

ZONEAMENTO HIDROLÓGICO POR MEIO DA RELAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÃO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS

W. Wolff¹, E. Nakai², S. N. Duarte³, M. V. Folegatti³

RESUMO: As alterações ambientais são um desafio para o gerenciamento dos recursos hídricos, no qual podem variar a disponibilidade desse recurso. A curva de permanência avalia a vazão de um curso d'água em um intervalo de tempo, sendo uma ferramenta importante para conhecimento da dinâmica hídrica de uma bacia hidrográfica. Conseqüentemente, o conhecimento das vazões de permanência auxilia ao zoneamento hidrológico e ao manejo de bacias hidrográficas. O objetivo deste estudo foi verificar as variáveis ambientais que influenciam nas vazões de permanência bem como no zoneamento hidrológico para o Estado de São Paulo. Dados de chuva, temperatura anual, umidade relativa do ar, percentual de argila, distância vertical à drenagem, altitude, declividade e parâmetros das curvas de permanência de vazões específicas médias mensais foram utilizados para as bacias analisadas. Assim, para verificar as variáveis que apresentam alta relação com as vazões de permanência e para definir zonas hidrológicas foi realizado uma análise fatorial, seguido de uma análise de agrupamento dos fatores obtidos. O parâmetro da curva de permanência com maior correlação com as variáveis ambientais foi o parâmetro de escala (μ), principalmente com as precipitações sazonal e anual. A análise de fatores mostrou que 5 fatores explicam 82% da variância total, em que por meio desses, obteve-se 5 regiões hidrológicas pela análise de agrupamento.

PALAVRAS-CHAVE: Análise multivariada; outorga de uso da água; interpolação espacial.

HYDROLOGICAL ZONING BY THE RELATION OF FLOW-DURATION CURVES PARAMETERS WITH ENVIRONMENTAL VARIABLES

¹ Postdoctoral researcher. ESALQ/USP, Piracicaba – São Paulo. Email; wwolff@usp.br;

² DSc. ESALQ/USP, Piracicaba – São Paulo;

³ Professor DSc. ESALQ/USP, Piracicaba – São Paulo.

ABSTRACT: Environmental changes are a challenge for the management of water resources, in which can change the hydric availability of this resource. The flow-duration curve evaluates the streamflow of a water course over a time interval, being an important tool for understanding the hydrological dynamics of a watershed. Consequently, the knowledge of the permanence streamflows aids to hydrological zoning and watersheds management. The aim of this study was to verify the environmental variables influence on permanence streamflows and on hydrological zoning for São Paulo state. Rainfall, annual temperature, relative air humidity, clay percentage, vertical distance to drainage, elevation, slope and flow-duration curve parameters of monthly average specific streamflows were used for the analyzed watersheds. Thus, to verify the variables with the largest relation to the permanence streamflows, and to define hydrological zones, a factor analysis was carried out, followed by a clustering analysis of obtained factors. The flow-duration curve parameter with the largest correlation with the environmental variables was the scale parameter (μ); mainly, with the seasonal and annual rainfall. Factor analysis showed that 5 factors explain 82% of the total variance, in which 5 hydrological regions were obtained by cluster analysis.

KEYWORDS: Multivariate analysis; granting of the use of water; spatial interpolation.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural e limitado de extrema importância para a manutenção da vida. As alterações de mudança climática, crescimento populacional, alterações na forma do uso e ocupação do solo são desafios para um gerenciamento dos recursos hídricos em diferentes escalas. Os usos múltiplos e as variações sazonais dos cursos d'água, tanto pelo impacto antrópico quanto pelo meio natural, requerem novos estudos para obter uma sustentabilidade ambiental.

Estimar a disponibilidade hídrica através da variação temporal e espacial das vazões dos rios é fundamental para uma gestão eficiente. A disponibilidade hídrica ou a vazão de um rio dependem da variação temporal, que é representada por várias funções hidrológicas. Uma das funções é a curva de permanência (Cruz & Tucci, 2008).

A curva de permanência expressa a relação entre a frequência, a distribuição e a magnitude de vazões em um curso d'água em um intervalo de tempo, sintetizando o regime hidrológico da bacia (Pinto, 2006; Costa et al., 2012). As vazões são variáveis ao longo do tempo, normalmente

apresenta alguma sazonalidade, mas em períodos não fixos. As vazões são determinadas por características físicas, climáticas, morfológicas e de cobertura vegetal da bacia (Costa et al., 2012). Segundo Córdova et al.(2000), as curvas são instrumento valioso para comparação entre as características de relevo, vegetação, uso do solo e precipitações de diferentes bacias hidrográficas.

Nas curvas de permanência de longo termo, a avaliação da vazão depende de séries históricas obtidos em postos fluviométricos (Costa et al., 2012). A elaboração de curvas de permanência é afetada pela ausência de uma rede hidrométrica que se estenda por todos os locais de interesse. Essa situação de desconhecimento do comportamento hidrológico de uma região, em períodos de escassez de água, gera grande problema para órgãos e tomadores de decisão no planejamento e gerenciamento do uso da água. Uma possível solução para esse problema é o emprego da análise de frequência regional para a estimação de valores característicos de vazões de estiagens em locais desprovidos, ou com pouca disponibilidade de dados, por meio dos dados fluviométricos existentes na região homogênea que contem a bacia em estudo (Pinto, 2006).

A técnica de regionalização de vazões permite estimar dados hidrológicos em locais sem dados ou com dados insuficientes (Costa et al., 2012). Entretanto, há uma literatura escassa sobre a regionalização das curvas de permanência quando comparadas com as curvas de frequência (Pinto, 2006). Na bacia do Itajaí, a técnica de regionalização e das curvas de permanência foram aplicadas para identificar a existência de homogeneidade nesta bacia (Córdova et al., 2000). Segundo os autores, para regionalização das curvas de permanência há dois métodos: com parâmetros de distribuição correlacionando com as características físicas da bacia ou pelas vazões com determinadas probabilidades. No estudo de Pessoa et al. (2011), a regionalização obteve bom desempenho na região da Calha Norte no Estado do Pará.

O conhecimento das vazões de permanência de um curso d'água é importante para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (Costa et al., 2012). A falta de um planejamento adequado pode levar a escassez ou abundância, que gera racionamento ou enchente respectivamente. A curva de permanência de vazão permite avaliar o tempo e a frequência de vazão para abastecer cidades, indústrias ou empreendimentos agropecuários e estabelecer a rentabilidade econômica de centrais hidrelétricas (Costa et al., 2012).

Neste contexto, o objetivo desse estudo foi verificar as variáveis ambientais com maior correlação aos parâmetros de curvas de permanência de vazões, a fim de realizar um zoneamento

hidrológico identificando regiões homogêneas para a gestão de recursos hídricos no Estado de São Paulo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Estado de São Paulo, que possui uma área de aproximadamente 248197 km²; está localizado entre as longitudes -44° 10' e -53° 07', e entre as latitudes -19° 46', e -25° 19'; e tem 85% de sua superfície entre 300 e 900 m de altitude.

Dentro do Estado foram instituídas as unidades de estudo, por meio da classificação de bacias hidrográficas proposta por Pfafstatter (1989), e assim dividiu-se o Estado em regiões, denominadas Ottobacias de agregação no nível 6, com áreas de drenagem que variam de 0,53 a 152,53 km².

Para todas as Ottobacias foi estimado o valor médio de: (i) altitude (m); (ii) declividade (%); (iii) precipitação anual e sazonal (mm); (iv) temperatura (°C); (v) umidade relativa do ar (%); (vi) percentual de argila no solo (%); distância vertical a drenagem (m) e os parâmetros da curva de permanência de vazões específicas médias mensais. Além disso, determinaram-se os valores absolutos da área de drenagem (km²) e densidade de drenagem (km.km⁻²).

A etapa inicial do estudo constituiu na investigação e obtenção de informação, sendo estas adquiridas em diferentes fontes: (i) Serviço Geológico do Brasil (CPRM) dados pluviométricos, obtidos pelo site, <http://www.cprm.gov.br/>; (ii) Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), dados fluviométricos, obtidos pelo site, <http://www.dae.sp.gov.br/>; (iii) Agência Nacional de Águas (ANA), dados fluviométricos e Ottobacias (Pfafstatter, 1989), obtidos no site, <http://www2.ana.gov.br/>; dados do projeto RADAM para obtenção do percentual de argila no solo; (iv) Distância Vertical à Drenagem, e Modelo Digital do Terreno (MDT), dados obtidos no Ambdata, <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/>; (v) temperatura média anual e umidade relativa do ar foram obtidas no Instituto Nacional de Meteorologia <http://www.inmet.gov.br>.

Sendo assim, como observado na Figura 1, foram analisadas ao todo 188 Estações pluviométricas, 507 Estações pluviométricas e 51 Estações meteorológicas, para 1617 bacias hidrográficas do Estado de São Paulo. Os dados são provenientes de períodos diferentes; e assim apresentam diferenças significativas em suas variâncias; portanto, para deixar os dados com o mesmo peso nas análises estatísticas, foi necessário padroniza-los para terem variância igual a 1 e média igual a 0.

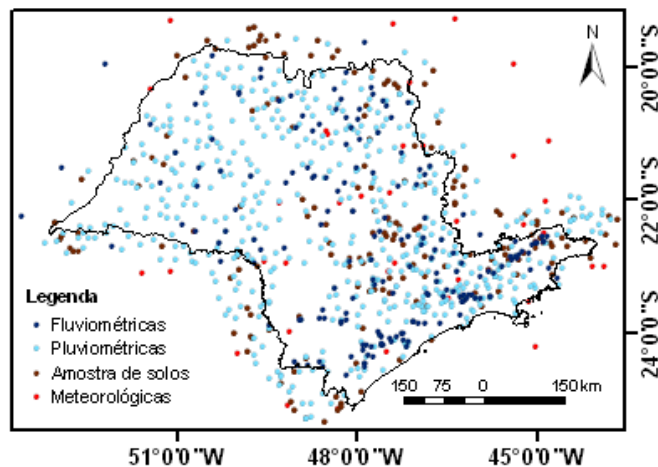


Figura 1. Localização das estações meteorológicas e hidrométricas utilizadas no estudo

Diante dos dados previamente selecionados, e para determinar o valor médio das variáveis estudadas em cada bacia se fez necessário espacializar tais variáveis. Este se fez por meio da interpolação pelo inverso da distância ao quadrado para: (i) temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$); (ii) percentual de argila no solo (%); e, (iii) umidade relativa do ar média anual (%).

A variável, precipitação, tanto anual quanto nos períodos sazonais foi interpolada pelo método da krigagem ordinária, devido verificação de uma estrutura de dependência espacial.

A altitude média e a declividade média foram obtidas por meio das imagens do radar SRTM de resolução espacial igual a 90m. Por fim, a última variável ambiental estudada foi a distância vertical à drenagem, esta extraída a partir do algoritmo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*).

Além das variáveis ambientais foram obtidos parâmetros de Curvas de Permanência de Vazão (CPVs) (Wolff et al., 2014). Estes parâmetros foram interpolados mediante o uso do método inverso da distância ao quadrado. Assim, para cada bacia hidrográfica estudada, suas características físicas e fluviométricas foram representadas por intermédio dos parâmetros de forma (σ) e de escala (μ), respectivamente, indicado por meio da forma e da escala da curva de duração das vazões específicas médias mensais.

Diante da determinação de todas as variáveis ambientes e dos parâmetros da curva de permanência das vazões específicas médias mensais, para as 1617 bacias estudadas, fez-se o zoneamento hidrológico mediante os seguintes passos: (i) correlação de Pearson entre os dois grupos de variáveis, a fim de estabelecer quais variáveis ambientais tem influência significativa no regime fluviométrico dos cursos d' água estudados; (ii) Análise de fatores das variáveis com

considerável correlação significativa, a fim de reduzir o número de variáveis a fatores que explicam mais que 70 % da variância dos dados; e, Análise de agrupamento dos fatores obtidos para cada bacia estudada a fim de determinar as zonas hidrológicas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Está apresentado na Tabela 1 a correlação entre as variáveis ambientais com os parâmetros da curva de permanência de vazões específicas médias mensais das bacias estudadas.

Observa-se que, a área, altitude média e densidade de drenagem, não apresentam correlação significativa com os parâmetros da curva; isso pode ser observado, pois a vazão específica é determinada pela área da bacia hidrográfica, assim, conseqüentemente as variáveis dependentes desta, não apresentam relação.

Em contrapartida, a maior correlação obteve-se para os dados de precipitação, tanto anual quanto sazonal, sendo assim este é o fator preponderante na formação de vazão nos cursos d'água.

Com relação aos parâmetros, o que apresentou maior relação com as variáveis ambientais foi o μ , este indica a forma da curva de permanência e conseqüentemente a capacidade de regularização de vazão que o manancial possui, indicando o potencial da bacia como um sistema produtor de águas.

Portanto, diante de exclusão das variáveis que não apresentam correlação significativa com os parâmetros estudados, fez-se análise fatorial diante da rotação varimax. Na Tabela 2 está demonstrada os escores dos respectivos fatores, em que diante do autovalor maior que 1 foi possível escolhe 5 fatores para representar as variáveis ambientais, estes permitem a análise de 82 % da variância total amostrada, assim o restante considerado como erro aleatório da análise foi excluído.

Observa-se que, os atributos que carregam altamente o Fator 1 é a precipitação nos meses de inverno e o Fator 2 a precipitação nos meses de verão e anual, esta relação foi observada pois as chuva de verão contribuem significativamente nas precipitação total anual assim tais variáveis ficaram enquadradas no mesmo fator.

O Fator 3 é carregado pelos atributos físicos de declividade média e distância vertical à drenagem. Por sua vez, as variáveis meteorológicas temperatura média e umidade relativa do ar são representadas pelos Fatores 4 e 5 respectivamente, enfatizando que, a temperatura média

apresenta carga negativa e assim o quanto maior a temperatura média menor o valor sobre o fator correspondente.

Por fim, a percentagem de argila não apresentou uma carga significativa nos Fatores, isso pode se dado pelo fato, de que parte da carga do Fator 3 que são as variáveis físicas estejam indiretamente representando esta variável, pela relação que ela tem com as variáveis condizentes com este fator.

Sendo assim, diante da representação das bacias pelos Fatores das variáveis ambientais e pela consequente exclusão da variância “indesejada”, fez-se a análise de agrupamento das bacias, em que foi possível determinar 5 regiões hidrológicas apresentados em forma de dendrograma pela Figura 2 e em forma de mapa pela

Figura 3.

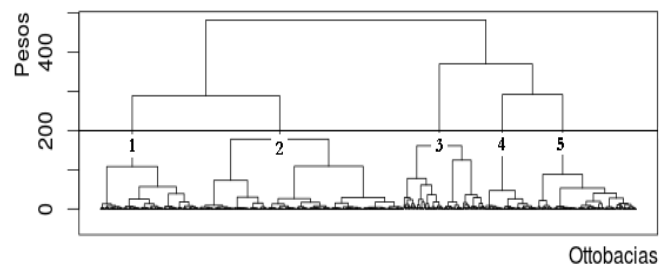


Figura 2. Análise de agrupamento dos fatores e obtenção das zonas hidrológicas

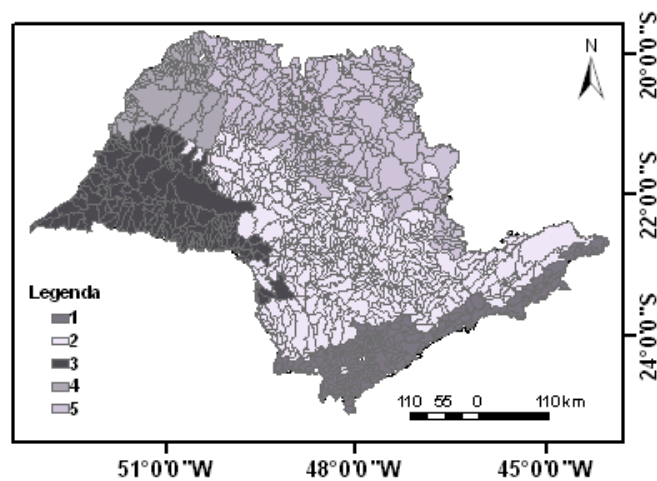


Figura 3. Zonas hidrologicamente homogêneas

CONCLUSÃO

O parâmetro da curva de permanência que melhor se correlaciona com as variáveis ambientais é o μ , principalmente com as precipitações sazonal e anual. A análise dos fatores mostrou que 6 fatores explicam 82% da variância da análise. Obteve-se 5 regiões hidrológicas pela análise de agrupamento dos fatores.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test of goodness of Fit. Journal of the American Statistical Association, Boston, v.48, p.765-769, 1954.

CÓRDOVA, R. N.; PINHEIRO, A.; PINHEIRO, I. G. Regionalização da curva de permanência como base para o gerenciamento da bacia do Itajaí. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. p.1-7, 2000.

COSTA, V. A. F.; FERNANDES, W.; NAGHETTINI, M. Modelos Regionais para Curvas de Permanência de Vazões de Rios Perenes, Intermitentes e Efêmeros, com Emprego da Distribuição Burr XII Estendida. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 2, p. 171-180, 2012.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n.1, p.111-124, 2008.

LOPES, F. C. A. Uso de atributo topográfico para estabelecer relação topografia – vazão na Bacia do Altíssimo Rio Negro, PR/SC. Revista Geonorte, v.3, n.4, p. 1320-1331, 2012.

PESSOA, F. C.L; BLANCO, C. J.C.; MARTINS, J. R. Regionalização de curvas de permanência de vazões da região da calha norte no estado do Pará. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, n.2, p.65-74, 2011.

PFAFSTETTER, O. Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação. Rio de janeiro: DNOS, 1989.

PINTO, J. A. O. Avaliação de métodos para a regionalização de curva de permanência de vazões para a bacia do Rio das Velhas. 2006. 219f. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)– Universidade Federal de Minas Gerais, MG.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. LA L. Gestão de bacias hidrográficas. Estudos avançados, v. 22, n.3, p.43-60, 2008.

WOLFF, W.; DUARTE, S. N.; MINGOTI, R. Nova metodologia de regionalização de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. RBRH: revista brasileira de recursos hídricos, v. 19, n. 4, p. 21-33, 2014.

Tabela 1. Correlação de Pearson entre as variáveis ambientais e os parâmetros da distribuição Log normal ajustada a dados de vazão específica média mensal

Variáveis	Parâmetros		
	σ	γ	μ
Área (km ²)	NS	NS	NS
Im (%)	-0,18	0,34	0,56
Altitude (m)	NS	-0,15	NS
Dd (km/km ²)	0,1	NS	-0,08
Pas (%)	-0,31	0,22	0,43
Dvd (m)	-0,17	0,17	0,42
Tmed (°C)	0,3	-0,25	-0,54
URa (%)	-0,15	0,52	0,60
PluJFM (mm)	NS	0,29	0,64
PluAMJ (mm)	-0,32	0,38	0,67
PluJAS (mm)	-0,31	0,44	0,68
PluvOND (mm)	NS	NS	0,34
PluANO (mm)	-0,19	0,42	0,83

Nota: NS – não significativa; Im – declividade média; Dd – densidade de drenagem; Pas – percentual de argila no solo; Dvd – distância vertical à drenagem; Tmed – temperatura média; Ura – umidade relativa do ar; PluJFM, AMJ, JAS e OND – pluviometria trimestral indicados pelas letras iniciais do respectivos meses no ano; PluvANO- pluviometria anual

Tabela 2. Rotação varimax de solução de fator para as variáveis estudadas

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
Im (%)	0,209	0,145	0,846	0,244	0,268
Pas (%)	0,238	NS	NS	0,309	0,130
Dvd (m)	0,151	0,176	0,724	0,105	NS
Tmed (°C)	-0,276	NS	-0,246	-0,919	-0,101
Ura (%)	0,382	NS	0,303	0,251	0,832
PluvJFM (mm)	0,314	0,848	0,175	NS	0,309
PluvAMJ (mm)	0,91	0,13	0,192	0,282	0,184
PluvJAS (mm)	0,811	NS	0,301	0,371	0,292
PluvOND (mm)	-0,113	0,851	0,112	NS	-0,197
PluvANO (mm)	0,458	0,612	0,29	0,243	0,349
Variância explicada por cada fator					
Autovalor	2,153	1,9	1,653	1,353	1,171
Proporção	0,215	0,19	0,165	0,135	0,117
Cumulativo	0,215	0,405	0,571	0,706	0,823

Nota: ns – não significativa; Im – declividade média; Dd – densidade de drenagem; Pas – percentual de argila no solo; Dvd – distância vertical à drenagem; Tmed – temperatura média; Ura – umidade relativa do ar; PluvJFM, AMJ, JAS e OND – pluviometria trimestral indicados pelas letras iniciais do respectivos meses no ano; PluvANO- pluviometria anual