorrência, a cor vermelha, a cor amarela e a cor azul em seis tonalidades (Quadro 1) A tonalidade escura foi utilizada para representar um volume maior de água precipitada que a tonalidade clara.

Quanto aos “anos-padrão”, classificou-se o “ano habitual” com a cor verde, o “ano chuvoso”, com a cor azul e o “ano seco” com as cores vermelha e amarela (Zandonadi, 2009).

Quadro 1. Intervalos de classes, com amplitudes estimadas pela Regra de Sturges, associados à escala cromática e frequências relativas. Classificação dos “anos-padrão”.

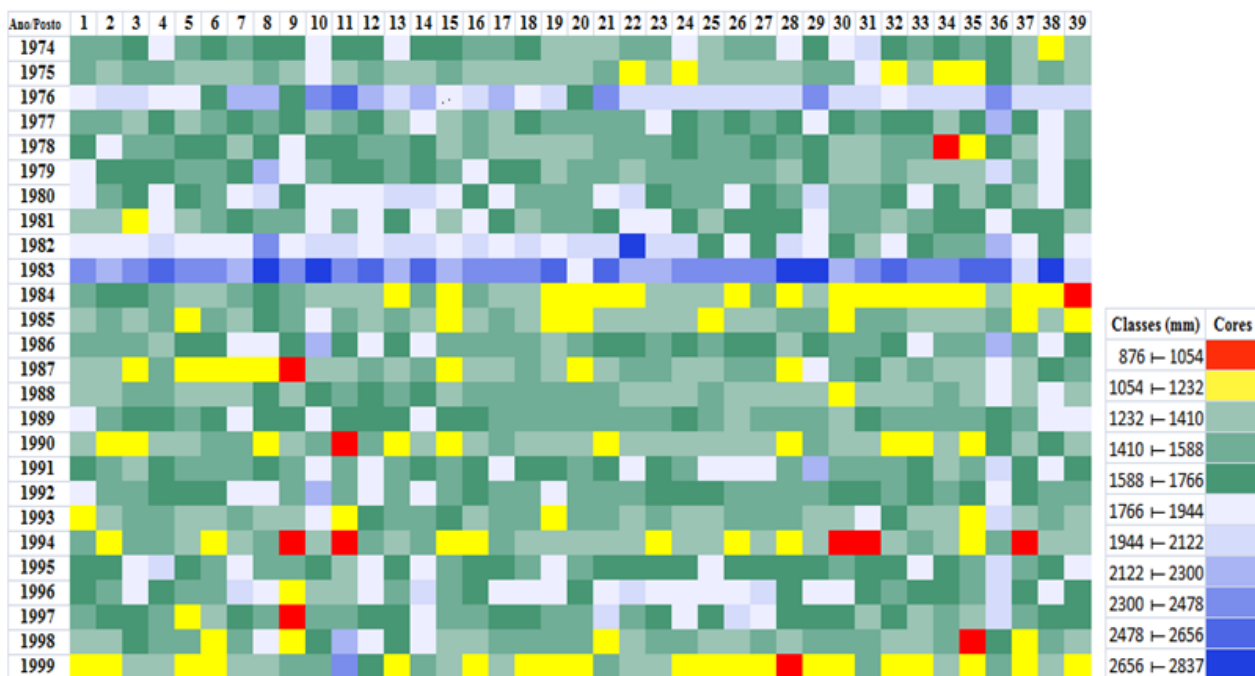
Intervalos de classes (mm)	Cores	Frequência relativa	"Anos-padrão" (%)	"Anos-padrão"
876 – 1054	Red	1,20%	10%	"ano seco"
1054 – 1232	Yellow	8,80%		
1232 – 1410	Light Green	20,90%	66,8%	"ano habitual"
1410 – 1588	Medium Green	26,90%		
1588 – 1766	Dark Green	19,00%		
1766 – 1944	Light Blue	12,30%		
1944 – 2122	Light Blue	5,20%	23,2%	"ano chuvoso"
2122 – 2300	Blue	2,00%		
2300 – 2478	Dark Blue	2,20%		
2478 – 2656	Blue	0,90%		
2656 – 2837	Dark Blue	0,60%		

Fonte: Elaborado pelo autor

Com as chuvas anuais que ocorreram em todos os postos pluviométricos durante o período estudado criou-se, por meio do software Excel, uma planilha cromática onde as cores,

representantes dos intervalos de classe, propiciaram uma melhor visualização da variabilidade da chuva tanto no tempo como no espaço (Quadro 2).

Quadro 2. Planilha cromática com a ocorrência de chuva anual no período 1974-1999 com amplitude, de intervalos de classe, estimada pela Regra de Sturges.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Na planilha cromática (Quadro 2), observou-se que no ano de 1983 houve predominância da cor azul, em todos os postos; no ano de 1976 a predominância da cor azul claro e no ano de 1982 a presença das cores azul claro e verde escuro. De acordo com a escala proposta de classificação de “anos-padrão” optou-se por classificá-los como “ano

chuvoso”. No ano de 1999 observou-se a predominância da cor amarela na maioria dos postos, no ano de 1984 a presença da cor amarela em uma quantidade menor de postos e no ano de 1994 a presença da cor amarela e vermelha em uma quantidade menor ainda de postos. A presença dessas cores permitiu classificar esses anos como “ano seco”.

Nos anos de 1974, 1977, 1978, 1979, 1986, 1988, 1989, 1992, 1993, 1995 e 1997, observou-se a predominância da cor verde, na maioria dos postos. A presença dessas cores permitiu classificá-los como “ano habitual”.

Quanto aos anos restantes, a planilha não ofereceu informação visual para a classificação desses anos, pelo fato de os postos apresentarem cores diferentes e esparsas. Diante disso, optou-se pelo dendrograma como um recurso para auxiliar nessa escolha. A predominância dos anos classificados como “ano seco”, no grupo G2 e como “ano habitual” no grupo G3, permitiu classificá-los, respectivamente, por grupo de “ano seco” e de “ano habitual”. Prevalendo a classificação visual dos anos, por meio da planilha cromática os anos restantes, **1975, 1980, 1981, 1985, 1987, 1990, 1991, 1996 e 1998** foram classificados observando o grupo a que pertencem. Dessa forma, os anos 1975, 1985, 1987, 1990, 1998, que pertencem ao grupo G3, foram classificados como “ano seco” e os anos 1980, 1981, 1991, 1996, que pertencem ao grupo G4 como “ano habitual”.

Dessa forma os anos do período foram classificados da seguinte forma:

“ano chuvoso”: 1976, 1982, 1983;

“ano seco”: **1975**, 1984, **1985, 1987, 1990**, 1994, **1998** e 1999 e

“ano habitual”: 1974, 1977, 1978, 1979, **1980, 1981**, 1986, 1988, 1989, **1991**, 1992, 1993, 1995, **1996** e 1997.

Na planilha cromática (Quadro 2), observou-se a presença de um número maior de células amarelas, no período de 1984 até 1999 do que no período de 1974 a 1983. Isso permitiu classificar esses períodos, respectivamente, de período seco e período chuvoso. Os reflexos desses períodos foram notados na vazão do Rio Pardo, com mudanças que ocorreram nos anos de 1985, a jusante do rio, e em 1984, a montante.

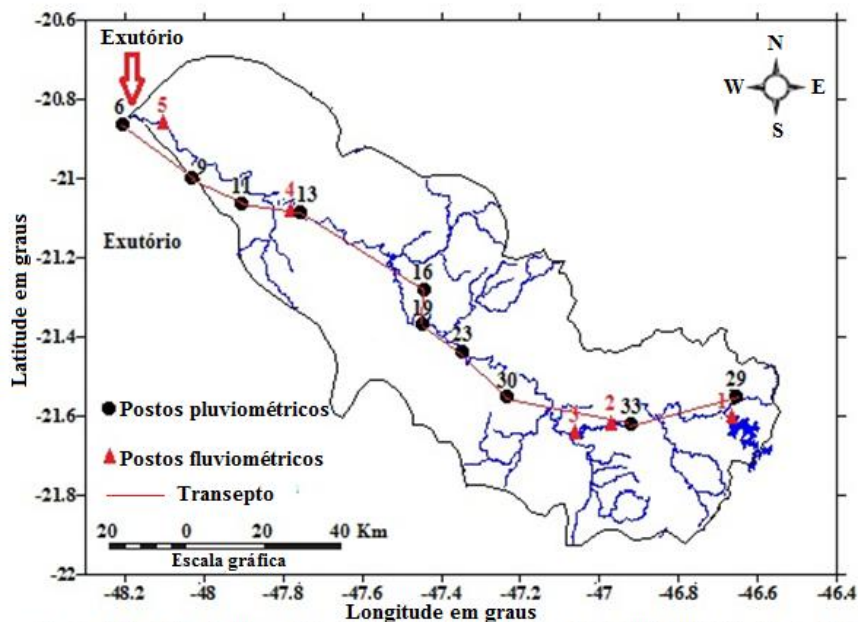
Dessa classificação utilizou-se para análise o ano de 1983 como representante dos anos classificados como “ano chuvoso”, 1995 como “ano habitual” e 1999 como “ano seco”.

Escolha dos postos pluviométricos e fluviométricos

Dentre os postos pluviométricos internos e vizinhos à bacia do Rio Pardo escolheram-se aqueles que apresentavam séries com o menor número possível de falhas e com período coincidente ao do posto fluviométrico Fazenda Bela Vista. Esse posto foi escolhido por estar próximo ao exutório da bacia e o objetivo dessa coincidência de períodos foi comparar o volume de água precipitado (entrada) na bacia, com o volume de água escoado (saída) pelo exutório. Satisfazendo a essas condições selecionaram-se 39 postos pluviométricos no período de 1974 a 1999 na região interna e vizinha da bacia e que apresentassem um número reduzido de falhas em suas séries pluviométricas. Eles foram ordenados de norte para sul e de leste para oeste de acordo com o que fez Zandonadi (2009) em sua dissertação de mestrado.

As falhas mensais nas séries pluviométricas foram preenchidas pela média aritmética das chuvas mensais restantes do mês que apresentava essas falhas no período analisado. Os postos fluviométricos escolhidos estão distribuídos ao longo do curso do Rio Pardo e foram ordenados no sentido da montante para a jusante: 1 - Caconde, 2 - Euclides da Cunha, 3 - Armando de Salles Oliveira, 4 - Clube de Regatas e 5 - Fazenda Bela Vista. Nas séries referentes a esses postos fluviométricos não ocorreram falhas de dados no período analisado

Dos 39 postos pluviométricos em condições de serem analisados, selecionaram-se 10 para compor o transepto (Zavattini & Boin, 2013) que atravessa a bacia no sentido da vazão do Rio Pardo (Figura 3). Esses postos ordenados no sentido sudeste-noroeste, próximos ao leito do Rio Pardo, estão assim representados, segundo os nomes definidos pelo DAEE (São Paulo, (Estado), [20--?]): 29 – Caconde, 33 – São José do Rio Pardo, 30 – Fazenda Morrinhos, 23 – Usina Amália, 19 – Fazenda São Lourenço, 16 – Santa Cruz da Esperança, 13 – Clube de Regatas, 11 – Cruz das Posses, 9 – Pontal, 6 – Fazenda Três Barras.



Fonte: Adaptado de Plano Estadual de Recurso Hídrico 2004-2007 SP (São Paulo, [2008?])

Figura 3. Distribuição dos postos fluviométricos e pluviométricos na bacia hidrográfica do Rio Pardo e transepto utilizado para elaboração do painel temporal-espacial das chuvas anuais.

Identificação do período seco e chuvoso na bacia

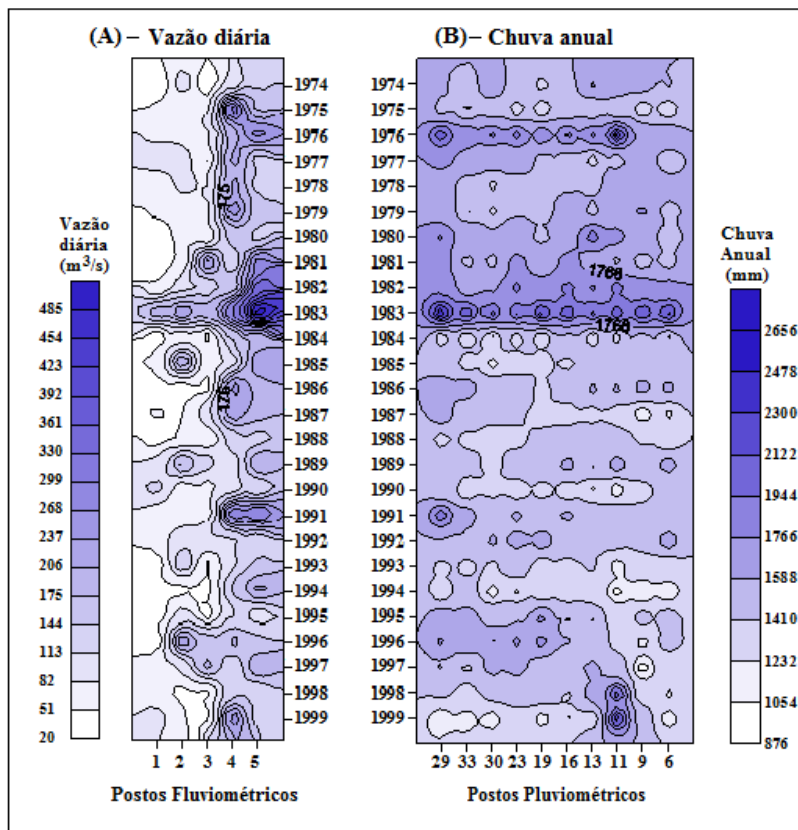
As séries das chuvas anuais e das vazões diárias foram utilizadas para gerar dois painéis temporais-espaciais (Zavattini & Boin, 2013), por meio da interpolação pelo método do inverso do quadrado da distância com uso do Surfer 8 (Surfer, 2002). Com as vazões diárias, que ocorreram nos 5 postos fluviométricos distribuídos ao longo do Rio Pardo, gerou-se um painel (Figura 4-A), considerando-se como variável de interpolação a vazão diária, como ordenadas dessas variáveis os 26 anos em que ocorreram essas vazões e como abscissas os 5 postos fluviométricos. De forma semelhante utilizaram-se as chuvas anuais que ocorreram nos 10 postos pluviométricos, 29, 33, 30, 23, 19, 16, 13, 11, 9 e 6 próximos ao leito do Rio Pardo, para gerar o outro painel (Figura 4-B). Considerou-se, para isso, a chuva anual como variável de interpolação, os 10 postos pluviométricos escolhidos como abscissas e os 26 anos, em que ocorreram essas chuvas, como ordenadas. Na escolha desses postos pluviométricos, considerou-se a direção sudeste-noroeste, a proximidade ao leito do Rio Pardo e o mesmo sentido da vazão desse rio.

Nos painéis, os postos fluviométricos e pluviométricos escolhidos, obedecem ao sentido sudeste-noroeste, que está de acordo com a disposição deles no eixo das abscissas:

da esquerda para a direita. No painel das chuvas anuais (Figura 4-B), de 1974 a 1983 observa-se a presença da tonalidade azul escuro e de 1984 a 1999, a tonalidade azul claro, na maioria dos postos pluviométricos. As tonalidades escuras indicam uma maior pluviosidade no primeiro período quando comparadas às tonalidades do segundo período. De acordo com essa observação optou-se por chamar o primeiro período de chuvoso e o segundo de seco. No painel das vazões diárias (Figura 4-A), esses dois períodos, também, são notados, mostrando a interferência deles na vazão do rio principal. As cores azuis claros no período de 1984 a 1999 evidenciam um decréscimo nas vazões. Essa observação visual, nesses painéis, da mudança de um período chuvoso para um período seco, também, é constatada na aplicação do Método de Pettitt às vazões diárias (Figura 5) que ocorreram no posto Fazenda Belas Vista, próximo ao exutório da bacia. Esse método estatístico, com nível de significância de 5% obtido por meio das 10000 simulações pelo Método de Monte Carlo (Bussab & Morettin, 2002), revelou que, a série referente ao posto Fazenda Bela Vista não pôde ser considerada homogênea. A razão disso está na alteração da média que, passou de 234,2 m³/s para 191,3m³/s em meados do ano 1985, diminuindo, aproximadamente, 18%. Essa mudança no comportamento da vazão diária

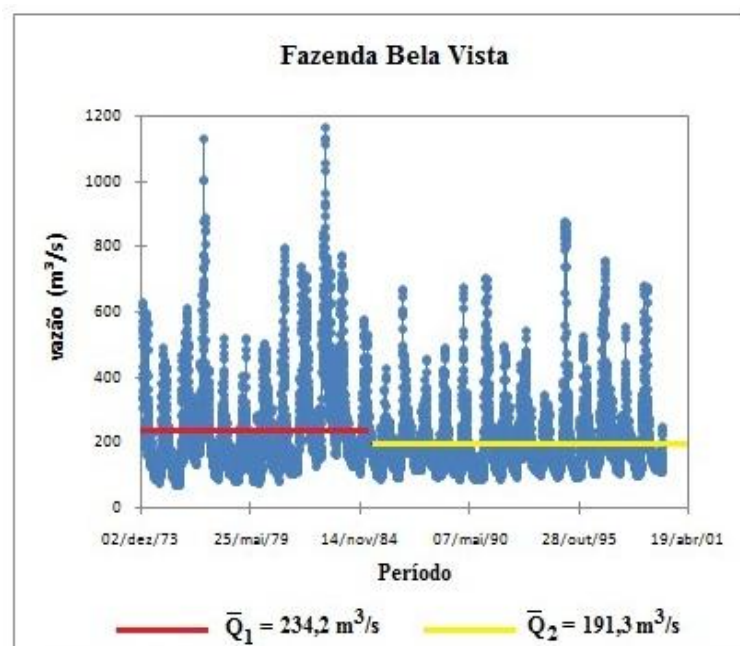
coincide de certa forma, com a mudança do período chuvoso para seco, conforme se

observa na Figura 4-B: o período seco inicia a partir do ano de 1984.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do Surfer 8 (Surfer, 2002)

Figura 4. Painéis temporais espaciais das vazões diárias que ocorreram nos postos fluviométricos 1, 2, 3, 4 e 5 e das chuvas anuais que ocorreram nos postos pluviométricos 29, 33, 30, 23, 19, 16, 13, 11, 9 e 6, no período de 1974 a 1999.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de software estatístico (Xlstat, 2011)

Figura 5. Gráfico das vazões diárias no posto Fazenda Bela Vista com ruptura da média em meados de junho de 1985 com nível de significância igual a 5%.

Análise da vazão diária nos “anos-padrão” com curvas de tendências

A relação, expressa pela curva de permanência, entre as vazões diárias e as frequências com que essas vazões foram superadas ou igualadas, foi ajustada por curvas de tendências. Essas curvas estabeleceram uma relação analítica, por meio de equações de potências, entre as vazões diárias (Q) e as frequências relativas (x). Essas equações (Tabela 1) e os coeficientes de determinação (R²) (Tabela 2) foram calculados por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010) (Bussab; Morettin, 2002), usando-se as vazões diárias que ocorreram nos postos de Caconde, Clube de

Regatas e Fazenda Bela Vista nos anos 1983 - “ano chuvoso”, 1995 - “ano habitual” e 1999 - “ano seco”. Nesses três postos fluviométricos, os coeficientes de determinação, referentes aos “anos-padrão” oscilaram entre 0,839 e 0,985. Esses valores, próximos de 1, indicaram forte correlação entre a vazão diária (Q) e a frequência relativa (x), garantindo a representação satisfatória das curvas de permanência pelas curvas de tendências. Essa condição permitiu representar graficamente, por meio dessas equações, as curvas de permanência referentes a cada posto (Figura 6), nos três anos e a cada ano, nos três postos (Figura 7).

Tabela 1. Equações de potência ajustadas às curvas de permanência geradas para os postos Caconde, Clube de Regatas e Fazenda Bela Vista nos “anos-padrão”.

Postos / "Anos-padrão"	1983	1995	1999
Caconde	$Q = 63,06 x^{-0,46}$	$Q = 17,92 x^{-0,78}$	$Q = 21,33 x^{-0,48}$
Clube de Regatas	$Q = 223,6 x^{-0,35}$	$Q = 73,76 x^{-0,71}$	$Q = 84,53 x^{-0,47}$
Fazenda Bela Vista	$Q = 260,0 x^{-0,35}$	$Q = 87,26 x^{-0,67}$	$Q = 124,7 x^{-0,42}$

Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

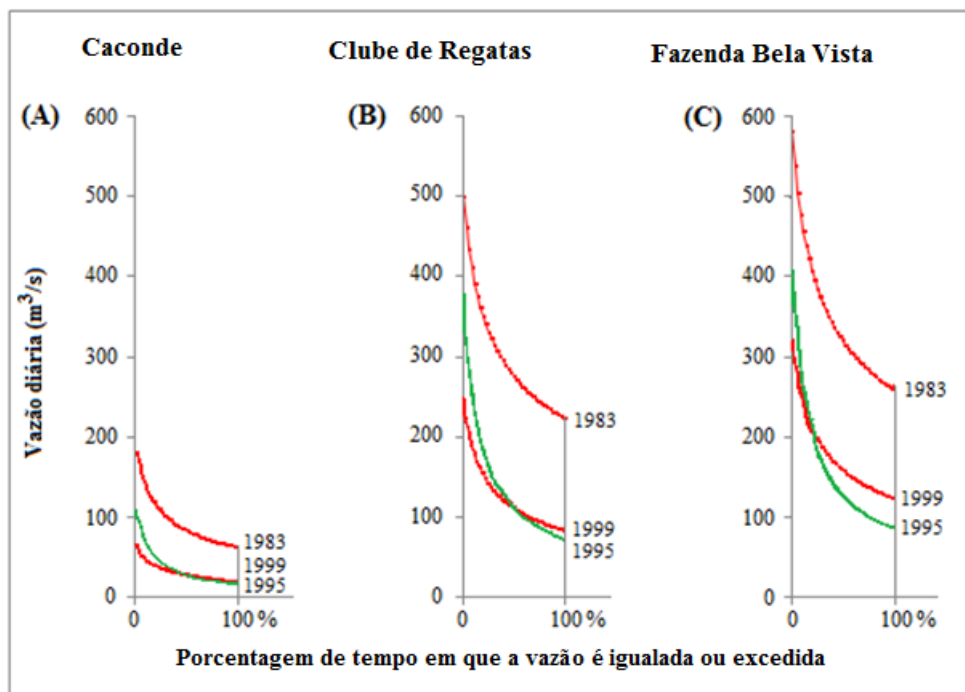
Tabela 2. Coeficientes de determinação referentes às curvas ajustadas às curvas de permanência geradas para os postos Caconde, Clube de Regatas e Fazenda Bela Vista nos “anos-padrão”.

Postos / Anos padrão	1983	1995	1999
Caconde	0,91	0,947	0,859
Clube de Regatas	0,839	0,985	0,947
Fazenda Bela Vista	0,857	0,984	0,961

Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Em cada posto, nos três anos analisados, observou-se que as vazões tinham comportamento semelhante, diferindo apenas no volume escoado, devido à localização de cada posto. A menor vazão atingida, no ano de 1999, apesar de ter sido um “ano seco”, superou a do ano de 1995, considerado “ano habitual” nesse estudo, nos 3 postos fluviométricos (Figura 6).

As inclinações acentuadas das curvas demonstraram que não houve efeitos de regularização da vazão, cujo efeito sobre a curva de permanência é torná-la mais horizontal, com valores mais próximos da mediana durante o maior tempo (Collischonn, 2011).

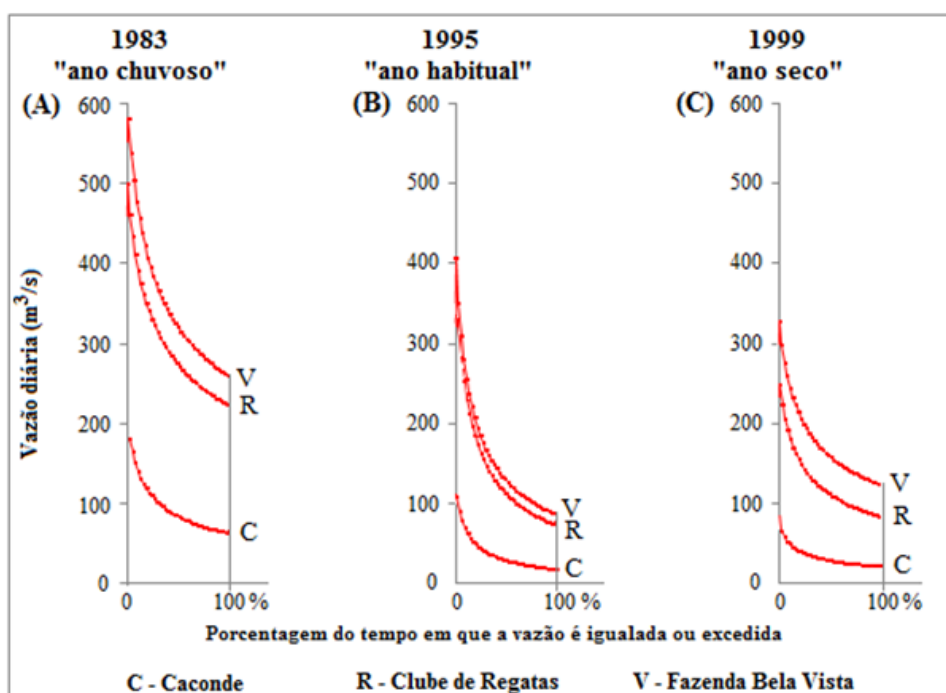


Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Figura 6. Curvas de tendência de potência, nos postos, Caconde Clube de Regatas e Fazenda Bela Vista, referentes os anos de 1983 – “ano chuvoso”, 1995 – “ano habitual e 1999 – “ano seco”.

As vazões apresentaram comportamento semelhante nos anos de 1983, 1995 e 1999, mostrados pelas mesmas inclinações das curvas, nesses três anos. Os volumes máximos,

escoados em cada posto, decresceram obedecendo à ordem dos anos 1983 - “ano chuvoso”, 1995 - “ano habitual” e 1999 - “ano seco” (Figura 7).



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Figura 7. Curvas de tendência de potência nos anos “ano chuvoso”, “ano habitual e “ano seco”, referentes aos postos Caconde, Clube de Regatas e Fazenda Bela Vista”.

Valores estimados de vazão por meio da chuva anual

A altura pluviométrica é a espessura média da lâmina de água precipitada, que recobriria a região atingida pela precipitação, admitindo-se que essa água não evaporasse, não infiltrasse, nem se escoasse para fora dos limites da região. A unidade de medida habitual é o milímetro de chuva, que corresponde ao

volume de um litro de água por metro quadrado de superfície (Tucci, 2009).

No período de um ano, se houvesse uma chuva de P mm, sobre uma bacia hidrográfica com A km² de área, a lâmina de água de altura P mm, distribuída uniformemente sobre essa bacia hidrográfica, equivaleria ao volume precipitado em um ano igual a (Barros & Zambon, [20--?]):

$$Volume = A \cdot P \cdot km^2 \cdot mm \quad 4$$

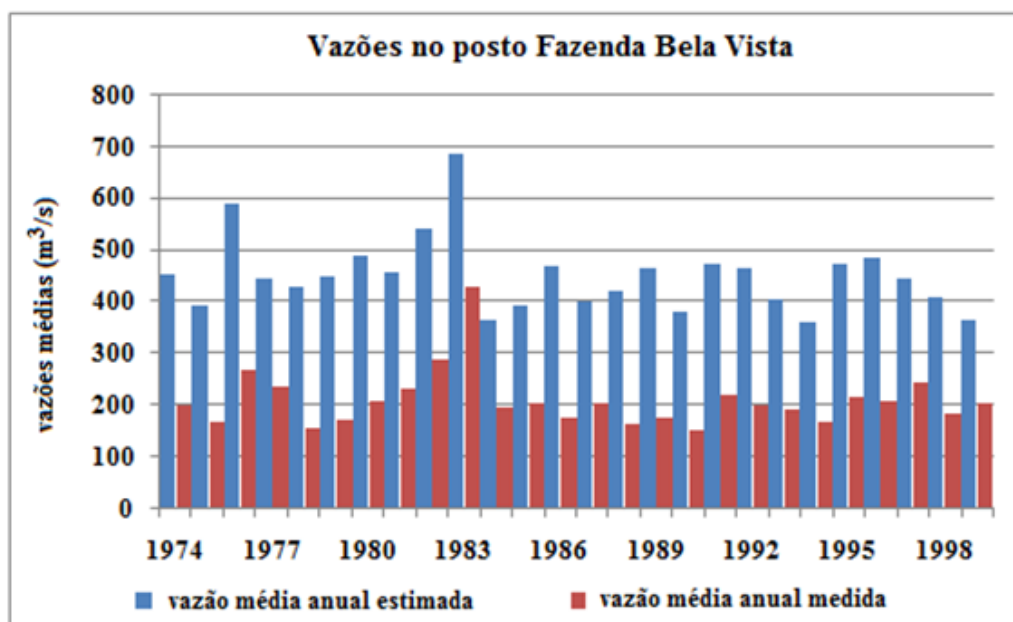
A vazão equivalente a esse volume em um ano de 365 dias seria igual a:

$$Vazão = \frac{Volume}{1 \text{ ano}} = \frac{A \cdot P \cdot 10^3 \cdot m^3}{365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot s} = \frac{A \cdot P \cdot m^3}{31536 \cdot s} \quad 5$$

Valores estimados de vazão no posto Fazenda Bela Vista

Para cada ano do período de chuva média anual da bacia, estimou-se, por meio da fórmula (5) a vazão média anual que deveria ocorrer no posto fluviométrico Fazenda Bela Vista,

considerando-se a área de drenagem igual a 8991,02 km². Os valores estimados e medidos (Tabela 3) nesse posto foram comparados e apresentaram diferenças visíveis entre eles (Figura 8).



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Figura 8. Vazão média anual estimada e vazão média anual medida.

Tabela 3. Dados de chuva na bacia e vazão no exutório do Rio Pardo, desde 1974 a 1999.

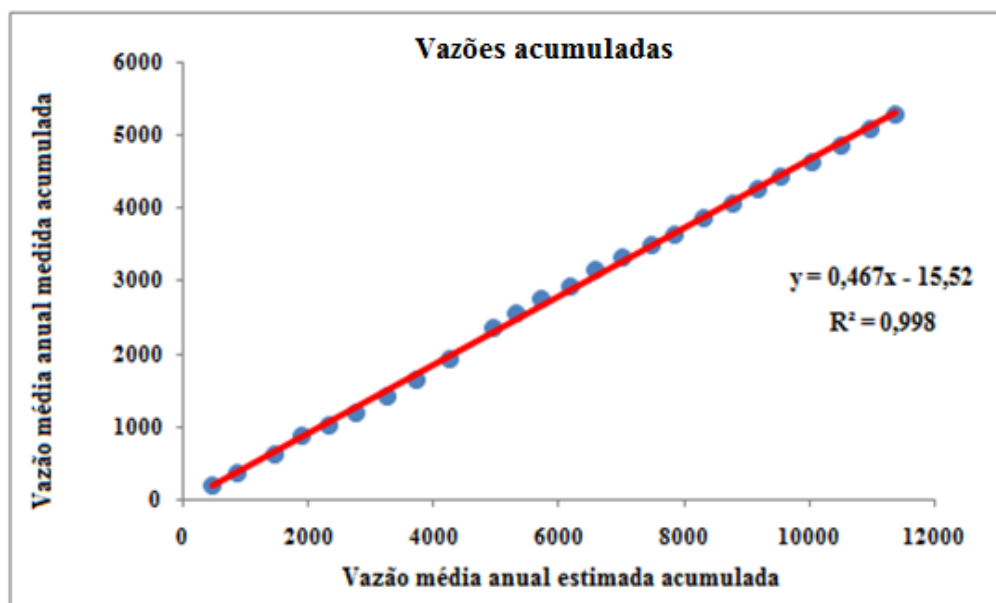
período (ano)	chuva média anual (mm)	Vazão média anual (m ³ /s)				
		estimada	medida	estimada ajustada	estimada acumulada	medida acumulada
1974	1590,6	453,5	202,8	211,8	453,5	202,8
1975	1385,3	395	168,7	184,5	848,5	371,5
1976	2070,5	590,3	267,8	275,7	1438,8	639,3
1977	1568	447	239,1	208,7	1885,8	878,4
1978	1506,2	429,4	156,9	200,5	2315,2	1035,3
1979	1572,3	448,3	171,6	209,4	2763,5	1206,9
1980	1717,4	489,6	209,6	228,6	3253,1	1416,5
1981	1600,7	456,4	231,9	213,1	3709,5	1648,4
1982	1905,2	543,2	287,5	253,7	4252,7	1935,9
1983	2406,3	686	428,5	320,4	4938,7	2364,4
1984	1282,6	365,7	195	170,8	5304,4	2559,4
1985	1374,9	392	203,1	183,1	5696,4	2762,5
1986	1643,1	468,5	175	218,8	6164,9	2937,5
1987	1416,8	403,9	204,5	188,6	6568,8	3142
1988	1485,4	423,5	166,2	197,8	6992,3	3308,2
1989	1640	467,6	177,8	218,4	7459,9	3486
1990	1336,5	381	154,5	177,9	7840,9	3640,5
1991	1663,8	474,4	219,5	221,5	8315,3	3860
1992	1634,8	466,1	200,6	217,7	8781,4	4060,6
1993	1422,6	405,6	192	189,4	9187	4252,6
1994	1269,1	361,8	168,3	169	9548,8	4420,9
1995	1661,7	473,8	215,9	221,3	10022,6	4636,8
1996	1706,7	486,6	209,2	227,2	10509,2	4846
1997	1564,2	446	245,9	208,3	10955,2	5091,9
1998	1444,2	411,7	186,2	192,3	11366,9	5278,1
1999	1282,3	365,6	206,3	170,7	11732,5	5484,4
média plurianual	1582,7	451,3	210,9	210,7		

Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Valores ajustados de vazão no posto Fazenda Bela Vista

As razões dessas diferenças podem estar relacionadas às ações antrópicas, evaporações, evapotranspirações e infiltrações profundas. Com o objetivo de ajustar os valores das vazões estimadas aos das vazões medidas, recorreu-se

ao Método da Dupla Massa para estabelecer a relação entre elas. Calcularam-se, então, os valores acumulados das vazões médias anuais medidas e estimadas e, para verificar a correlação entre essas variáveis, obteve-se a reta de regressão delas (Figura 9).



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Figura 9. Reta de regressão da vazão média anual estimada acumulada (y) pela vazão média anual medida acumulada (x).

A equação dessa reta de regressão definida por:

$$\bar{Q}_{medida\ acumulada} = (0,467\bar{Q}_{estimada\ acumulada} - 15,52) m^3/s \quad 6$$

relaciona, linearmente, a vazão média anual medida acumulada com a vazão média anual estimada acumulada, representados, respectivamente por, $\bar{Q}_{medida\ acumulada}$ e $\bar{Q}_{estimada\ acumulada}$ com um coeficiente de determinação igual a $R^2 = 0,998$. O coeficiente angular dessa reta de regressão estabelece a relação entre os valores das vazões médias anuais medidas, no posto Fazenda Bela Vista, e

os valores das vazões médias anuais estimadas, indicando que a vazão média anual estimada ajustada pode ser obtida com 46,7% da vazão média anual estimada. Usou-se esse coeficiente angular 0,467 (46,7%) para ajustar as vazões médias anuais estimadas. A essas vazões aplicou-se o fator de correção 0,467, para obter a vazão média anual estimada ajustada, por meio da fórmula:

$$\bar{Q}_{estimada\ ajustada} = \frac{A \cdot P \cdot 0,467 m^3}{31536 \cdot s} m^3/s \quad 7$$

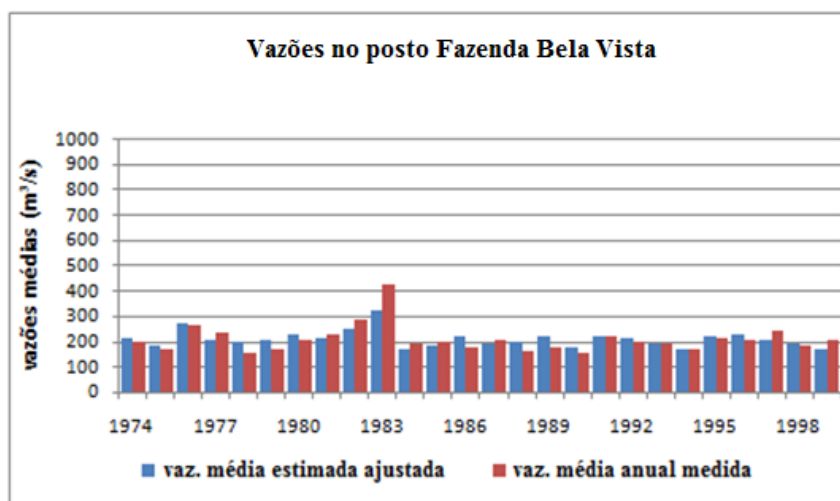
Para a área de drenagem da bacia do Rio Pardo $A = 8991,02 km^2$ a fórmula (5) passa a

ser escrita assim:

$$\bar{Q}_{estimada\ ajustada} = 0,13314 \cdot P m^3/s \quad 8$$

Com essa fórmula, obtiveram-se as vazões médias anuais estimadas ajustadas para todos os anos do período 1974-1999 (Tabela 3).

As diferenças entre os valores medidos e estimados ajustados diminuíram visivelmente (Figura 10).



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Figura 10. Histograma das vazões médias anuais estimadas ajustadas e medidas.

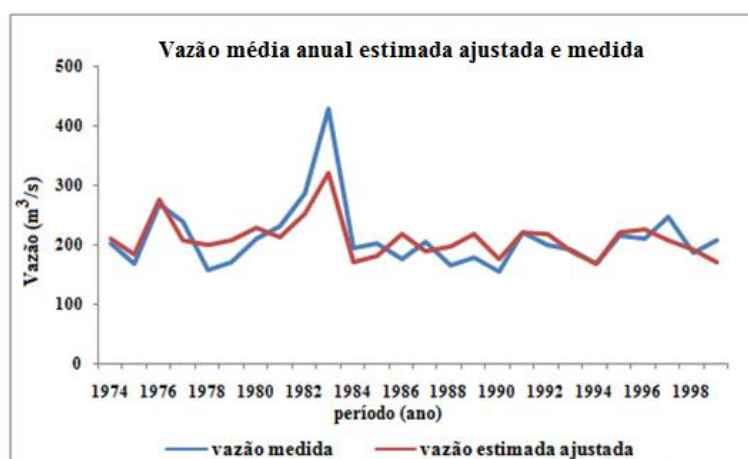
Buscou-se pela análise de correlação estabelecer o grau de relação entre a vazão média anual estimada ajustada e a vazão média anual medida (Lattin; Carroll; Green, 2011). O resultado foi um coeficiente de correlação igual a 0,846, obtido por meio do teste de correlação de Pearson com índice de significância igual a 5% (Xlstat, 2011), (Bussab & Morettin, 2002). Com esse coeficiente, estabeleceu-se uma relação entre chuva e vazão em que a vazão média anual estimada ajustada no posto Fazenda Bela Vista pode ser obtida calculando-se 13,3% da chuva média anual ocorrida na bacia do Rio Pardo.

Vazões, estimadas ajustadas e medidas, no posto Fazenda Bela Vista

O volume de água precipitado em uma bacia, excluídos os evaporados os transpirados

e os infiltrados profundamente, escoam pelo exutório de uma bacia (Tucci, 2009).

A chuva média anual, precipitada na bacia do Rio Pardo, transformada em vazão e representada pela vazão média anual estimada ajustada, quando comparada com a vazão média anual medida no posto Fazenda Bela Vista, que está muito próximo do exutório da bacia, demonstrou ter comportamento semelhante. Conforme se observa na Figura 11, as curvas representativas dessas duas vazões crescem e decrescem concomitantemente, na maioria dos anos do período e divergem em outros. Isso significa que, na maioria do período analisado, a vazão responde à chuva com um mesmo sinal, ou seja, um volume maior precipitado corresponde a um volume maior escoado e vice-versa.



Fonte: Elaborado pelo autor por meio de planilha eletrônica (Excel, 2010)

Figura 11. Curvas das vazões médias anuais estimadas ajustadas e medidas, no posto Fazenda Bela Vista no período de 1974 a 1999.

Quando se compara a média pluri-anual das vazões médias anuais estimadas ajustadas, que é igual a 210,7 m³/s, com a das vazões médias anuais medidas, que é igual a 210,9 m³/s, ambas calculadas para o período 1974 a 1999, observa-se que são valores muito próximos o que permite entender que o método

utilizado foi adequado. Por meio dele foi possível estabelecer uma relação entre a chuva média anual e a vazão média anual do período de 13,3%, ou seja, do volume médio anual que precipitou sobre a bacia do Rio Pardo, 13,3% escoou pelo exutório.

CONCLUSÃO

No painel temporal-espacial, que representa as chuvas anuais nos 26 anos focalizados (1974 a 1999), e nos 10 postos pluviométricos escolhidos, dois períodos puderam ser identificados. Um, de 1984 a 1999, em que as chuvas foram mais escassas que no outro período: de 1974 a 1983, classificados aqui, respectivamente, por período seco e chuvoso. Esses períodos, também, foram identificados com a mudança da vazão diária do Rio Pardo, principal rio da bacia, por meio do Método de Pettitt, em que se constatou a mudança na vazão média diária de 234,2 m³/s para 191,3 m³/s no posto Fazenda Bela Vista, localizado próximo ao exutório da bacia. Essa alteração ocorreu, aproximadamente, um ano depois do período chuvoso, em meados de 1985, sofrendo um decréscimo de 18%, aproximadamente, o que pode estar associado à mudança do período chuvoso para o seco.

Entre o valor estimado de vazão média anual, denominada nesse trabalho de vazão média anual estimada ajustada, e a chuva média anual, que ocorreram na bacia, foi estabelecida uma relação. Dessa relação pôde-se concluir que, aproximadamente, 13,3% da chuva média anual precipitada na bacia escoaram pelo posto Fazenda Bela Vista, ou seja, do volume médio anual precipitado de água na bacia (entrada), 13,3% escoaram pelo seu exutório (saída).

Os valores medidos e estimados das vazões médias anuais do período, respectivamente iguais a 210,9 m³/s e

210,7 m³/s, atingiram marcas semelhantes, o que evidenciou a qualidade do método utilizado.

Nos anos 1983 – “ano chuvoso”, 1995 – “ano habitual” e 1999 – “ano seco”, as curvas de permanência, ajustadas por curvas de tendências, com alto coeficiente de determinação, permitiram avaliar o comportamento da vazão nesses anos. A mesma inclinação, presente nas curvas de tendências, referentes às vazões que ocorreram nos anos, seco, chuvoso e habitual mostrou um comportamento semelhante nesses 3 anos, respeitando-se as devidas proporções dos volumes escoados, em cada ano. As vazões diárias foram condizentes com as chuvas que ocorreram nos anos padrão selecionados. A curva referente ao “ano chuvoso”, sempre acima no gráfico, representando maior volume escoado de água e a curva referente ao “ano seco”, sempre abaixo no gráfico, representando um menor volume. A curva referente ao “ano habitual”, com uma parte dela entre as outras duas curvas e outra parte coincidindo ou ficando levemente abaixo da curva do “ano seco”.

A inclinação das curvas e o comportamento da vazão coerente com os anos, seco, chuvoso e habitual, revelaram que as vazões diárias responderam às chuvas que ocorreram de acordo com a classificação atribuída aos “anos-padrão” escolhidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARROS, M. T. L.; ZAMBON, R. C. **Hidrologia ambiental**: ciclo hidrológico e balanço hídrico. São Paulo: USP. [20--?]. Disponível em: <https://mail-attachment.googleusercontent.com/attachment/u/0/?ui=2&ik=fc85e9de48&view=att&th=13cf3a2aed6315b5&attid=0.1&disp=inline&safe=1&zw&saduie=AG9B_P9FgrPvXn_Yj2rrGhmYvd

k8&sadet=1361323464666&sads=o9JF7uohiA0PYONmGIYjn gEzUa8>. Acesso em: 15 maio 2012.

2. BUSSAB, W. O & MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Saraiva, 2002.

3. EXCEL[®], versão 14, **Microsoft Corporation** ©, 2010

4. FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE
5. banco pluviométrico, fluviométrico e regionalização hidrológica do estado de São Paulo. Versão 1.0. c2000. 1CD-ROM.
6. GROppo, J. D.; MORAES, J. M.; BEDUSCHI, C. E.; MARTINELLI, L. A. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 24, n. 2, p. 181-193, 2005.
7. HAIR, J. F.; TATHAM, R. L.; ANDERSON, R. E.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005, 5. ed., 593 p.
8. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório número 40 670**. 2000. v.1. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO> /CRH/CBH-PARDO/1523/relatorio_zero_cbh_pardo.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2011.
9. LANDIM, P. M. B.; MONTEIRO, R. C.; CORSI, A. C. **Introdução à confecção de mapas pelo software SURFER**. Rio Claro: UNESP, 2002, 21p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/Surfer.pdf>> Acesso em: 11 nov. 2011.
10. LATIN, J. M.; CARROL J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados** São Paulo: Cengage Learning, 2011.
11. NAGHETTINI, M. C. **A bacia hidrográfica**. [20--?]. Disponível em: <www.etg.ufmg.br/tim1/bacia%20hidrografica.doc>. Acesso em: 20 set. 2011.
12. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Séries históricas de vazões**. c2013. Disponível em: <http://www.ons.com.br/operacao/vazoes_naturais.aspx>. Acesso em: 09 ago. 2011.
13. PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Journal of the Royal Statistical Society. Series C. Applied statistics**, London, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979.
14. PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
15. HIDRÁULICA. **BcDae2000**: 17. SÃO PAULO (Estado). Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo. **Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo**. [20--?]. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu?lig=podfp>>. Acesso em: 09 ago. 2011.
16. SÃO PAULO (Estado). Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo. **Banco de Dados Fluviométricos do Estado de São Paulo**. [20--?]. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/flu>>. Acesso em: 08 out. 2011.
17. SPIEGEL, M. R. **Estatística**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.
18. STURGES, H. A. The choice of a class interval. **Journal of the American Statistical Association**, New York, v. 21, n. 153, p. 65-66, mar. 1926.
19. SURFER[®], versão 8, **Golden Software, Inc.**[®], 2002
20. TUCCI, C. E. M. **Hidrologia ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
21. XLSTAT versão 2011 4.02 **Copyright Addinsoft**[®], 2011.
22. ZANDONADI, L. **As chuvas na bacia do Paraná: aspectos temporais, espaciais e rítmicos**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009.
23. ZAVATTINI, J. A. & BOIN, M. N. **Climatologia Geográfica: Teoria e Prática De Pesquisa**. Campinas: Alínea, 2013. 150 p.

*Manuscrito recebido em: 16 de Julho de 2013
Revisado e Aceito em: 03 de Dezembro de 2013*