

EFICIÊNCIA DO MÉTODO *CURVE NUMBER* DE RETENÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS

SOARES, Marcia Regina Gomes de Jesus;^{a*} FIORI, Chisato Oka;^b
SILVEIRA, Claudinei Taborda da;^c KAVISKI, Eloy^d

(a) Doutora em Geografia, Universidade Federal do Paraná (UFPr). <http://lattes.cnpq.br/1076345085840555>

(b) Prof^a da Universidade Federal do Paraná (UFPr). Doutora em Geociências, Universidade Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP/RC). <http://lattes.cnpq.br/5447522894267625>

(c) Prof. Dr em Geografia, Universidade Federal do Paraná (UFPr). <http://lattes.cnpq.br/4436295285744827>

(d) Prof. Dr em Engenharia, Universidade Federal do Paraná (UFPr). <http://lattes.cnpq.br/3275560911057775>

(*) CORRESPONDÊNCIA COM AUTOR

Endereço: UFP, Departamento de Geografia - Centro Politécnico. CEP: 81531990, Curitiba (PR), Brazil. Tel: (+55 41) 33613450.

Email: marcia.rgoares@gmail.com

RESUMO

Resultados de um estudo cujo objetivo geral foi verificar a eficiência, com dados hidrológicos de vazão, o parâmetro “curve number” (CN) de retenção de águas pluviais em bacias hidrográficas, na escala regional, através da análise estatística multivariada visando contribuir para a gestão e manejo dos recursos hídricos. O CN faz parte do método de estimativa de vazões do Soil Conservation Service (SCS), um modelo chuva-vazão que é utilizado para estimar vazões em pequenas bacias com base em dados pedológicas e de evolução de uso e ocupação do solo. O método foi aplicado em 14 sub-bacias hidrográficas – PR, cujo exutório coincidissem com as estações de coleta de vazão, visando compor os pontos amostrais para a análise estatística multivariada de correlação canônica. O resultado da correlação canônica, representada pelo R canônico foi igual a 0.90 com R² canônico igual a 0.81, qui-quadrado (χ^2) de 15.8577 e GL (graus de liberdade) igual a 7, o que é muito significativo e expressa alta correlação entre o método e as vazões. Estes resultados confirmam a hipótese de que o CN pode ser validado pela vazão.

Palavras-chave: Correlação canônica; Bacias hidrográficas; Validação de modelo.

ABSTRACT/ RESUMEN

EFFICIENCY OF THE CURVE NUMBER METHOD OF RAINWATER RETENTION

The present study presents the results of research whose main objective was to use hydrological data on flow to verify the efficiency of the parameter curve number (CN) of rainwater retention in river basins on a regional scale, through multivariate statistical analysis, to contribute to the administration and management of water resources. The CN is part of the method of estimating flow used by the Soil Conservation Service (SCS). This rainfall-runoff model is used to estimate flow in small river basins, based on soil data and the evolution of land use and occupation. The method was applied to 14 hydrographic sub-basins - PR, whose confluences coincide with the gauging stations, to set up the sampling points for the multivariate statistical analysis of canonical correlation. The result of the canonical correlation, represented by the canonical R was equal to 0.90 with canonical R² equal to 0.81, chi-square (χ^2) of 15.8577 and DF (degrees of freedom) equal to 7, which is very significant and expresses a high correlation between the method and flow rates. These results confirm the hypothesis that the CN can be validated by the flow, because according to the results they are not independent and are highly related.

Keywords: Canonical correlation; River basins; Model validation.

EFICIENCIA DEL MÉTODO *CURVE NUMBER* DE RETENCIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Los resultados de un estudio cuyo objetivo general fue verificar la eficiencia, utilizando los datos de flujo hidrológicos, el parámetro “curve number” (CN) de retención de agua de lluvia en las cuencas hidrográficas, a escala regional, mediante un análisis estadístico multivariante, para contribuir a la gestión y manejo de los recursos hídricos. La CN es parte de la estimación de flujo del Soil Conservation Service (SCS), un modelo de precipitación-flujo que se utiliza para estimar los caudales en cuencas pequeñas con base en datos del suelo y evolución del uso y la ocupación. El método se aplicó a 14 sub-cuencas – PR, exutório que coincidió con la colección fluyen estaciones. Para componer los puntos de muestreo para el análisis multivariante de correlación canónica. El resultado de la correlación canónica representado por R canónica fue igual a 0,90 con R² canónica igual a 0,81, chi-cuadrado (χ^2) de 15.8577 y GL (grados de libertad) igual a 7, que es muy significativo y expresó alta correlación entre las tasas de método y de flujo. Estos resultados confirman la hipótesis de que la CN puede ser validada por el flujo.

Palabras clave: Correlación canónica; Cuencas hidrográficas; Validación del modelo.

Histórico do artigo:

Recebido 4 Maio, 2016

Aceito 28 junho, 2016

Publicado 15 janeiro, 2017

INTRODUÇÃO

A informação sobre o uso do solo é importante para o estabelecimento de políticas de gestão de uma bacia, visto que traduz a evolução da ocupação de sua superfície e as atividades de preservação. Contempla elementos determinantes da capacidade de infiltração e a retenção de água do escoamento superficial em uma bacia, como o tipo de uso e a cobertura do solo. A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar a eficiência e a viabilidade do uso do parâmetro CN (curve-number) do modelo chuva-vazão desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS), órgão do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA). Este parâmetro é muito utilizado para estimar vazões em pequenas bacias com base em dados que podem ser derivados de sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica. Além disso, a evolução temporal do potencial de retenção de águas pluviais de bacias hidrográficas através do estudo do uso e cobertura do solo derivado de imagens de satélite para a gestão e manejo dos recursos hídricos também foi verificada.

Um método simples e largamente utilizado em modelos hidrológicos de bacias hidrográficas no mundo, o método CN tem sido empregado por pesquisadores como Hawkins, 1993; Jacobs; Srinivasan, 2005; Tedela et al., 2008; Santos et al, 2007; Banasik; Woodward 2010; Cao et al., 2011; Araújo Neto et al., 2012. O método do SCS baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e de perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (TYAGI et al., 2008).

Entretanto, quando se trabalha com métodos que atribuem pesos numéricos para a geração de matrizes resultantes da inter-relação de variáveis importantes, como declividade, tipos de solo, uso do solo, por exemplo, fica a dúvida da veracidade destes resultados.

Partindo deste pressuposto, a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa baseia-se na intenção em contemplar variáveis de vazão para a análise e gestão de elementos físicos da paisagem e seus processos, o que é extremamente necessário para se chegar a resultados significativos. Também da preocupação de verificar se métodos que se fundamentam na atribuição de pesos numéricos para se chegar a generalizações sobre áreas estudadas são coerentes com a realidade.

Nesta pesquisa são levadas em consideração as variáveis físicas pedológicas, geomorfológicas e de evolução de uso e ocupação do solo que foram confrontadas com os dados de vazão e chuva com o objetivo de conhecer até que ponto o CN pode ser considerado um método eficiente no levantamento hidrológico.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo da presente pesquisa, designada bacia hidrográfica do Ivaí (Figura 1), foi selecionada por apresentar dados de vazão e chuva adequados aos objetivos propostos, além de mapas regionais na escala 1:250.000, afim de verificação se o método analisado mostra compatibilidade com esta escala, com as imagens no formato raster e com os dados hidrológicos.

A bacia hidrográfica do Ivaí, inteiramente inserida no território paranaense, nas regiões que compreende o segundo e o terceiro planalto, localiza-se entre as coordenadas UTM 224.214,2 m e 7.465.630,6 m; 525.920,2 m e 7.170.625,7 m, apresentando uma área total de 35.845 km². Entretanto foi necessário diminuir a área de estudo em relação à área total da bacia (Figura 1), tendo em vista que a última estação de coleta de vazão, bem no exutório do rio Ivaí, não apresentou dados coerentes, e por isso teve de ser descartada, o que reduziu a área de estudo para 34.419 km².

O rio Ivaí surge da confluência dos rios Dos Patos e São João, na Porção Sul do Estado do Paraná, precisamente na região denominada Serra da Boa Esperança, na divisa dos municípios de Prudentópolis e Ivaí (BALDO, 2006).

Os dados geológicos são compostos de sedimentos correspondentes ao grupo Passa Dois, compreendendo as formações Irati, Serra Alta, Terezina e Rio do Rasto; Grupo São Bento, que

abrange as formações Piramboia e Botucatu; Formação Serra Geral, que recobriu uma grande parte do imenso deserto de Botucatu; o arenito da Formação Caiuá do grupo Bauru; e, em alguns locais, parcialmente recobertas por sedimentos inconsolidados. (BALDO, 2006).

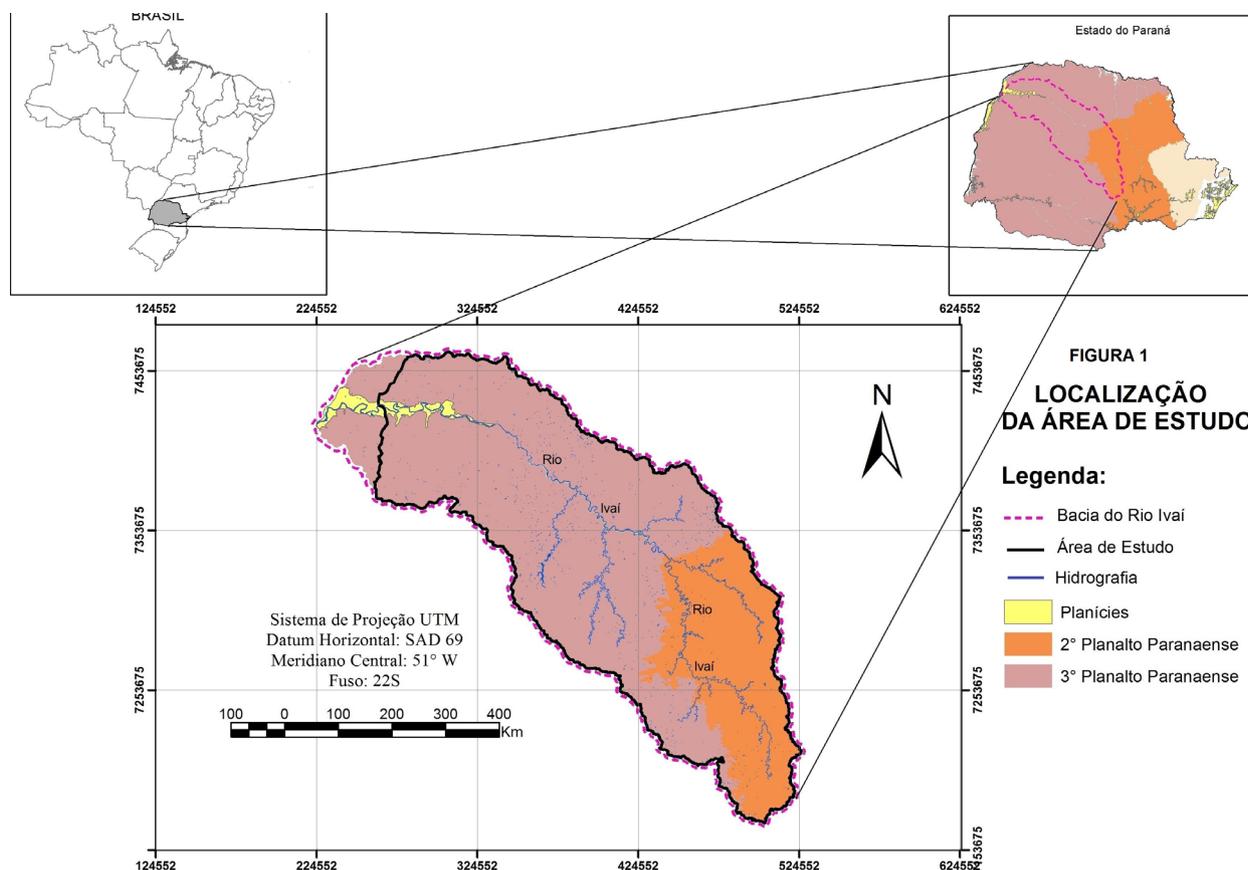


Figura 1 – Localização da área de estudo: Bacia do rio Ivaí - PR.

Segundo Maack (1981), o sistema orográfico da bacia do rio Ivaí evidencia claramente a correlação das formas existentes com a constituição geológica. As altitudes na bacia variam de menos 300 a mais de 1.300 metros desde a foz até a nascente. O rio Ivaí nasce no Segundo Planalto e corta todo o Terceiro Planalto em sentido noroeste.

Essa bacia por apresentar grande extensão territorial possui também uma variedade muito grande de solos. Dentre os mais encontrados, destacam-se: Cambissolos, Latossolos, Argissolos, Nitossolos e os Neossolos, segundo a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária EMBRAPA (2008), atualizadas a partir dos dados obtidos junto a EMBRAPA (1984).

Segundo o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 1994) o clima da área de estudo está enquadrado em dois tipos principais; o primeiro é tropical e abrange o curso inferior e o médio da bacia, e o segundo, subtropical e compreende o curso superior da bacia. Na porção do baixo Ivaí, os maiores totais médios de temperatura acima de 22 °C ocorrem em outubro, janeiro e dezembro, enquanto os menores valores, em torno dos 9 °C, acontecem nos meses de agosto, julho e abril (CARAMORI, 1989), associado ao tipo de cobertura pedológica predominante, favorecem o desenvolvimento de vegetação tipo floresta (Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Ombrófila Mista).

MATERIAL E MÉTODOS

Para atender os objetivos propostos foi construído um banco de dados com informações derivadas de imagens Landsat e dados a respeito dos solos derivados de mapas pedológicos na escala de 1:250.000, da EMBRAPA (1984).

Através da variação temporal da cobertura foi verificada a evolução do adensamento urbano e seu grau de impacto na hidrologia e esta variação foi estimada usando imagens Landsat. Através das imagens de satélite Landsat TM 5 e com o cuidado em atender a mesma sazonalidade, o levantamento compreendeu um período de multitemporalidade de vinte e cinco anos (1986 e 2011). Com isso realizou-se a classificação supervisionada das imagens multiespectrais, utilizando-se do software ENVI versão 4.5 desenvolvido por ENVI® (1997).

O classificador foi o de Distância Mínima, que comparado aos demais (Paralelepípedo, MAXVER, Mahalanobis, entre outros), foi o que apresentou menor matriz de confusão. Neste método os modelos de classes são caracterizados pela simetria espectral, onde o método de distância mínima atribui cada pixel desconhecido à uma classe cuja média esteja mais próxima. As categorias de uso adaptadas do Manual do uso da Terra (IBGE, 2013), para esta pesquisa foram Corpos d'Água, Matas Naturais e/ou Silvicultura, Pastagem, Agricultura e Áreas Urbanas.

O NÚMERO DA CURVA DO MÉTODO DO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)

O Soil Conservation Service (SCS) do Departamento de Agricultura dos estados Unidos propôs um método simplificado para estimar o escoamento superficial em pequenas bacias rurais. Esta estimativa se baseia em dados que são relativamente facilmente obtidos, como uso e cobertura do solo, precipitação e tipo de solo. O método se popularizou em estudos hidrológicos devido à sua fácil aplicação. Posteriormente, maneiras de estimar os parâmetros de entrada a partir de imagens de satélite foram propostos, como o estudo de Ragan; Jackson (1980), o que introduziu uma adaptação e simplificação de um de seus parâmetros. O método consiste em estimar a chuva efetiva (Equação 1), a parcela do volume precipitado que forma o escoamento superficial, e com isto o escoamento superficial.

A chuva efetiva é dada por:

$$Q = ((P - 0.3S)^2)/(P + 0.7S) \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde,

Q = altura da lamina do escoamento, em mm

P = precipitação, em mm

S = capacidade de recarga máxima da bacia após uma precipitação antecedente de 5 dias, em mm

A capacidade de recarga máxima está associada às características físicas da bacia, em termos de solos e cobertura vegetal (Equação 2).

$$S = (24500/CN) - 254 \quad \text{(Equação 2)}$$

Para seu cálculo, é necessário determinar o parâmetro CN, Curve Number, que é um valor tabelado que descreve a combinação de tipo de solo, a umidade antecedente e o uso e cobertura na bacia.

Como uma bacia não apresenta características uniformes em termos de solo e cobertura vegetal, o valor representativo da bacia pode ser obtido ponderando cada valor presente na bacia pela proporção de área associada a este valor:

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n cn_i a_i}{A} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde

CN = número da curva;

A = área da bacia;

cn = número da curva de uma parte da bacia;

a = área associada a um número de curva na bacia.

Neste estudo, para derivar o valor do parâmetro CN foram analisadas as associações entre as classes de cobertura e ocupação obtidas das imagens orbitais e o grupo hidrológico do solo. Para esta classificação hidrológica, foram utilizadas as informações pedológicas fornecidas pela EMBRAPA (1984).

A tabela original do método do SCS é ampla e apresenta uma grande quantidade de combinações. No estudo de Ragan; Jackson (1980), esta quantidade de possibilidades foi restrita em função da capacidade de se mapear a cobertura usando imagens orbitais. Com base nessa simplificação, e considerando as classes presentes na região de estudo, uma tabela simplificada foi proposta, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 – Número da curva CN do SCS simplificado

| Uso do solo | Grupo hidrológico do solo | | | |
|--------------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|
| | A | B | C | D |
| Agricultura | 62 | 71 | 78 | 81 |
| Corpos D'água | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Pastagem | 25 | 59 | 75 | 83 |
| Florestas Naturais e/ou Silvicultura | 36 | 60 | 70 | 76 |
| Áreas urbanas | 77 | 85 | 90 | 92 |

A curva de permanência constitui importante fonte de apontamento do potencial de regularização hidrológica, e ela foi construída por dispor as vazões diárias observadas no período considerado em ordem decrescente. Com a amplitude da variação das vazões, foram definidos os intervalos de classe e colocados os intervalos em ordem decrescente e verificar o número de eventos ocorridos em cada intervalo à frequência absoluta. Foi calculada a frequência relativa (frequência absoluta / número de dados) para cada intervalo e acumuladas seguindo a ordem anterior. Foram plotados gráficos com o limite inferior de cada intervalo (ordenada) e a correspondente frequência relativa acumulada (abscissa). Foi calculado também os desvios padrões em relação à média e o coeficiente de variação (relação entre o desvio padrão e a média).

O mesmo procedimento foi aplicado para a elaboração das vazões máxima anual e mínima de 7 dias, 15 dias, 30 dias, 60 dias e 90 dias.

ANÁLISE DE CORRELAÇÃO CANÔNICA (ACC)

O objetivo da correlação canônica é relacionar simultaneamente múltiplas variáveis dependentes e independentes. A correlação canônica mede a força da associação entre os dois conjuntos de variáveis. A força do relacionamento entre os pares de variáveis é refletida principalmente pelos coeficientes canônicos de uma primeira função (R canônico). Quando elevados ao quadrado (R² canônico), tais coeficientes representam a quantidade de variância em um composto linear da função canônica atribuída a outro composto da mesma função. A análise de correlação canônica tem por objetivo principal verificar a associação entre dois grupos de variáveis, podendo assim, relacionar determinados dados hidrológicos com variáveis que caracterizam o estado físico da bacia hidrográfica. É a técnica que apresentou melhores resultados, uma vez que na análise de agrupamentos e na análise fatorial os resultados não foram positivos.

Para a realização das análises estatísticas multivariadas, foi utilizado o software estatístico BioEstat 5.3 (AYRES et al., 2007), gratuito, desenvolvido no Departamento de Estatística da Universidade Federal do Pará no Brasil.

Nesta pesquisa, para se atender aos objetivos propostos – conhecer e avaliar quais determinantes físicas melhor explica o comportamento hidrológico nas sub-bacias a fim de validação dos métodos do CN, foram confrontados os dados de vazões ($X = Q(TP)$; DESVPAD; CV; $Q(\text{máx})$; $Q(\text{mín}7)$; $Q(\text{mín}15)$; $Q(\text{mín}30)$; $Q(\text{mín}60)$; $Q(\text{mín}90)$) com as variáveis fisiográficas ($Y = \text{CN médio}$ (anos de 1986 e 2011), de 14 sub-bacias hidrográficas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da subdivisão da bacia do rio Ivaí em 14 (quatorze) sub-bacias que equivalem a 14 pontos amostrais, como dados estatísticos podem ser visualizados na Tabela 2.

Os percentuais das áreas se dão em relação à sub-bacia 14, cujo exutório coincide com o último posto de coleta de vazão da área de estudo. As sub-bacias que não recebem contribuição de áreas e aportes hidrográficos de sub-bacias à montante, além da 1 são a 5, a 7, a 10 e a 13.

Tabela 2 - Área da bacia do rio Ivaí por compartimento

| Compartimentação | Área (km ²) | Porcentagem (%) |
|------------------|-------------------------|-----------------|
| Sub 1 | 1054,1 | 3 |
| Sub 2 | 1089,6 | 3 |
| Sub 3 | 3566,5 | 10 |
| Sub 4 | 8545,2 | 25 |
| Sub 5 | 2611,9 | 8 |
| Sub 6 | 12703,8 | 37 |
| Sub 7 | 3277,1 | 10 |
| Sub 8 | 19436,1 | 56 |
| Sub 9 | 1553,3 | 5 |
| Sub 10 | 854,2 | 2 |
| Sub 11 | 22498,5 | 65 |
| Sub 12 | 28403,1 | 83 |
| Sub 13 | 802,5 | 2 |
| Sub 14 | 34419,3 | 100 |

A Figura 2 mostra a Curva de Permanência das vazões médias mensais da área total da presente pesquisa (Sub-bacia 14), ou seja, a capacidade de retenção de águas superficiais e tempo de duração das vazões. Também está relacionado à frequência com que ocorrem vazões de diferentes magnitudes. Estes resultados são os valores médios no intervalo temporal de 27 anos, compreendendo os dados mensais dos anos de 1985 a 2012, tanto para a curva de permanência, máximas, mínimas, desvio padrão e coeficiente de variação. Como a média é um valor que representa vários outros, muitas vezes, ela somente não é suficiente para avaliar um conjunto de dados. É importante, então, conhecer outras medidas, que mostrem a diferença (dispersão) que existe entre a média e os valores do conjunto. Por isso destacam-se utilizar nesta pesquisa além dos valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

A curva de duração de fluxo das vazões mostra considerável curvatura (Figura 2). A forma da curva possui significado e reflete as condições de escoamento na bacia e no canal do rio. De acordo com Destefani (2005), quanto mais curvatura possuir a curva, maior é a variabilidade do fluxo, ocasionado por fluxos de vazão rápidos e pouca base de fluxo. Nota-se pela Figura 2 exatamente esta situação para a bacia do rio Ivaí, que em aproximadamente 10% do tempo total de escoamento, a vazão passa de 2.500 para 500 m³/s, uma variação de 2.000 m³/s.

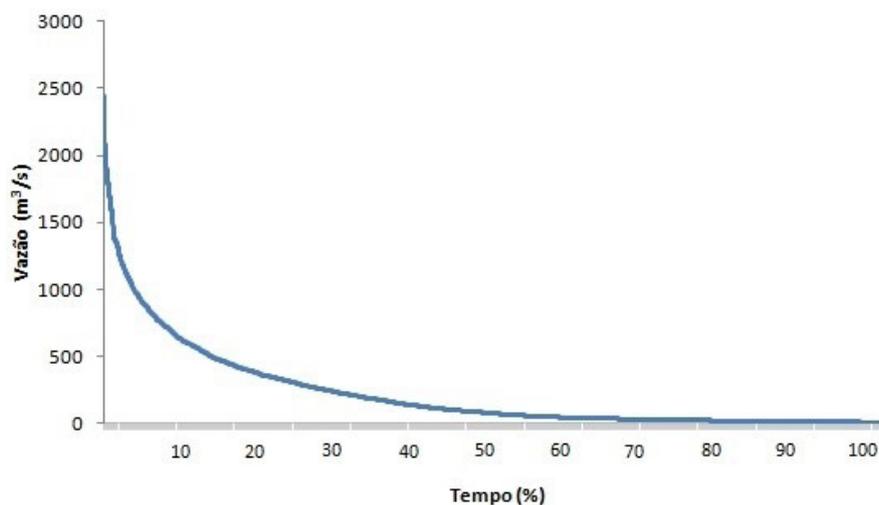


Figura 2 – Curva de permanência.

Essa condição tem sido notada para o rio Ivaí, que possui escoamento fluvial extremamente oscilatório e com pouca contribuição do lençol freático o que é observado durante as vazões muito baixas durante os períodos de estiagem. Estas diferenças são apresentadas pelos resultados das vazões da média histórica: máxima anual e mínima para o mesmo período, de 1985 a 2012, dispostas na Figura 3.

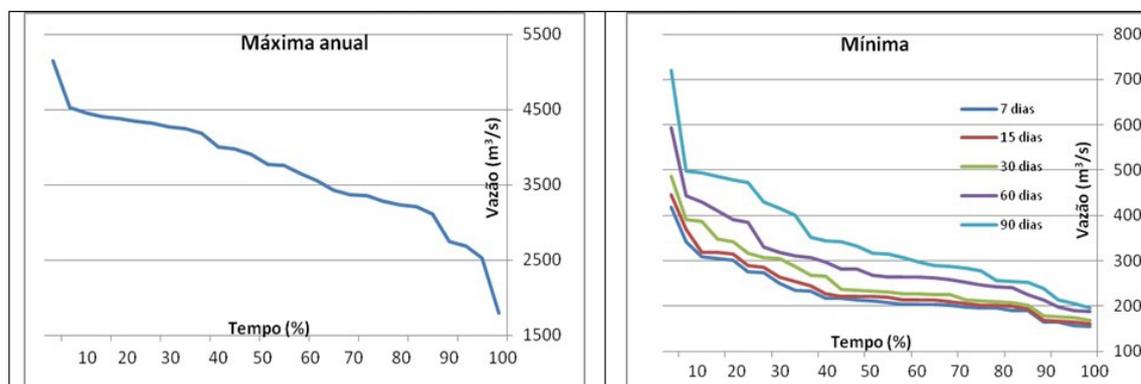


Figura 3 – Vazões Médias Diárias: Máxima Anual e Mínima da Bacia do rio Ivaí - PR. (1985-2012)

De acordo com Destefani (2005), do conhecimento a respeito do regime hidrológico dos sistemas fluviais, as vazões de elevada magnitude e intensidade são as que recebem maior atenção, pois durante o período em que os rios estabelecem-se na fase de águas altas, são verificadas as transformações mais rápidas e significativas do ambiente, visualizado no aspecto geomorfológico (esculturação e modificação das formas do leito, margens e até mesmo planície), dependendo da situação principalmente ecológica (conectividade entre o canal e a planície) e no contexto humano (perda de cultivos agrícolas, destruição de residências e estabelecimentos comerciais, com prejuízos materiais e muitas vezes humanos). Esses aspectos evidenciam que as cheias são eventos hidrológicos que podem causar instabilidade ambiental e econômica. As vazões de grande magnitude configuram elevada altura do nível d'água, descarga e volume a ponto de poder causar inundações. São retratados pelos eventos de cheia e inundação que se diferenciam principalmente pela magnitude e pelo seu efeito, sendo que as inundações superam a capacidade de escoamento do canal causando transbordamentos e espalhando as águas nas áreas mais baixas adjacentes ao canal.

Existe dificuldade em se determinar que magnitude de vazão possa ser considerada cheia, principalmente se esta não se propagar como inundação. Não existe um método ou técnica que forneça um limite padronizado para determinar o ponto de descarga a partir do qual se inicia a cheia. Assim, cada pesquisador tem a liberdade para definir uma onda ou pico de cheia conforme objetivos da pesquisa. Em geral, consideram-se cheias mensais ou anuais que correspondem ao pico de descarga máximo ocorrido no decorrer dos meses ou anos respectivamente, independente se a mesma se propaga como inundação ou não (DESTEFANI, 2005).

Como pode ser visualizada na Figura 3, a variação da máxima anual ocorre entre 1.800 e 5.144 m³/s, com característica de maior regulação natural, apresentada pela forma da curvatura. Para as mínimas, que representam os períodos de estiagem, a curva de duração tem menor inclinação para o período de estiagem de 07 dias e maior inclinação para o período de estiagem de 90 dias, com valores extremos menores. Variaram de 155 a 719 m³/s.

A área total da bacia compreende a 34.419 km². Esta área foi classificada em duas datas: 1986 e 2011, para verificar as alterações que podem ser observadas neste período. O resultado da classificação está apresentado nas Figuras 4a e 4b.

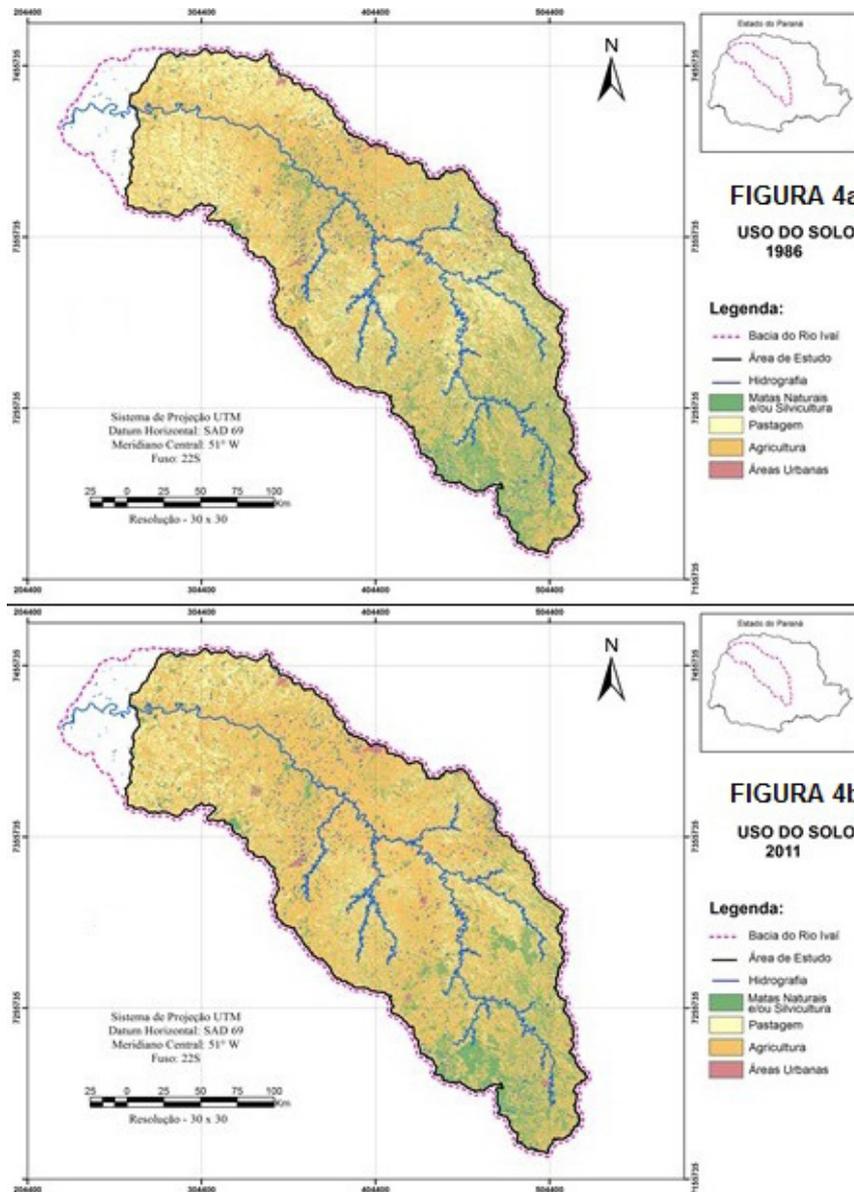


Figura 4 – Uso e ocupação do solo: (a) – 1986 e (b) – 2011.

A percentagem de área associada a cada tipo de cobertura foi calculada com base nestes mapas temáticos e é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Evolução do uso e ocupação do solo na bacia do rio Ivaí, PR

| Uso do solo | 1986 (%) | 2011 (%) | Variação |
|----------------------------------|----------|----------|----------|
| Corpos d'água | 0,5 | 0,5 | 0,0 |
| Matas Naturais e/ou Silvicultura | 17,5 | 16,3 | -1,2 |
| Pastagem | 20,4 | 12,4 | -7,9 |
| Agricultura | 61,1 | 69,7 | 8,6 |
| Áreas Urbanas | 0,5 | 1,1 | 0,5 |

Verificou-se que as ocupações mais expressivas na bacia do rio Ivaí são agricultura e pastagem que se concentram em toda a área, principalmente na parte central em direção à foz do rio principal, e após as áreas de matas naturais, que se concentram na parte superior, próxima a cabeceira.

O tipo de solo foi derivado de mapas pedológicos na escala de 1:250.000, da EMBRAPA (1984). A distribuição pedológica da área de estudo é mostrada na Figura 5.

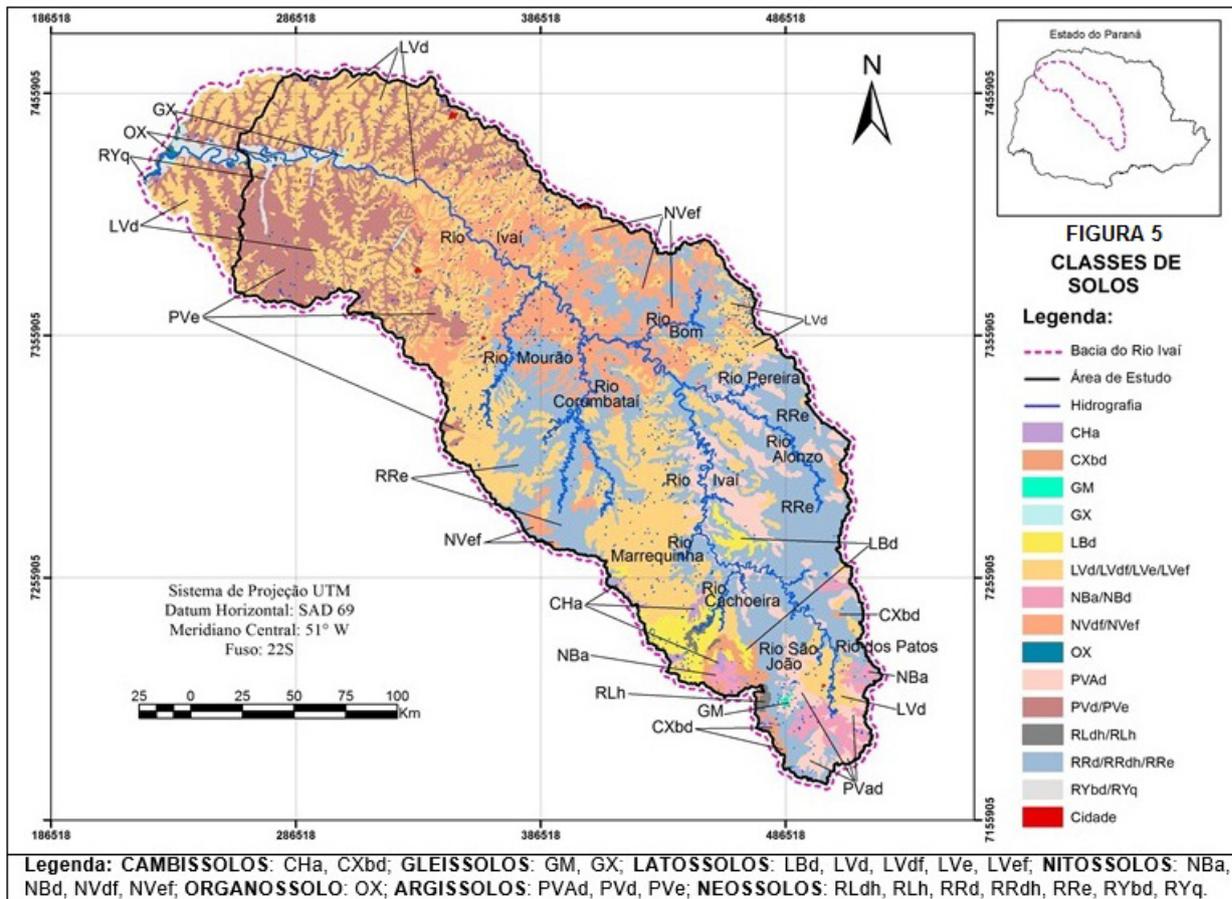


Figura 5 – Mapa de solos.

De acordo com a Figura 5 e a Figura 6, 33.56% da área de estudo é constituída por Latossolos (LBd, LVd, LVdf, LVe, LVef); 19.30% de Argissolos (PVAd, PVd, PVe); 28.21% de Neossolos (RLdh, RLh, RRd, RRdh, RRe, RYbd, RYq); 17.20% de Nitossolos (NBa, NBd, NVdf, NVef); 1.61% de Cambissolos (CHa, CXbd); e de Gleissolos (GM, GX) e Neossolos (RLdh, RLh, RRd, RRdh, RRe, RYbd, RYq) que juntos somam menos de 1%.

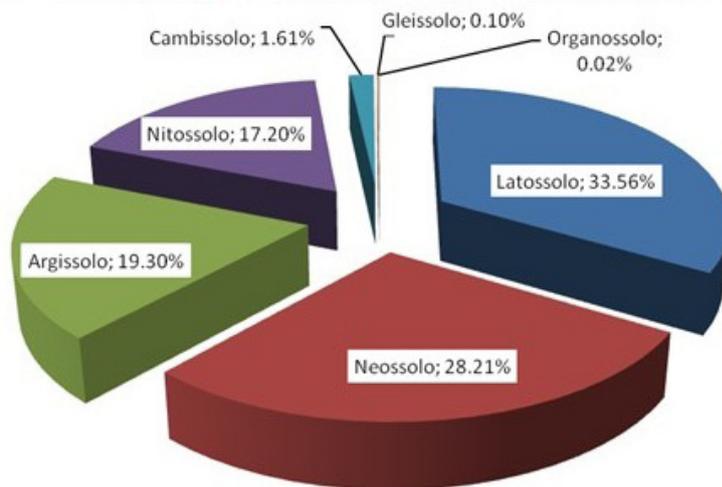


Figura 6 – Percentual das classes de solos – bacia do rio Ivaí, PR.

Estes dados permitiram determinar a distribuição espacial da classificação hidrológica dos solos, conforme mostra a Figura 7.

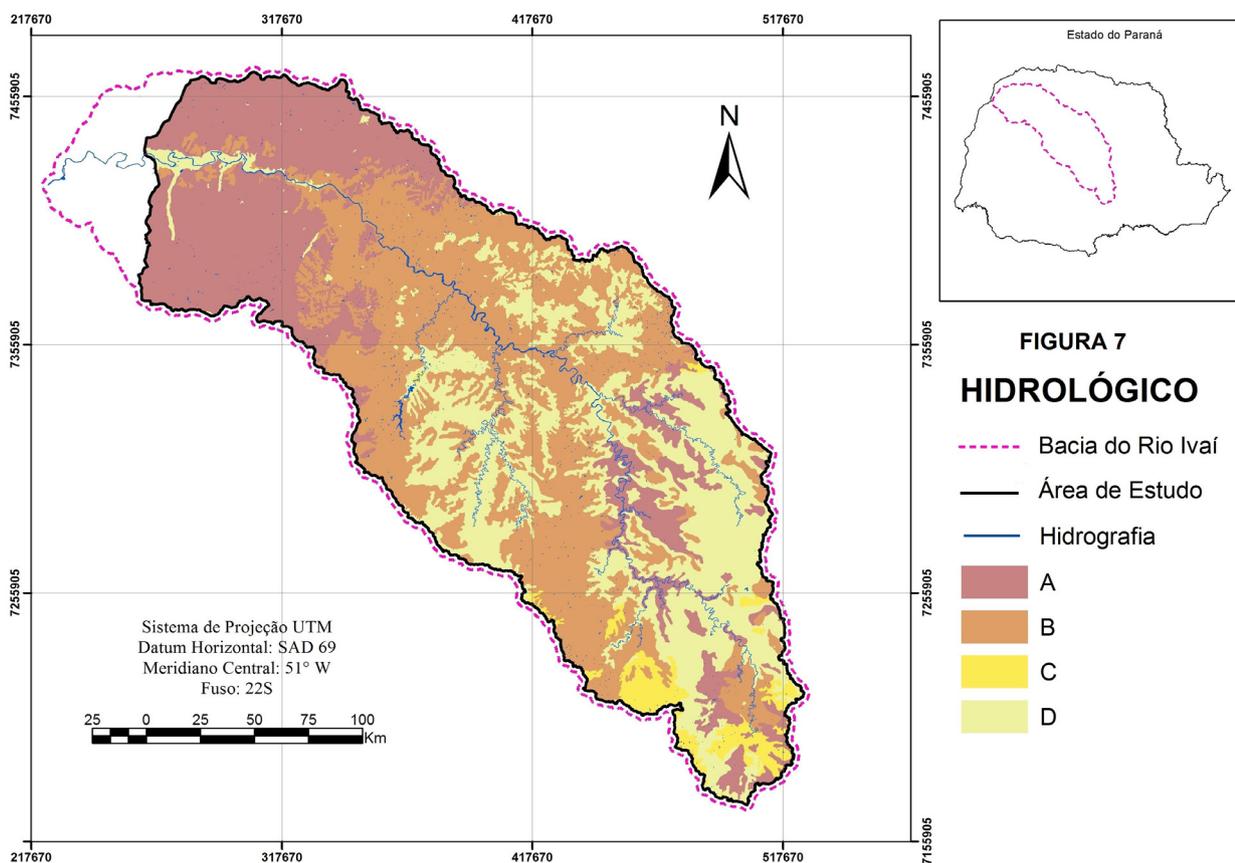


Figura 7 – Classificação hidrológica do solo.

O grupo hidrológico A abrangeu 28% da área de estudo e foi constituído por 34% de Latossolos e 66% de Argissolos, com características de solos arenosos, profundos e bem drenados; O grupo hidrológico B abrangeu 40% da área de estudo e foi constituído por 60% de Latossolos, 39% de Nitossolos e 1% de Argissolos, com características de solos arenosos com pouca argila, proporcionando melhor infiltração a escoamento superficial; o grupo hidrológico C abrangeu 3% da área de estudo e foi constituído por 48% de Cambissolos, 49% de Nitossolos e 4% de Neossolos com

características de solos mais argilosos que o grupo B, com baixa permeabilidade; o grupo hidrológico D abrangeu 28% de estudo e foi constituído por mais de 99% de Neossolos e por menos de meio por cento de Gleissolos e Organossolos, que apresentam características de solos com argilas pesadas, muito impermeáveis.

Utilizando os fatores apresentados na Tabela 1, foi possível determinar os valores do número da curva (CN) para cada pixel da imagem, e com isto obter a distribuição espacial deste parâmetro na bacia nas duas datas em questão. O resultado é mostrado na Figura 8. Tonalidades escuras estão associadas a baixos valores do parâmetro, enquanto que tonalidades claras correspondem a altos valores do CN.

Comparando as figuras das duas datas é notado que na parte norte da bacia valores baixos do CN foram substituídos por valores mais altos, refletindo a expansão da agricultura (Figura 8).

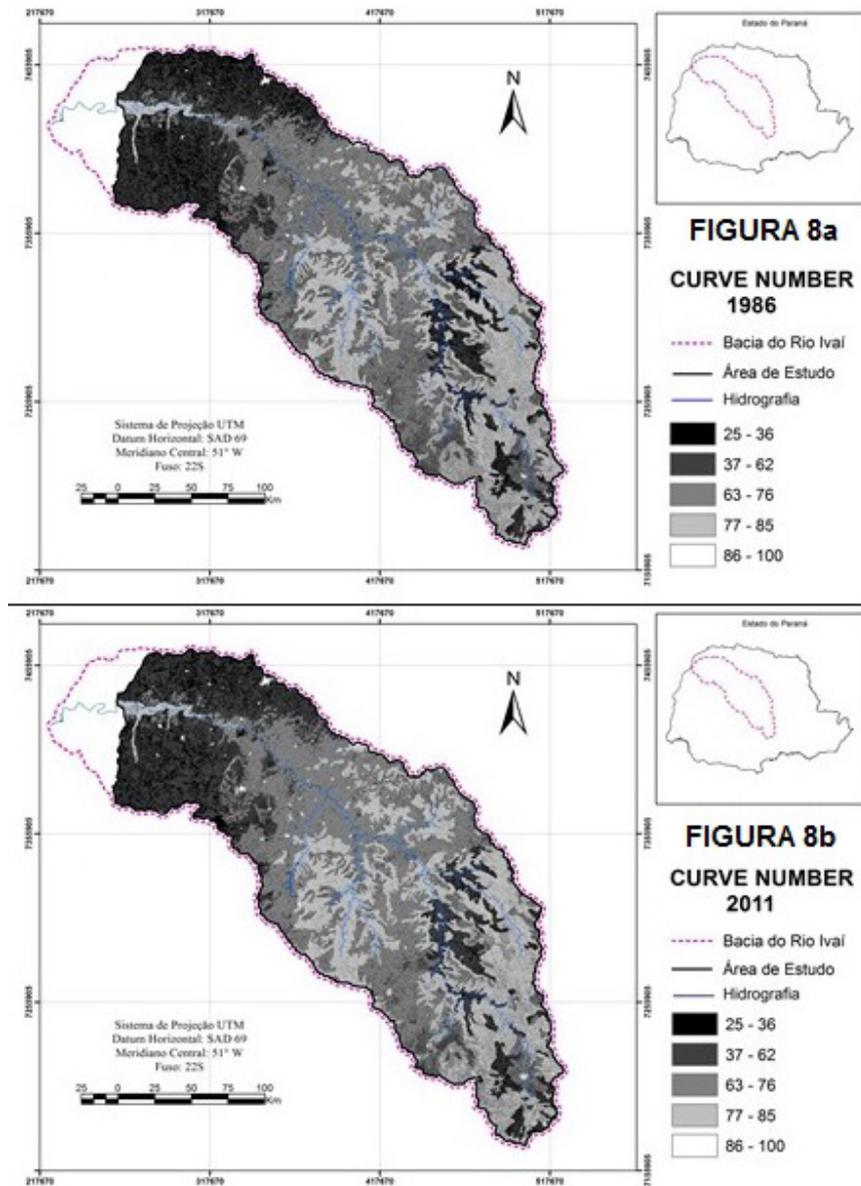


Figura 8 – Mapa de retenção máxima do solo: (a) – 1986 e (b) – 2011.

A seguir, a evolução do CN foi analisada comparando pixel a pixel os mapas temáticos mostrados na Figura 9.

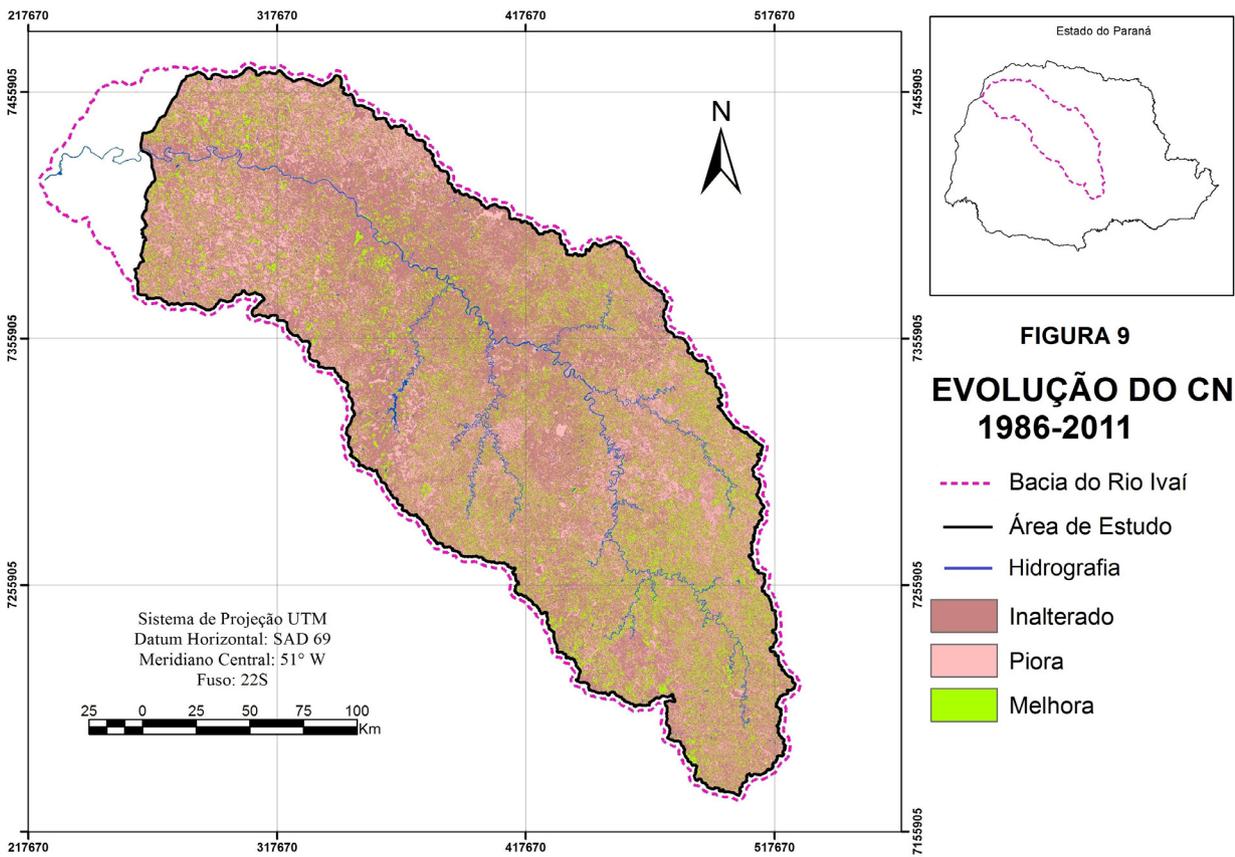


Figura 9 – Mapa de confronto do CN.

Esta análise permite verificar que grande parte da bacia permanece inalterada, ou seja, em torno de 63% da área da bacia do rio Ivaí continua com o mesmo valor de CN. É também observado que 22% dos pixels traduzem o aumento da impermeabilização e 15% a diminuição da mesma (Figura 10).

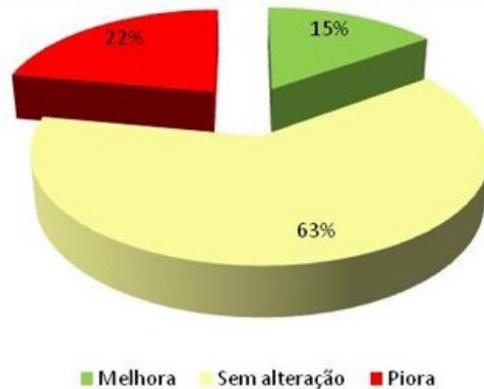


Figura 10 – Mudança de permeabilidade de 1986 a 2011.

Observou-se que a principal causa para o aumento da impermeabilização foi que a urbanização e o uso agrícola também aumentaram em 0.5% e 8.6% respectivamente, em áreas com solos frágeis e de alta concentração de argila, o que favorece o escoamento superficial a infiltração. Embora o uso com pastagem tenha diminuído em 7.9%, o espaço foi preenchido principalmente pelas áreas urbanas, resultando no aumento da curva de escoamento, ou na piora dos valores do CN.

CN MÉDIO POR SUB-BACIA

Os resultados da síntese dos parâmetros dos potenciais de retenção máxima das águas pluviais, do CN estão expressos de forma numérica na Tabela 4.

Tabela 4 – Potencial de degradação por sub-bacia – bacia do rio Ivaí

| Sub-bacia | Ano 1986 | Ano 2011 | CN médio (%) |
|-----------|-------------|-------------|--------------|
| | CN (0-100%) | CN (0-100%) | |
| 1 | 67 | 68 | 68 |
| 2 | 68 | 68 | 68 |
| 3 | 70 | 71 | 70 |
| 4 | 69 | 70 | 69 |
| 5 | 71 | 73 | 72 |
| 6 | 69 | 71 | 70 |
| 7 | 75 | 76 | 75 |
| 8 | 71 | 72 | 72 |
| 9 | 69 | 71 | 70 |
| 10 | 69 | 70 | 69 |
| 11 | 71 | 72 | 72 |
| 12 | 69 | 71 | 70 |
| 13 | 53 | 56 | 54 |
| 14 | 66 | 68 | 67 |

Como podem ser visualizadas através da Tabela 4 e Figura 11, a sub-bacia 2 foi a única que não apresentou variações nos resultados para o CN entre os anos analisados (1986 e 2011).

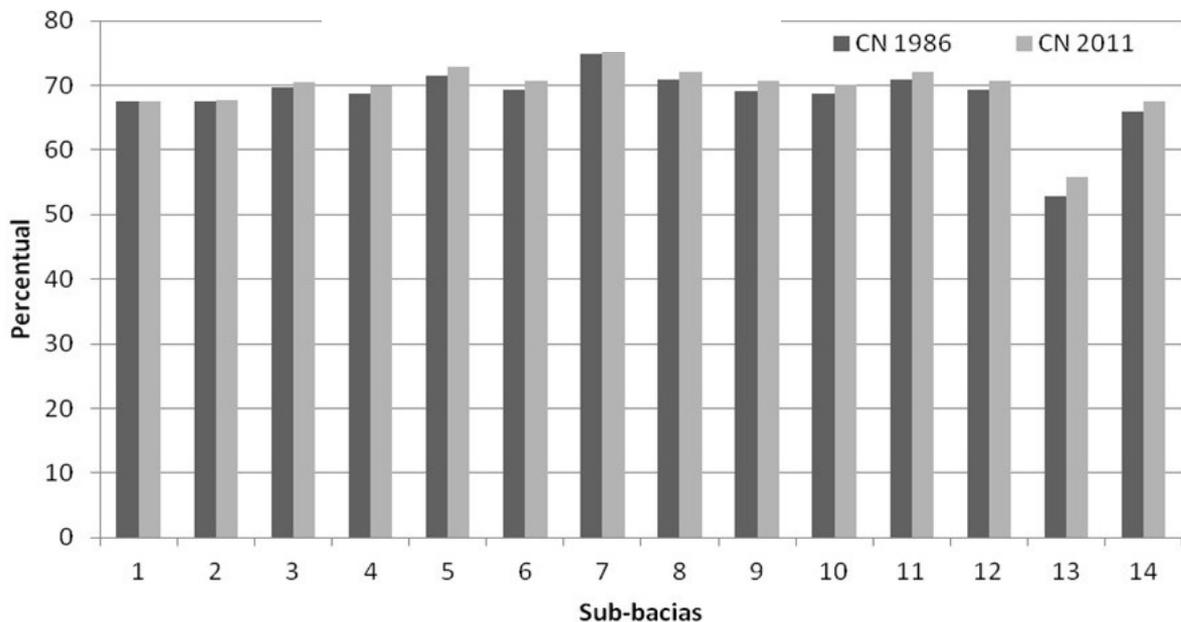


Figura 11 – Dados comparativos do CN por sub-bacia (1986 e 2011).

A sub-bacia que apresentou o menor percentual de impermeabilidade do solo foi a 13 (destaque principalmente para o ano de 1986) e as sub-bacias de maiores percentuais de CN's ou potencial de escoamento foram a 7, a 5, a 8 e a 11. De forma geral, a bacia do rio Ivaí, representada pela sub-bacia 14, apresenta potencial de escoamento de médio a alto, com percentual de 68 em 2011, apresentando piora no percentual em relação ao ano de 1986. Estes dados foram utilizados na validação do método, exposto a seguir.

ANÁLISE DE CORRELAÇÃO CANÔNICA (ACC)

Na Tabela 5 estão apresentados os dados que compõe o primeiro grupo canônico de variáveis que, ao ser relacionado pelo método estatístico multivariado, confirma o método levantamento do potencial de retenção máxima em bacias hidrográficas (segundo grupo de variáveis – CN). Assim, o grupo das variáveis dependentes são 09: vazão média – Q(TP); vazão máxima – Q(máx), as vazões mínimas (de 7, 15, 30, 60 e 90 dias), o desvio padrão (DESVPAD) e o coeficiente de variação (CV), do período médio de 1985 a 2012.

Tabela 5 – Principais parâmetros hidrológicos por sub-bacia – rio Ivaí PR.

| Sub-bacia | Q(TP) | DP | CV | Q(máx) | Q(mín7) | Q(mín15) | Q(mín30) | Q(mín60) | Q(mín90) |
|-----------|-------|-------|------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 27,7 | 26,88 | 0,92 | 291,7 | 3,6 | 4,1 | 5,0 | 6,7 | 9,3 |
| 2 | 26,6 | 24,89 | 0,86 | 286,5 | 3,7 | 4,2 | 5,1 | 6,6 | 9,3 |
| 3 | 23,1 | 21,70 | 0,26 | 332,0 | 2,9 | 3,3 | 4,1 | 5,5 | 9,1 |
| 4 | 24,4 | 20,39 | 0,10 | 245,3 | 3,9 | 4,6 | 5,4 | 6,8 | 9,0 |
| 5 | 20,9 | 18,83 | 0,35 | 335,8 | 2,4 | 2,7 | 3,3 | 4,5 | 6,7 |
| 6 | 22,5 | 18,62 | 0,07 | 244,9 | 3,9 | 4,4 | 5,1 | 6,4 | 8,5 |
| 7 | 23,4 | 22,46 | 0,29 | 447,4 | 1,8 | 2,1 | 2,7 | 3,9 | 6,4 |
| 8 | 23,4 | 19,93 | 0,04 | 272,0 | 3,7 | 4,1 | 4,8 | 6,3 | 8,4 |
| 9 | 22,0 | 9,70 | 0,28 | 149,1 | 8,7 | 9,8 | 10,9 | 12,3 | 13,3 |
| 10 | 23,1 | 10,06 | 0,51 | 89,0 | 8,2 | 9,6 | 11,2 | 13,2 | 14,6 |
| 11 | 22,6 | 16,82 | 0,03 | 206,8 | 5,1 | 5,5 | 6,2 | 7,6 | 9,6 |
| 12 | 20,2 | 14,13 | 0,02 | 152,6 | 5,6 | 6,0 | 6,6 | 7,8 | 9,5 |
| 13 | 17,4 | 5,41 | 0,39 | 76,3 | 10,8 | 11,3 | 11,8 | 12,7 | 13,3 |
| 14 | 19,6 | 12,53 | 0,02 | 107,5 | 6,7 | 7,0 | 7,6 | 8,7 | 10,1 |

Legenda: Q = Vazão; TP = Tempo de Permanência; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação; Q(máx) = Vazões Máximas Anuais (valores médios); Q(mín) = Vazões mínimas (valores médios).

Os resultados da correlação canônica aplicada ao CN podem ser visualizados na Tabela 6:

Tabela 6 – Correlações canônicas: CN relacionado à vazão – bacia do rio Ivaí

| | R canônico | R ² canônico | Qui-quadrado | GL | p-valor |
|----|------------|-------------------------|--------------|----|---------|
| CN | 0,90 | 0,81 | 15,8577 | 7 | 0,03 |

Para o CN o resultado da correlação canônica, representada pelo R canônico foi igual a 0.90 com R canônico elevado ao quadrado de 0.81, qui-quadrado (χ^2) de 15.857 e GL (graus de liberdade) igual a 7, o que é muito significativo e expressa alta correlação entre o método e as vazões, principalmente no que se refere ao coeficiente de variação com $p < 0.05$, que relaciona desvio padrão à média. Além disso, as vazões mínimas de 30, 60 e 90 dias são explicados pelo CN também com $p < 0.05$. Estes resultados confirmam a hipótese de que o CN pode ser validado pela vazão, pois de acordo com os resultados, eles não são independentes e estão altamente relacionados (AYRES et al., 2007; BOGO et al., 2010).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão fica evidente que a metodologia do CN constitui boa ferramenta para identificação de áreas frágeis e limitantes ao considerar a evolução de uso e ocupação do solo através da análise multitemporal. O principal do objetivo da análise de correlação canônica aplicada à matriz

de frequência obtida por meio do banco de dados permite associar os diversos tipos de vazão, com o método do CN, podendo assim verificar a eficiência do método. Os resultados da análise efetuada permitiram concluir que:

1. As correlações canônicas foram elevadas considerando um nível de significância igual a 5%;
2. As análises de correlação canônica permitem observar que os grupos considerados não são independentes, isto é os grupos considerados estão fortemente correlacionados;
3. Estes resultados demonstram que o método do CN reflete a realidade dos elementos físicos da paisagem e seus processos e que a atribuição de pesos numéricos para se chegar a generalizações sobre áreas estudadas são coerentes com a realidade.

O método permite contemplar variáveis importantes para a análise e gestão de elementos físicos da paisagem e seus processos, ao se trabalhar com os dados de forma conjunta, o que é extremamente necessário para se chegar a resultados completos e eficazes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H.; ANDRADE, E.; SANTOS, J.; PINHEIRO, E. Otimização do número de curva (CN-SCS) para diferentes manejos na região semiárida, Ceará, Brasil. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 264 - 279, 2012.
- AYRES, M., AYRES JR., M., AYRES, D. L., SANTOS, A. S. **BioEstat**. Versão 5.3, Sociedade Civil Mimirauá, MCT – CNPq, Belém, Pará, Brasil. 2007.
- BALDO, M.C. **Variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do rio Ivaí – PR**. Presidente Prudente, 2006. 172p. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Estadual Paulista.
- BANASIK, K.; WOODWARD, D. Empirical determination of runoff curve number for a small agricultural watershed in Poland. **2nd Joint Federal Interagency Conference**, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.
- BOGO, R. L.; GRAMANI, L. M.; NETO, A. C.; BALBO, F. A. N. Análise de correlação canônica aplicada ao fluxo de tráfego veicular – estudo de caso da rodovia federal BR-116. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional**. Vol. XXIX, p. 2071-2081. Buenos Aires, Argentina, 2010.
- CAO, H.; VERVOORT, R. W.; DABNEY, S. M. Variation in curve numbers derived from plot runoff data for New South Wales (Australia). **Hydrological Processes**, v. 25, p. 3774-3789, 2011.
- CARAMORI, P. H. Caracterização Climática. In: Instituto Agrônômico do Paraná. Potencial de Uso agrícola das áreas de várzea do Estado do Paraná: bacia hidrográfica do baixo Ivaí. **Boletim Técnico**. Londrina, n.24, v.1, p.65-69, 1989.
- DESTEFANI, E. V. **Regime hidrológico do rio Ivaí - PR**. Maringá, 2005. 93p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual de Maringá, 2005.
- EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008.
- EMBRAPA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná**. SLNCS, 1984.
- ENVI®. **Tutorials better solutions Consulting Limited Liability Company Lafayette**. Colorado, USA, 370p., 1997.
- HAWKINS, R. H. Asymptotic determination of curve numbers from data. Journal of Irrigation and Drainage Division, **American Society of Civil Engineers**, v. 119, n. 2, p. 334-345, 1993.
- IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO ESTADO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina, IAPAR, 1994. 49 p. (Documento, 18).
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro, 2013.
- JACOBS, J. H.; SRINIVASAN, R. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 60, n. 5, p. 274-279, 2005.

- MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Livraria José Olympio Edit., 1981.
- RAGAN, R.M.; T J JACKSON (1980). Runoff Synthesis Using Landsat and SCS Model, **Journal of Hydrology, Divn.**, ASCE, Vol. 106 (HYS5): 667-678.
- SANTOS. C. A. G.; VAJAPYAM. R. M. S.; SRINIVASAN, S. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semiárido da Paraíba. **Revista OKARA: Geografia em debate**, João Pessoa, v. 1, n. 1, p. 1-152, 2007.
- TEDELA, N., MCCUTCHEON, S.; RASMUSSEN, T.; TOLLNER, W. **Evaluation and Improvements of the Curve Number Method of Hydrological Analysis on Selected Forested Watersheds of Georgia**. Report submitted to Georgia Water Resources Institute. Available at [http://water.usgs.gov/wrri/07grants/progress/2007GA143B .pdf](http://water.usgs.gov/wrri/07grants/progress/2007GA143B.pdf). Accessed 01 Agosto 2013. 2008.
- TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 388–403, 2008.