

Análises de incertezas e de sensibilidade aplicadas ao Modelo Hidrológico chuva-vazão SCS – atributo *Curve Number*

Bárbara Hass Miguel ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
barbara.miguel@inpe.br

Abstract. Mitigating uncertainties in the results of dynamic models, as well as the rainfall-flow hydrologic models that estimate the effective precipitation, becomes fundamental when considering the influence of the variability of one of the input parameters of the model. The application of simulation models of environmental processes has been greatly favored by the advancement of geotechnologies, especially the Geographic Information Systems, which enable the extraction, treatment, analysis and integration of geospatial data. Based on these considerations, the objective of this study was the temporal space analysis of the precipitation occurred in the Monjolinho River Watershed, in the municipality of São Carlos-SP on October 22, 2013 registered by meteorological radar. In this study, the inference of the numerical attribute CN (Curve Number) will be considered, and uncertainty measures defined from the mean and the standard deviation will be explored. The uncertainty information is useful to evaluate the quality of the model assumed for a given attribute, in this case it is related to the values of Curve Number adopted and its influence on the final calculation of the effective rainfall for the basin. In this context, it was concluded that the type of land use and occupation of a given area has an intrinsic relationship with the change in surface flow patterns and the uncertainty of the CN attribute.

Palavras-chave: Hydrological model, floods, radar, uncertainty., modelo hidrológico, enchentes, radar, incerteza.

1. Introdução

A transformação dos centros urbanos em áreas com altas densidades populacionais apresentam efeitos negativos que são refletidos principalmente sobre o sistema de drenagem das bacias hidrográficas urbanas. A existência de áreas altamente impermeabilizadas traz como consequência o aumento do volume escoado superficialmente, causando aumento nas vazões máximas de até seis vezes a vazão de áreas com cobertura vegetal (BASTOS, 2009).

Durante as chuvas intensas, a maior parte da vazão que passa por um rio é a água da própria chuva, onde a mesma não consegue penetrar no solo impermeabilizado das cidades, formando as enchentes. Este efeito é perceptível nos hidrogramas, onde para um mesmo evento de chuva o tempo de concentração é menor e a vazão de pico é maior. Antes da urbanização e impermeabilização do solo, uma parcela deste volume era interceptada pela vegetação e infiltrava diretamente no solo (COLLISCHONN; RUTINÉLIA, 2011).

De acordo com o estudo de Espíndola et al. (2000), São Carlos, município do estado de São Paulo, é um exemplo onde a ocupação do solo foi realizada sem planejamento. Sabe-se que um dos principais problemas da Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho, bacia urbana do município, é o extravasamento de canal, que leva a enchentes em diversos pontos da cidade. O desenvolvimento e ocupação urbana da cidade têm ocorrido de maneira desigual em termos socioeconômicos, pois enquanto houve o ininterrupto adensamento populacional, renovação urbana e realização de obras públicas em áreas mais nobres, foi feita a ocupação dos morros ou áreas distantes, por setores da população de baixa ou nenhuma renda. No caso da ocupação urbana no interior da bacia do Córrego do Monjolinho, esta ocorreu através de núcleos residenciais independentes, em que a prioridade foi dada às características da paisagem urbana e às condições socioeconômicas da população, não levando em conta a bacia hidrográfica como unidade de planejamento (LORANDI et al., 2011).

Segundo Mc Cuen et al. (1984) tempo de concentração é o tempo necessário para uma gota d'água caminhar superficialmente do ponto mais distante (em percurso hidráulico) da bacia até seu exutório. Dependendo das influências que sofrem e do terreno em que ocorrem, as chuvas adquirem características que podem distingui-las de um tipo a outro, influenciando no tempo de concentração e conseqüentemente no comportamento da drenagem na bacia. Entretanto, a falta de dados consistentes sobre o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica é um dos principais problemas enfrentados durante a análise e avaliação da precipitação em bacias. Dessa forma, os modelos hidrológicos são fundamentais para o estudo de enchentes e sistema de drenagem.

A simulação hidrológica tem como princípio desenvolver modelos que representem os processos e os mecanismos hidrológicos em uma bacia. Um importante modelo usado na simulação hidrológica é o modelo que simula a transformação da chuva em vazão. Eles são utilizados para simular processos hidrológicos, principalmente, no que se refere a dinâmica dos escoamentos na seção exutória da bacia. Esses modelos permitem simular cenários futuros de uso e ocupação das bacias, o que auxilia os tomadores de decisão em suas ações no planejamento do desenvolvimento do território (FERREIRA, 2004).

O modelo chuva-vazão desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) dos Estados Unidos é muito utilizado em estudo sobre a drenagem de bacias e para isso, a classificação hidrológica do solo é muito importante. O modelo hidrológico 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 um parâmetro *Curve Number*

“CN”, que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno. O valor de *Curve Number* é adimensional e pode variar de 1 a 100, estando diretamente associado com a impermeabilidade do solo, sendo que quanto mais impermeável for a área, maior será o CN e menor será a retenção da chuva. Entretanto esses valores são tabelados e escolhidos empiricamente, podendo causar um certo erro condicionado a interpretação.

Várias soluções para o problema de modelagem de atributos espaciais, como é o caso da escolha dos valores de CN, tem sido apresentadas na literatura, porém com a deficiência principal de não apresentar medidas de incerteza das estimativas. A incerteza é uma estimativa da magnitude do erro condicionada aos conhecimentos a priori, por exemplo variabilidade espacial e amostras vizinhas, em relação ao atributo (FELGUEIRAS, 1999).

Tucci (1998) afirma que a distribuição temporal e espacial da precipitação pode incluir erros superiores a qualquer refinamento de metodologia que simule os processos físicos numa bacia hidrográfica. Porém, os radares meteorológicos permitem uma boa amostragem espacial e temporal da estimativa da taxa de precipitação (CALVETTI et al., 2003).

Mediante essas considerações, o objetivo deste estudo consistiu na análise espaço temporal da precipitação ocorrida na Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho, no município de São Carlos-SP no dia 22 de outubro de 2013 registrada por radar meteorológico. Nesse estudo, será considerado a inferência do atributo numérico CN (*Curve Number*), sendo exploradas medidas de incerteza definidas a partir da média e do desvio padrão. A informação de incerteza é útil para se avaliar a qualidade do modelo assumido para um determinado atributo, nesse caso está relacionado com os valores de *Curve Number* adotados e sua influência no resultado do cálculo final da chuva efetiva para a bacia.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Modelo Hidrológico Chuva-vazão

O objetivo de um modelo hidrológico é determinar os componentes hidrológicos de uma bacia hidrográfica, e estimar o comportamento e a magnitude da água. (MOTA, 1999). Segundo Tucci et al. (1993), a vazão máxima de uma bacia hidrográfica pode ser estimada no ajuste de uma distribuição estatística de dados de vazões existentes, na

transposição de dados de vazões de bacias vizinhas e na transformação da chuvas em vazão.

Os modelos em recursos hídricos podem ser classificados segundo vários critérios. Um dos critérios de classificação dos modelos se aplica à escala espacial em que as variáveis do mesmo são consideradas. Assim, os modelos hidrológicos podem ser divididos em concentrados ou distribuídos (Figura 1). Enquanto os modelos concentrados procuram representar grandes áreas através de variáveis supostamente homogêneas no seu interior, os modelos distribuídos dividem o espaço a modelar em pequenos compartimentos aos quais se aplicam as variáveis consideradas. Destaca-se que no interior de cada um dos pequenos compartimentos dos modelos distribuídos estas variáveis também são consideradas homogêneas.

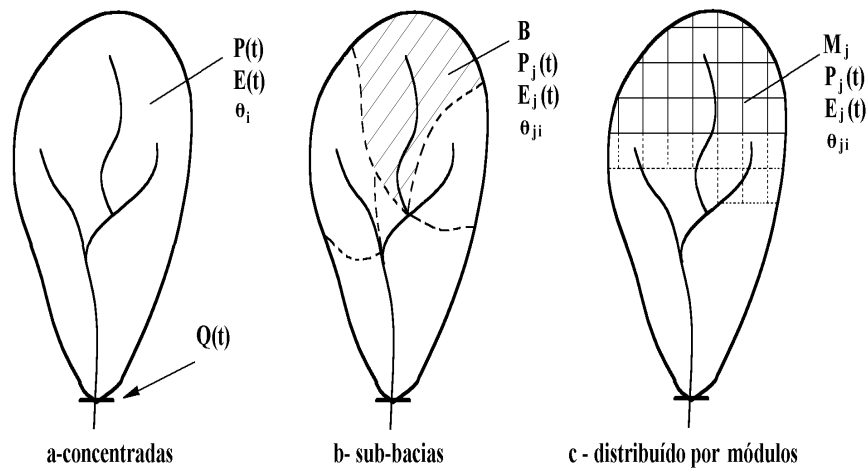


Figura 1: Tipos de Modelos Hidrológicos.

Deste modo, os modelos distribuídos podem representar melhor a diversidade de usos do solo ou campos de precipitação (MAGALHÃES, 2005). A aplicação de um modelo hidrológico concentrado apresenta a limitação de proporcionar sempre uma análise pontual, na saída da bacia, de modo a representar o comportamento de toda a área de contribuição (área sobre a qual escoar, por gravidade, toda a água precipitada até a seção do rio).

Por outro lado, um modelo distribuído é uma representação espacial na escala de células ao longo da área de contribuição. A representação espacial de processos hidrológicos se faz importante para o planejamento da bacia sob vários aspectos, dentre eles o que diz respeito à ocupação urbana, pois conhecido o comportamento do fluxo de

água da bacia, é possível identificar as áreas influenciadas por quaisquer atividades instaladas sobre a mesma (GEETHA et al., 2008).

Existem vários modelos para o cálculo de transformação chuva-vazão, por isso a escolha do modelo deve ser baseada na disponibilidade das informações que o satisfaça e que atenda aos objetivos do projeto (GRACIOSA, 2010).

2.2 Modelo Hidrológico *Soil Conservation Service* (SCS)

A técnica de *Curve Number* do Serviço de Conservação do Solo dos EUA (SCS) foi originalmente desenvolvida na década de 1950, a fim de estimar a transformação direta da precipitação em escoamento superficial (SCS, 1957). É um método simples e utilizado largamente por muitos anos nos EUA e no Brasil (MAGALHÃES, 2005).

O modelo hidrológico 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 um parâmetro *Curve Number* “CN”, que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno.

Segundo Arnold e Williams (1995), o modelo SCS apresenta algumas vantagens: é consistente; computacionalmente eficiente; os dados de entrada necessários são geralmente disponíveis; relaciona o escoamento superficial com o tipo, o uso e a cobertura do solo.

2.2.2 Valores de *Curve Number* do SCS

O primeiro cálculo a ser efetuado é o fator de retenção S da bacia, que representa a maior diferença possível entre a chuva e o escoamento superficial quando a precipitação tende ao infinito (WOODWARD et al., 2003). O fator S representa o potencial máximo de retenção após o início do escoamento. O fator de retenção é calculado em mm como:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (\text{eq. 1})$$

onde, CN é um valor de Curva Número tabelado.

De acordo com Sartori (2004), a classificação proposta por Lombardi et al., (1989) leva em consideração a profundidade, a textura, o gradiente textural, a porosidade dos solos e a atividade da argila. Sendo assim, nesse estudo, utiliza-se a classificação estendida da proposta de Lombardi et al., (1989), elaborada por Sartori et al., (2005) segundo a tabela a seguir:

Tabela 1: Classificação dos grupos hidrológicos e suas características.

Grupos hidrológicos e suas características	
A	Solos arenosos, profundos e bem drenados
B	Solos arenosos com pouca argila e solo orgânico.
C	Solos mais argilosos que aqueles do grupo B, com baixa permeabilidade.
D	Solos com argilas pesadas, muito impermeáveis.

A aplicação do *Curve Number* leva em conta a condição média de umidade antecedente do solo, chamada de AMC (*Antecedent Moisture Condition*). Esta condição considera os eventos chuvosos ocorridos nos cinco dias anteriores ao dia analisado. São três as condições AMC consideradas:

AMC 1 – Situação em que os solos estão secos. Tucci (2002) sugere que para a superfície atingir esta condição, a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores deve ser menor que 36 mm;

AMC 2 – Situação média em que os solos correspondem à umidade de capacidade de campo;

AMC 3 – Situação em que ocorreram precipitações consideráveis nos últimos cinco dias e o solo encontra-se saturado. Nesta condição, a precipitação acumulada nos cinco dias anteriores deve ser maior que 53 mm, segundo Tucci (2002).

Na definição dos grupos hidrológicos do solo apresentado pelo (SCS), o maior destaque está na textura do solo, entretanto, o solo no estado de São Paulo é argiloso em grande parte, proporcionando uma boa drenagem de água.

Os valores de CN encontrados nas tabelas do SCS correspondem ao valor para a situação média, AMC 2 (CN₂). As correções para as situações 1 (CN₁) e 3 (CN₃) são calculadas em função do valor de CN₂ por (ARNOLD e WILLIAMS, 1995):

$$CN1 = CN2 - \frac{20(100 - CN2)}{100 - CN2 + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN2)]} \quad (\text{eq. 2})$$

$$CN3 = CN2 \exp[0,00673(100 - CN2)] \quad (\text{eq. 3})$$

Os valores tabelados de CN_2 são estabelecidos para uma bacia com declividade média de 5%. Arnold e Williams (1995) propõem um ajuste deste valor para outras declividades por meio da equação:

$$CN_{2s} = \frac{1}{3}(CN3 - CN2) [1 - 2 \exp(-13,86Dec)] + CN2 \quad (\text{eq. 4})$$

onde, Dec é a declividade média da bacia.

Após o cálculo de CN_{2s} , as correções de CN_1 e CN_3 pelas equações (3) e (4) devem ser feitas substituindo-se o valor de CN_2 por CN_{2s} .

2.2.3 Chuva Efetiva

Definidos e corrigidos os valores de Curva Número para as três condições AMC, calcula-se o fator de retenção S. De posse de S, a porção de chuva transformada em escoamento superficial é definida pela relação:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (\text{eq. 5})$$

onde,

Q = Volume de escoamento

P = Precipitação (radar, mm/h)

S = Retenção máxima pelo solo

Os cálculos permitem encontrar os valores para o volume de escoamento em função da capacidade de retenção do solo. As perdas iniciais por retenção na bacia apresentam 20% do valor total do armazenamento potencial no solo. Portanto a condição " $P \geq 0.2S$ " se deve ao fato de que o escoamento superficial somente tem valor significativo se a precipitação (P) for maior que as perdas iniciais de 20% (DECINA, 2012).

2.3 Uso de dados de radar meteorológico

O radar meteorológico é um dos poucos instrumentos capazes de prover informações complexas e detalhadas sobre a distribuição espacial e temporal das precipitações. Deve-

se estimar as taxas de precipitação e sua distribuição mediante a relação entre Z (refletividade) e R (taxa de precipitação) do radar.

Para uma chuva caracterizada por precipitação contínua, adota-se a relação empírica entre Z e R em uma mesma fórmula geral dada por:

$$Z = aR^b \quad (\text{eq. 6})$$

onde Z, em mm^6/m^3 ou em decibéis (dBZ) e R, em mm/h, a e b são constantes estimadas que dependem da origem, tipo de precipitações, tamanho das gotas, localização geográfica, condições meteorológicas, entre outros.

Nesse trabalho, utilizamos a relação mais conhecida e amplamente usada pelos pesquisadores, que é a relação Z-R de Marshall e Palmer (1948). Marshall e Palmer encontraram empiricamente os valores de 200 e 1,6 para os parâmetros a e b, respectivamente conforme a equação abaixo:

$$Z = 200R^{1,6} \quad (\text{eq. 7})$$

Para os estudos hidrometeorológicos, faz-se necessário obter mapas horizontais de precipitação, que representem os valores de refletividade de radar ou intensidade de chuva média em um determinado elemento de área (pixel). Em geral, os pixels utilizados são quadrados (neste caso, 1km de lado), os quais fazem parte de um sistema de malha cartesiano.

Um radar está calibrado, do ponto de vista meteorológico, se existe uma relação ZR que permite avaliar com certo grau de precisão, a chuva média que precipita sobre determinada área da bacia hidrográfica. A calibração meteorológica de um radar é uma tarefa árdua. Por melhor que seja a relação determinada com base em um posto pluviométrico, à medida que se caminha no sentido do afastamento deste posto, a precisão da relação ZR diminui (LOU, 2004).

2.4 Medidas de incerteza e análise de sensibilidade

Atualmente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) vem sendo, cada vez mais, utilizados para modelagem de fenômenos sócio-econômicos-ambientais, simples ou complexos, que envolvem uma ou diversas variáveis relacionadas à geografia terrestre. Variáveis numéricas, representando atributos contínuos, e variáveis temáticas, representando atributos categóricos, podem ser utilizadas nesses modelos. Modelos de erosão, de fluxo hídrico e de previsão de safras são exemplos típicos de análises complexas realizadas em um SIG. As variáveis espaciais desses modelos matemáticos

precisam ser representadas computacionalmente de forma a facilitar a utilização do SIG como ferramenta eficiente para análises.

A modelagem de atributos espaciais consiste na obtenção de modelos computacionais, matemáticos ou numéricos, que representam a variabilidade do atributo dentro de uma região de interesse. Assim, para um determinado atributo, constroem-se representações computacionais individuais que serão posteriormente utilizadas nas análises realizadas no ambiente do SIG.

A informação de incerteza se propaga para produtos de análises, que envolvem diversas variáveis, qualificando os produtos gerados no ambiente do SIG. Essa incerteza quantifica o risco assumido em tomadas de decisões apoiadas nesses produtos. Heuvelink (1998), apresenta várias metodologias que podem ser utilizadas em propagação de incertezas para atributos numéricos. Procedimentos geoestatísticos consideram o valor do atributo, em uma posição qualquer do espaço, como uma variável aleatória.

O conjunto de valores do atributo na região de interesse é considerado um campo aleatório. Esses procedimentos possibilitam a predição, ou inferência, do valor do atributo, em uma posição qualquer, utilizando-se um conjunto amostral pontual local e informação da variabilidade espacial do atributo na região.

A análise de sensibilidade consiste em perturbar um determinado modelo, variando um de seus parâmetros de entrada, e identificando a variação ocorrida nos resultados de interesse. Esse processo geralmente requer um elevado número de simulações. Por exemplo, na análise de sensibilidade sobre 10 parâmetros de entrada, se cada um deles tiver 2 valores simulados, a combinação entre eles irá gerar 210 casos, ou seja, 1.024 simulações.

MacDonald (2002) apresenta uma revisão de métodos para avaliação de incertezas, identificando as principais fontes dessas imprecisões e seus impactos na simulação energética. Também são apresentadas as distribuições de probabilidades aplicáveis a algumas fontes de incertezas. Após implementar quatro métodos de análise em uma ferramenta de simulação energética, MacDonald (2002) destaca que esse tipo de estudo “permite o uso efetivo da simulação nos estágios iniciais de projeto”. A análise de incertezas também informa à equipe de projeto quais variáveis merecem maior atenção em termos de conforto térmico e consumo de energia. A quantificação dessas incertezas pode ser utilizada para guiar futuras pesquisas, principalmente na etapa de calibração do modelo, orientando o analista a efetuar medições sobre os parâmetros mais influentes no desempenho da edificação. As incertezas típicas para algumas variáveis poderiam ser

definidas em uma base de dados para serem aplicadas a cada item, à medida que este fosse definido na interface do programa.

3. Materiais e Métodos

O presente trabalho foi realizado em três etapas:

- Caracterização da área de estudo e delimitação da bacia;
- Banco de Dados;
 - Radar
 - Mapas Temáticos
 - Análise do Comportamento da precipitação
- Medidas de Incerteza

A seguir são descritos os detalhes de cada etapa.

3.1 Caracterização da Área de estudo e delimitação da bacia

O município de São Carlos localiza-se na região centro-norte do estado de São Paulo, a aproximadamente 240 km da capital, e tem seu território inserido em duas bacias hidrográficas principais: Mogi-Guaçu e Tietê-Jacaré. A parte urbanizada está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 13 - Tietê-Jacaré, onde se encontram as sub-bacias do Monjolinho, do Feijão e do Jacaré Guaçu.

O presente trabalho tem como área de estudo a Bacia do Rio Monjolinho (Figura 2), compreendendo uma área total de aproximadamente 71,3 Km². Essa bacia tem como característica principal a sua localização sobre a área urbana do município de São Carlos e todos os impactos ambientais decorridos dessa urbanização (ESPÍNDOLA et al., 2000).

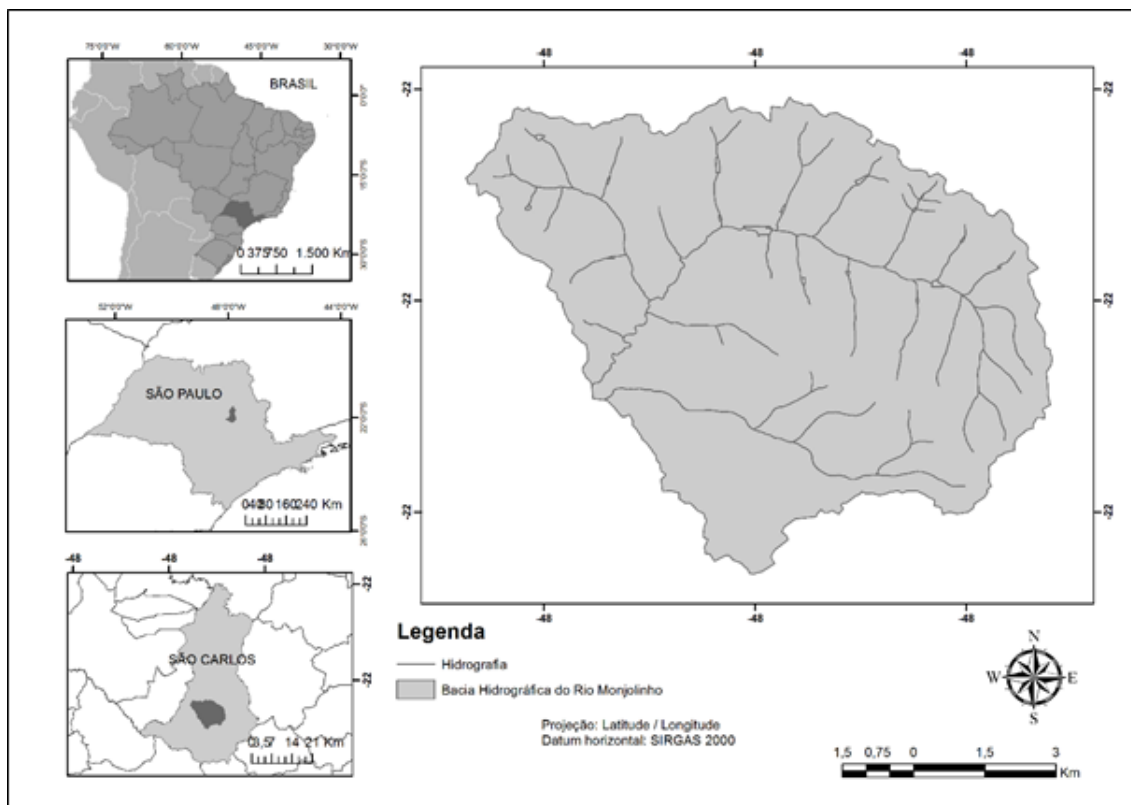


Figura 2: Mapa da localização da área de estudo.

O clima da região estudada é classificado, de acordo com o sistema de Köppen, como sendo do tipo Cwa, isto é, mesotérmico subtropical úmido de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C. Do ponto de vista de balanço hídrico, apresenta uma nítida distinção entre a estação seca (maio a setembro), com deficiência hídrica, e a estação chuvosa (outubro a abril).

Segundo dados do IBGE (2010), a cidade de São Carlos apresenta população de aproximadamente 222 mil habitantes, sendo que 95% da população residem na área urbana, que corresponde a somente 6% do total da área do município.

A parte superior da Bacia Hidrográfica do Monjolinho enquadra-se sobre a área urbana de São Carlos, estando, portanto, sujeita a uma ocupação antrópica intensa. A parte da bacia situada na margem direita do Córrego do Monjolinho se encontra relativamente protegida, sendo ocupada pela Universidade Federal de São Carlos, Parque Ecológico Municipal e Fazenda Canchim (EMBRAPA). Já a parte da margem esquerda está sujeita ao processo de urbanização sem o devido planejamento, com a implantação de loteamentos e indústrias, principalmente na área de influência da Rodovia Washington Luís, que corta parte dessa bacia. O rio Monjolinho tem uma extensão de 43,25 km, nascendo na região leste do município e percorrendo o sentido Leste-Oeste. Possui 40

afluentes, 19 pela margem direita e 21 pela margem esquerda. Na área urbana, o rio é canalizado e recebe diversos afluentes, como, por exemplo, o córrego Santa Maria do Leme, Tijuco Preto e Gregório. Após percorrer o centro urbano da cidade de São Carlos, o rio Monjolinho retorna ao seu leito natural, adquirindo um aspecto de rio encachoeirado e desembocando no rio Jacaré-Guaçu (ESPÍNDOLA et al., 2000).

Para o adequado funcionamento do modelo hidrológico, foi necessário que a delimitação da Bacia do Rio Monjolinho fosse gerada a partir do ponto de saída (pour point) ou exutório, obtendo assim o divisor de águas.

3.2 Banco de dados

3.2.1 Radar

A precipitação usada como entrada no modelo hidrológico do presente trabalho refere-se a uma precipitação real ocorrida no dia no dia 22 de outubro de 2013 das 15:38h às 18:08h sobre a bacia do rio Monjolinho. O evento repercutiu em altos picos de vazão pela bacia, provocando enchentes. As informações usadas nesse modelo foram extraídas do radar meteorológico do IPMet (Instituto de Pesquisas Meteorológicas) de Bauru-SP, a fim de se obter a melhor espacialização da chuva na bacia.

Segundo Antonio et al. (1996), o sistema de radar Doppler do IPMet, modelo EEC DWR-88S, banda S, amostra as precipitações num raio limite de 240 km de alcance, executando um ciclo de varredura de 360°, com a elevação da antena sendo mantida no horizonte (zero graus). Normalmente, essa amostragem ocorre a cada 15 minutos, podendo reduzir este intervalo até 7,5 minutos quando há ocorrência de fortes tempestades. O radar meteorológico de Bauru localiza-se nas coordenadas de 22° 21' 36'' de latitude sul e 49° 01' 48'' de longitude oeste, instalado a uma altitude de 624 m. O município de São Carlos está localizado a uma distância de aproximadamente 125 km do radar de Bauru em linha reta (Figura 3), estando portanto na área de varredura do radar.

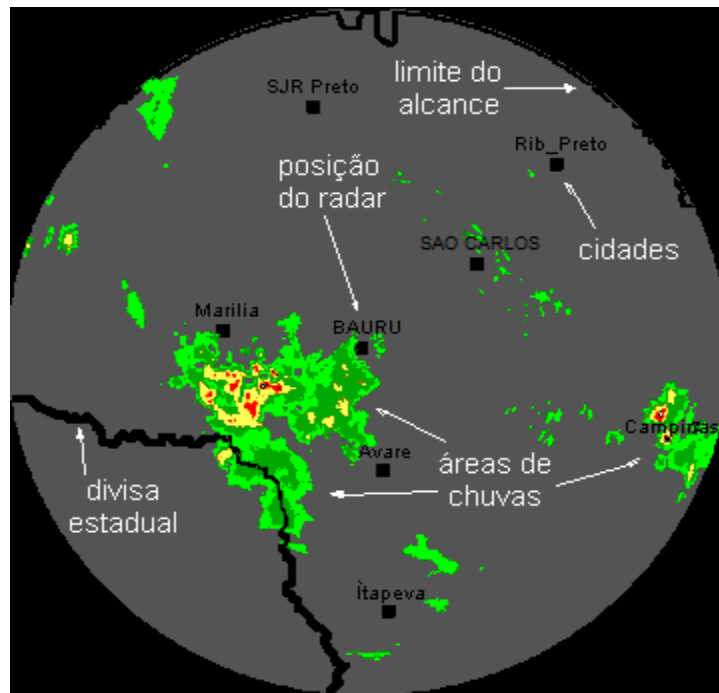


Figura 3: Exemplo de um produto CAPPI do radar de Bauru, incluindo a localização da cidade de São Carlos. (Fonte: IPMet)

O sistema de radar Doppler de Bauru utiliza, para a análise da estrutura horizontal da chuva, o produto denominado CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*). O CAPPI é um produto que disponibiliza ao usuário o campo de precipitação em um plano de altitude constante. Para a composição de um CAPPI, programa-se a antena do radar para dar uma volta completa (360°) e mudar sua elevação em relação ao horizonte. Com isso consegue-se "varrer" completamente a atmosfera, do solo até o topo das nuvens. De cada elevação é extraído um anel de informações cuja altura média corresponde a um valor pré-estabelecido (nesse estudo, CAPPI 3,5km). As informações foram processadas nos softwares MatLab[®] e ArcGIS[®], nesse estudo os pixels são de 30 metros. Os dados do radar inicialmente estavam em WGS84 e posteriormente foram projetados para o Datum SIRGAS 2000, projeção UTM 23 sul, assim como todos os mapas usados nesse trabalho.

3.2.2 Mapas temáticos

O mapa de Pedologia foi elaborado com a carta pedológica da Quadrícula de São Carlos (SF-23-Y-A-I) a partir do Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo (1:100.000). Para compor o mapa CN, foi definido o tipo de solo baseado nos critérios de classificação dos grupos hidrológicos para o modelo.

O mapa temático de uso e ocupação do solo foi elaborado por meio de classificação manual em tela a partir de imagens do satélite Landsat 8 do dia 16 de outubro de 2013. Foi usada a técnica da interpretação visual para a identificação dos tipos de uso do solo. Além desses mapas, foram elaborados mapas de Declividade e Classes Hipsométricas por meio da utilização do Modelo Digital de Elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de 30 metros de resolução espacial. Estes dados são disponibilizados pelo serviço geológico americano (USGS) gratuitamente, sendo necessário apenas o cadastramento no site. Os *softwares* ArcGIS® 10.2.2 e Spring 5.4.2 foram utilizados para elaboração dos mapas e cruzamento dos dados.

3.2.3 Análise do Comportamento da precipitação

A análise do comportamento da precipitação foi realizada através da escolha de 7 pontos aleatórios distribuídos pela bacia do Monjolinho. Em cada ponto foi registrado a precipitação no instante da varredura do radar. Para o evento foram registrados a precipitação de 21 instantes com intervalos de 7,5 minutos cada, dando um total de 2 horas e 38 minutos de precipitação e acumulado de aproximadamente 50 mm. Com esses dados, foi possível analisar os locais em que ocorreram os maiores picos de precipitação.

3.2.4 Aplicação do Modelo SCS

O Modelo do SCS é um modelo empírico que permite estimar o volume e a distribuição do escoamento superficial. O mapa de solo é um dos dados de entrada do modelo e, juntamente com o mapa de uso e ocupação, é feita a classificação do CN. Quanto maior o valor de CN, menor a capacidade de infiltração do solo, e conseqüentemente, maior será o escoamento superficial e a transformação chuva-vazão.

Durante o processamento do modelo hidrológico SCS ocorre a sobreposição de matrizes (*raster*), que pode influenciar na resolução dos pixels das imagens devido a diferença das fontes de dados. Por esse motivo, é necessário que no início haja o ajuste dos pixels dessas matrizes para que apresentem a mesma resolução espacial. O mapa de solo é um dos dados de entrada do modelo, pois juntamente com o mapa de uso e ocupação (cobertura do solo), é feita a classificação do CN (*Curve Number*).

Os valores de CN foram escolhidos de acordo com a tabela disponível em Bielenki e Barbassa (2012). Foram gerados 100 combinações aleatórias de intervalos valores de CN, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2: Valores inferidos de CN para cada tipo de solo classificado e seu respectivo grupo hidrológico. Fonte: adaptado de Bielenki e Barbassa (2012).

Tipo de cobertura do solo	Grupo A	Grupo B	Grupo C
Pastagem	46-54	67- 69	
Infraestrutura Urbana	81-92	91-95	
Natural	32-36	55-60	68-73
Corpos Hídricos	93-98	98	98
Agricultura	56-61	65-70	
Solo Exposto	69-74	78-83	

As perdas iniciais por infiltração são assumidas em 20% do valor total do armazenamento potencial no solo. O modelo hidrológico em estudo faz o cálculo da chuva efetiva, a partir da equação:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad P \geq 0.2S$$

O dado de precipitação inserido nessa equação foi o acumulado pelo radar meteorológico do IPMet.

3.3 Medidas de incerteza

Uma das maneiras de melhorar os resultados de um experimento, é repeti-lo e recolher mais dados. Para esse estudo, foram realizadas 100 repetições de valores aleatórios para CN. Suponha que tenhamos uma sequência de n medidas, Q_1, Q_2, \dots, Q_n , de uma mesma quantidade. Assumindo que só tenhamos erros de origem aleatória, o valor que se aproxima mais do valor real do mensurando, ou o melhor valor, é

$$Q_{\text{méd}} = \frac{\sum Q_i}{n},$$

Esta quantidade é conhecida é a média amostral. Também podemos medir a dispersão dos resultados ao redor da média. É comum se utilizar o parâmetro chamado de variância amostral.

$$Q_{\text{desvpad}} = \sqrt{\frac{\sum Q_i^2 - \frac{(\sum Q_i)^2}{n}}{n-1}}$$

Entretanto, utiliza-se o desvio padrão para representar o quão dispersas estão as medidas. Por isso, a incerteza da medida sempre estará relacionada ao desvio padrão. Por isso, foram gerados mapas de incerteza da média da chuva efetiva e do desvio padrão (incerteza) acerca da sensibilidade do modelo hidrológico a partir da variação de um de seus parâmetros, nesse caso de CN.

4. Resultados e discussões

4.1 Análise do Comportamento da precipitação

Na Figura 4 estão representados os 7 pontos escolhidos aleatoriamente sobre a bacia do Rio Monjolinho. Para cada ponto foi calculado a taxa de precipitação (mm/h) em cada instante de tempo (tempo de varredura do radar = 7,5 minutos) da precipitação registrada pelo radar. Ao todo foram 21 intervalos de tempo de 7,5 minutos cada, chegando ao total de aproximadamente 2:38 horas de duração.

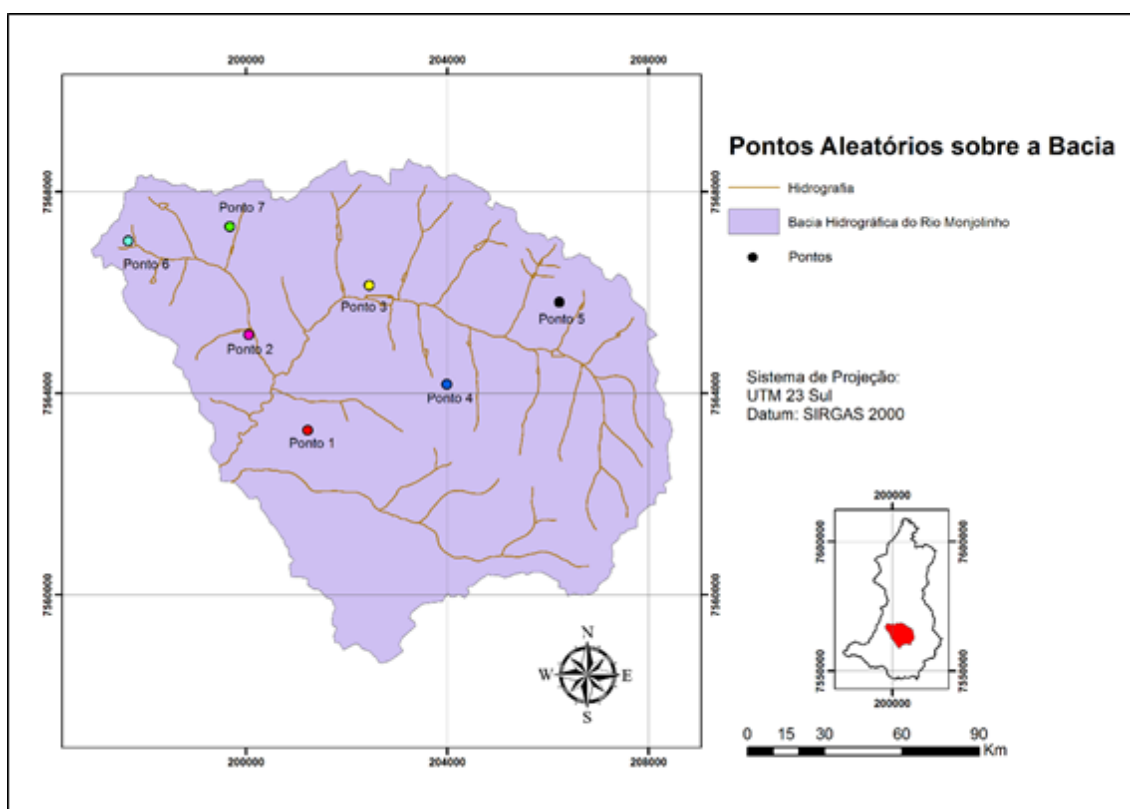


Figura 4: Mapa dos pontos aleatórios distribuídos pela bacia para a análise do comportamento da precipitação.

Pode observar no gráfico do comportamento da precipitação do dia 22 de outubro (Figura 5), que a precipitação manteve-se constante por toda a área de estudo no intervalo analisado. Nota-se que a taxa de precipitação obedeceu uma certa regularidade em relação ao início da intensa precipitação, começando a partir do instante 15:53 em todos os pontos. Além disso, os picos altos permaneceram durante grande parte do evento, sendo que em alguns pontos, apresentando valores acima de 10mm/h. Os pontos 4 e 5 apresentaram um maior retardo na segunda metade do gráfico, indicando valores superiores de taxa de precipitação do que os demais pontos. Esses dois pontos ficam à jusante do Rio Monjolinho, próximos a córregos afluentes do rio principal. Podemos dizer que nesses dois pontos a precipitação foi mais intensa, contribuindo para maiores picos de vazão e conseqüentemente na intensidade das enchentes.

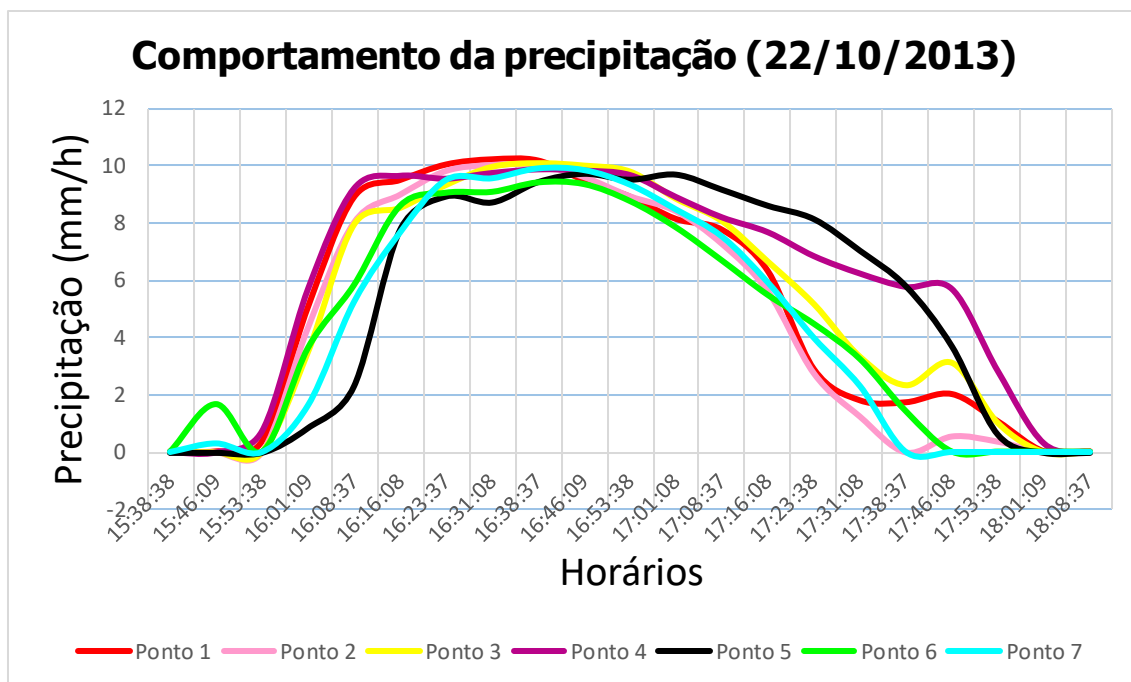


Figura 5: Gráfico do comportamento da precipitação no dia 22 de outubro de 2013.

4.2 Análise dos mapas gerados

O mapa de declividade para a Bacia do Rio Monjolinho (Figura 6) apresenta valores baixos e medianos. De acordo com a classificação do índice de fragilidade ambiental de ROSS (1994), a maior parte da área da Bacia apresenta fragilidade ambiental muito baixa (0 – 2%), baixa (2% - 6%) e média (6% - 12%) em sua maior parte, podendo ser considerada uma bacia plana e suscetível a ocupação urbana (bacia caracterizada pela área urbana do município de São Carlos). A declividade está relacionada com a velocidade de escoamento e essa relação ocorre de maneira inversamente proporcional ao

tempo de concentração. Declividades menos acentuadas tendem a proporcionar uma diminuição na velocidade do fluxo hidrológico, e como consequência o tempo de concentração da bacia aumenta em sua totalidade.

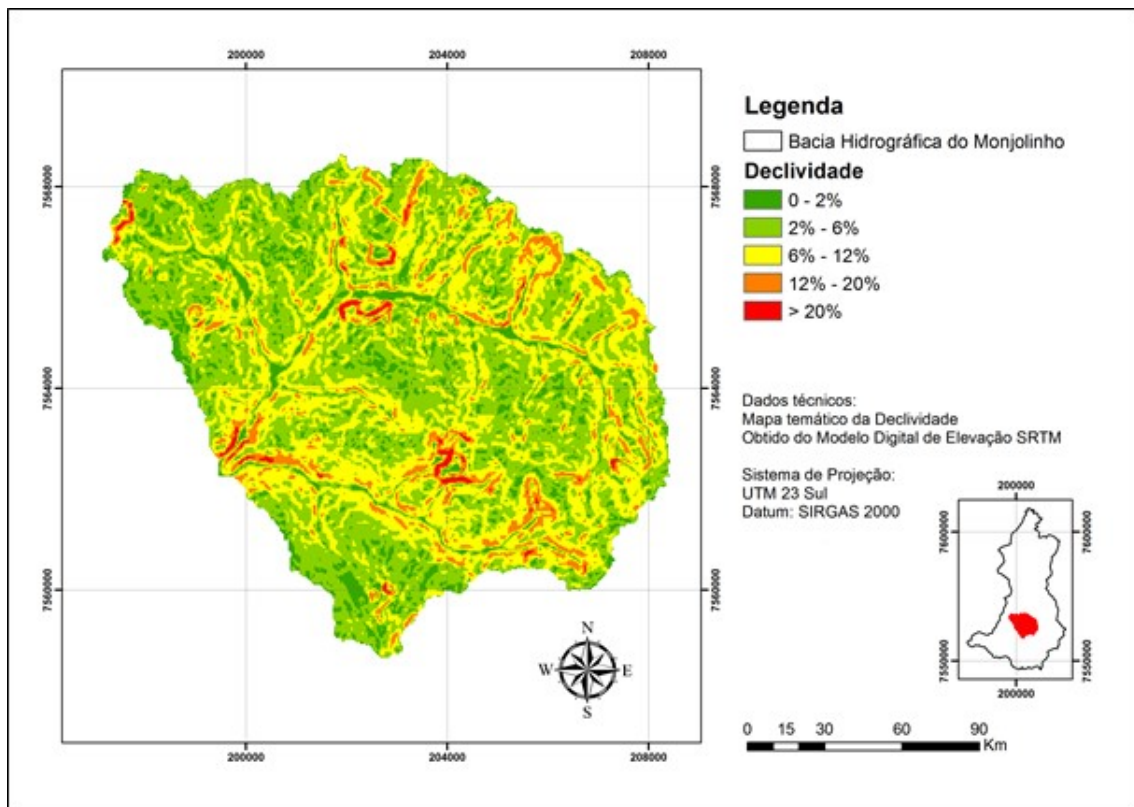


Figura 6: Mapa da Declividade da área de estudo.

O mapa temático de pedologia (Figura 7) apresenta os tipos de solo e grupos hidrológicos que compõem a bacia: grupo hidrológico A (60,85%), grupo B (39,03%) e grupo C (0,12%), conforme proposto por Sartori et al., 2005.

De acordo com os resultados da pedologia, a maior parte da bacia apresenta solos arenosos, profundos e bem drenados- Solo Latossolo Vermelho-Amarelo Argiloso, pertencente ao grupo hidrológico A.

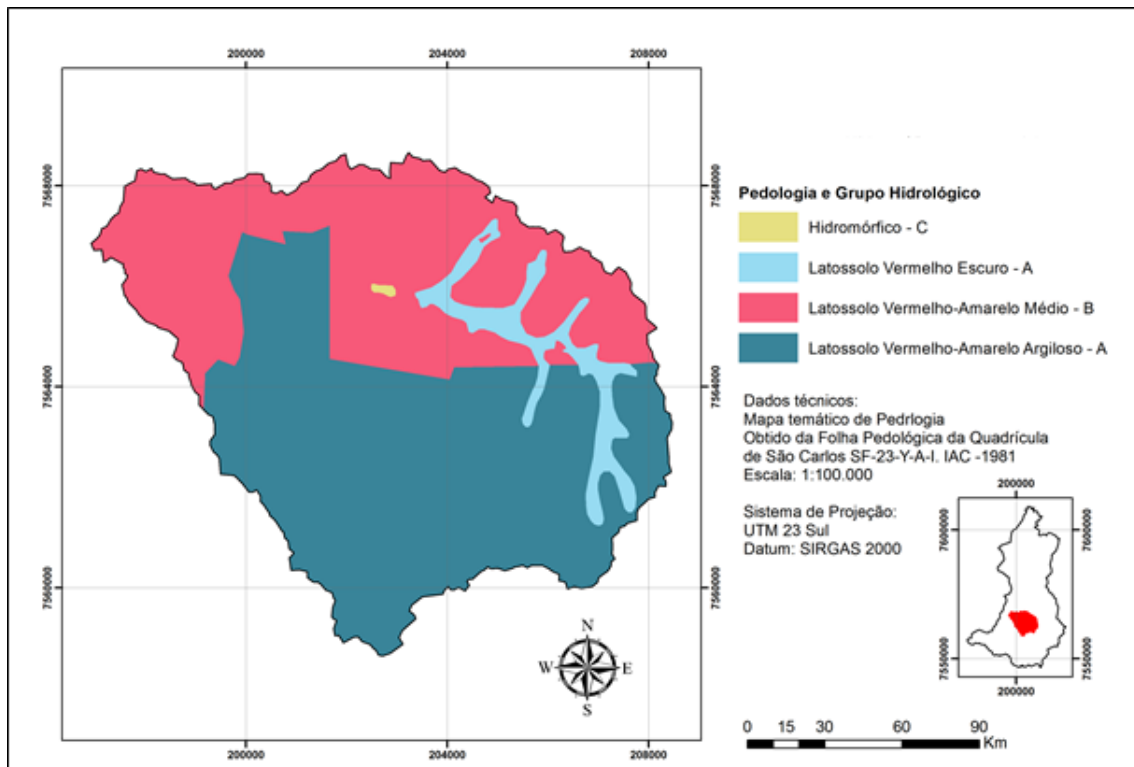


Figura 7: Mapa da Pedologia e Grupo Hidrológico da área de estudo.

O tipo de uso e ocupação/cobertura do solo (Figura 8) é uma das principais entradas para o modelo hidrológico SCS. Nesse estudo, foram classificados seis diferentes tipos de uso do solo, através do uso de imagem do satélite Landsat 8 de outubro de 2013, os quais apresentaram as seguintes porcentagens em relação a área total: agricultura (8,24%), corpo hídrico (0,30%), infraestrutura urbana (43,15%), pastagem (18,94%), solo exposto (10,85%) e vegetação natural (18,52%). A infraestrutura urbana é o tipo de uso do solo que a maior porcentagem de área na bacia, sendo um indicador de que a impermeabilização do solo deva influenciar no volume de escoamento superficial e na sua velocidade de fluxo hidrológico.

Se compararmos as Figuras 7 e 8, observamos que a área urbana do município de São Carlos encontra-se a sua maior parte situada sobre o Latossolo Vermelho-Amarelo Argiloso, pertencente ao grupo hidrológico A, ou seja, é o solo melhor drenado dos 4 grupos. Contudo, devido a impermeabilização do mesmo por pavimentação e construções urbanas, o escoamento superficial e a transformação da chuva-vazão são altas, havendo pouca infiltração, agravando as enchentes quando ocorrem intensos temporais.

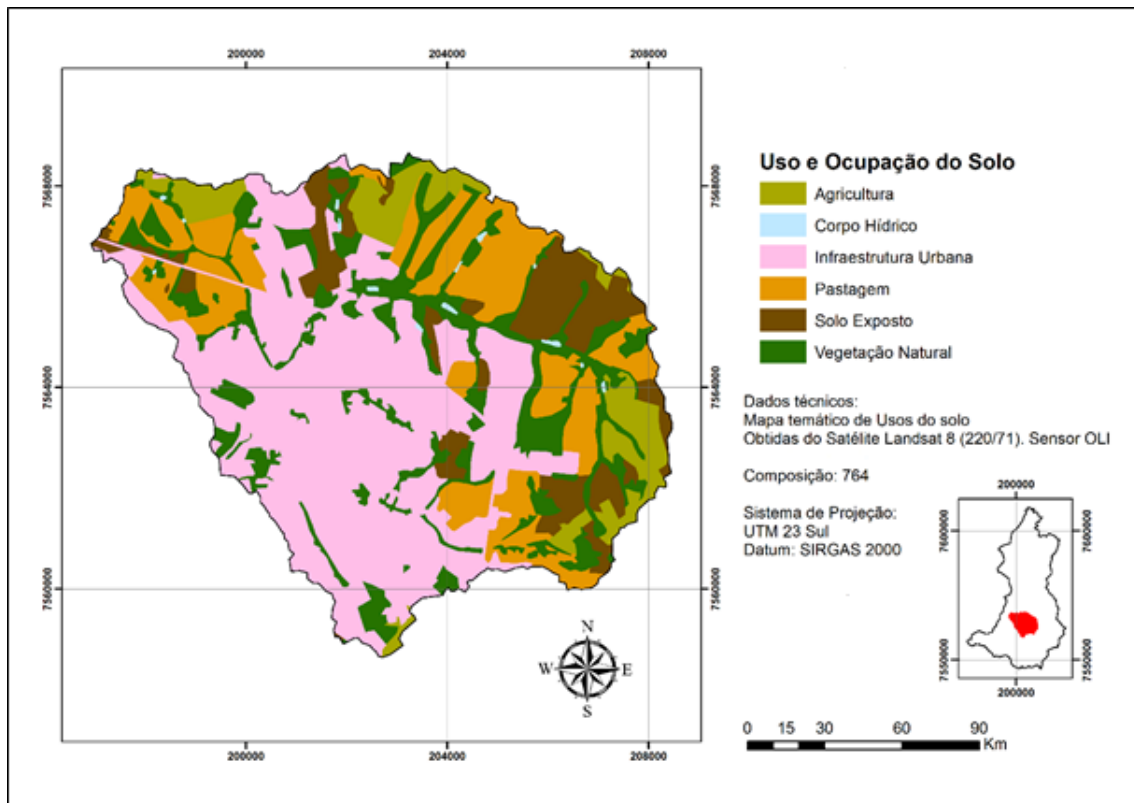


Figura 8: Mapa de Uso e Ocupação do solo da área de estudo com base em imagem de satélite de outubro de 2013.

4.3 Análise das medidas de Incerteza

Nota-se na figura 9 que o evento de precipitação se concentrou grande parte no limite inferior da bacia, próxima ao exutório. A precipitação foi diminuindo gradativamente, mas na região central da bacia pode-se observar com clareza o gradiente da distribuição da precipitação sobre a bacia. As regiões no mapa destacadas em azul são as regiões que apresentaram a precipitação mais concentrada.

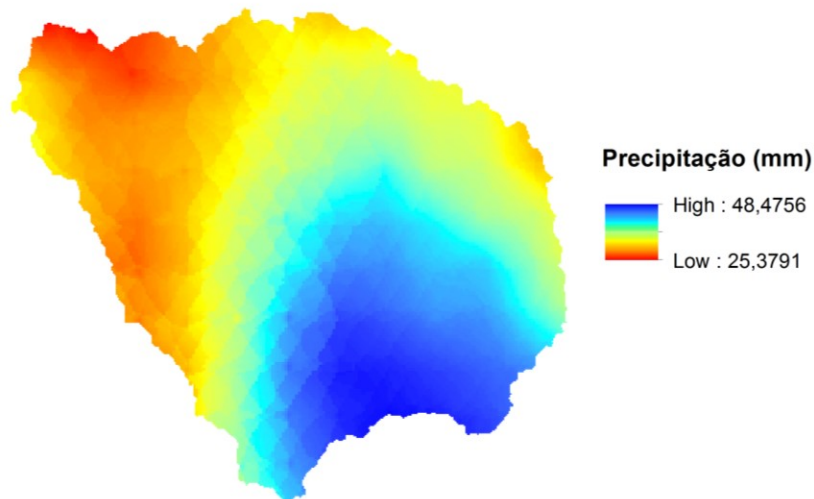


Figura 9: Precipitação registrada pelo radar no dia 22 de outubro de 2013

As figuras 10 e 11 apresentam uma imagem de incertezas locais. As incertezas foram estimadas pela metodologia baseada nos parâmetros estatísticos de média e de desvio padrão respectivamente. Esses mapas mostram que as regiões de maior incerteza são aquelas que aparecem mais brancas no mapa de incerteza, estão localizadas em áreas de maior variabilidade do atributo *Curve Number*.

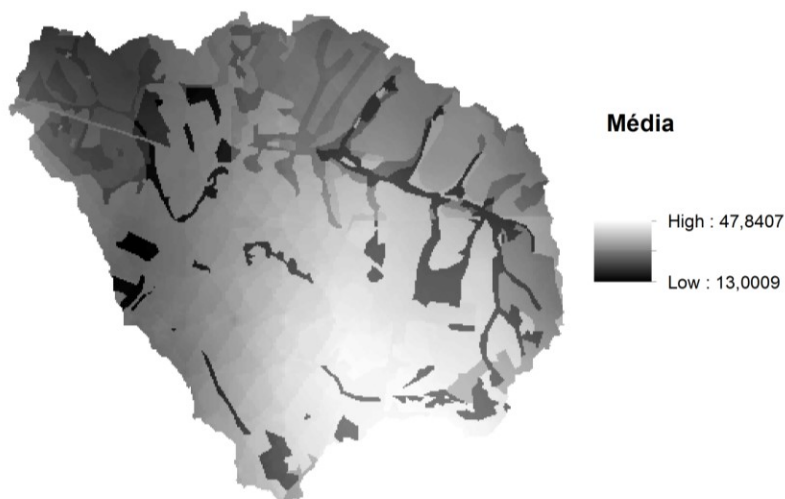


Figura 10: Mapas de valores estimados de *Curve Number* baseado no parâmetro estatístico de média.

Nas análises do mapas de incerteza da chuva efetiva média e do desvio padrão observou-se que regiões espaciais com maior variabilidade do atributo CN são as candidatas mais fortes a 0.013097 apresentarem informação de incerteza mais alta

(regiões mais brancas nos mapas de incerteza). Além disso, é importante ressaltar que a incerteza medida pode ser diminuída, local e globalmente, com amostragens mais refinadas nessas regiões. Este fato indica que as informações de incerteza desses modelos são também úteis para planejamento de reamostragem ou de amostragem mais fina dentro de uma área de interesse. Essas áreas coincidiram com as regiões que registraram precipitação mais concentradas e que apresentam o uso área urbana predominante. A pavimentação, culminando numa impermeabilização do solo podem ter influenciado nesse resultado.

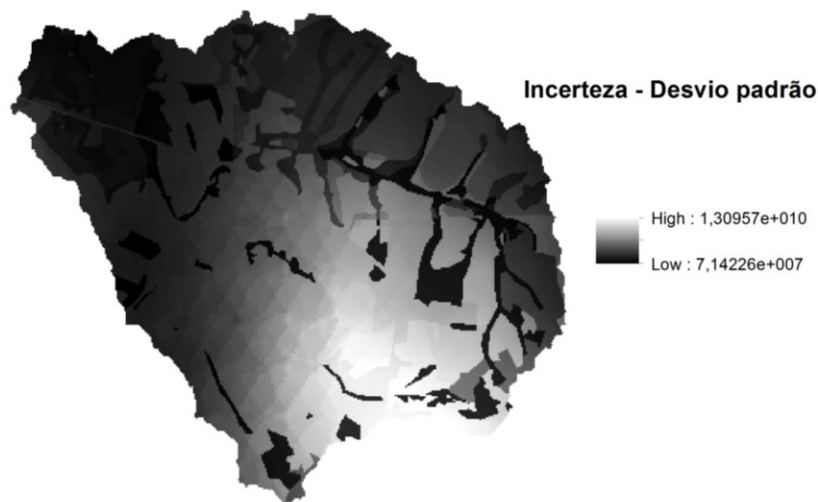


Figura 11: Mapas de valores estimados de *Curve Number* baseado no parâmetro estatístico de desvio padrão.

5. Conclusões

Diante de tantas ocorrências de inundações na bacia do Monjolinho, nesse estudo aplicamos o modelo SCS para a Bacia do Monjolinho. O modelo SCS tem sido utilizado para simulação de hidrogramas, bem como para o estabelecimento de risco de enchentes para um determinado local. Nesse contexto, concluiu-se que o tipo de uso e ocupação do solo de uma determinada área tem relação intrínseca com a alteração nos padrões de vazão superficial, sendo que quanto mais urbanizado e mais impermeabilizado o solo se apresentar, maior a transformação na relação chuva-vazão. A intensidade da chuva também é um fator que influencia na vazão da bacia, alterando a relação dos picos altos de vazão com o tempo (retardo ou adiantamento).

Os conceitos, os resultados e as análises apresentados neste trabalho mostram que as metodologias de inferência são opções interessantes para modelagem de atributos espaciais. O trabalho mostrou que essas metodologias se aplicam a atributos numéricos e

também, que elas possibilitam a associação de informação de incertezas relacionadas com as inferências. Medidas de incerteza foram exploradas e o uso dessas medidas vai depender da natureza do atributo modelado e do tipo de aplicação que fará uso do modelo criado. A análise de sensibilidade consiste em perturbar um determinado modelo, variando um de seus parâmetros de entrada, e identificando a variação ocorrida nos resultados de interesse.

As áreas que apresentaram maiores incertezas, ou seja, maior sensibilidade a variação de CN, coincidiram com as regiões que registraram precipitação mais concentradas e que apresentam o uso área urbana predominante. A impermeabilização do solo pode ser um dos fatores que influenciaram esse resultado, visto que a maior parte do solo pertence ao grupo dos solos bem drenados.

Referências Bibliográficas

ANTONIO, M.A.; GOMES, A.M.; LIMA, M.A.; **Características Doppler Associadas à Tempestades Severas no Estado de São Paulo**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 9, v1, pág 55-59, SBMET, Campos do Jordão, SP, Novembro, 1996.

ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. SWRRB -- **A watershed scale model for soil and water resources management**. In: SINGH, V. P. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch, CO: Water Resources, 1995.

BASTOS, P. C., 1979- B327e **Efeitos da urbanização sobre vazões de pico de enchente**. – 2009. 136 f.: Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

BIELENKI JUNIOR, C.; BARBASSA, A. P. **Geoprocessamento e recursos hídricos: aplicações práticas** – São Carlos: EDUFSCAR, 2012.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A. J. **Integração do radar meteorológico Doppler do Simepar e uma rede pluviométrica para a estimativa da precipitação**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11. 2003, Belo Horizonte.

COLLISCHONN, W.; RUTINÉLIA, T. **Introduzindo Hidrologia**. [S.l.]: IPH – UFRGS, 2011. CSERC, C. S. E. R. C. The Watershed Game.

DECINA, T. G. T. **Análise de medidas de controle de inundações a partir da avaliação de cenários de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, São Carlos - SP**. 2012. 176 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FELGUEIRAS C. A. **Modelagem Ambiental com Tratamento de Incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: O Paradigma Geoestatístico por Indicação**. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Publicado em <http://www.dpi.inpe.br/teses/carlos/>, 1999a.

- FERREIRA, L.; **Simulação hidrológica utilizando o modelo TOPMODEL em bacias rurais, estudo de caso na bacia do ribeirão dos Marins – seção Monjolinho – SP.** 2004. 205p. (Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.
- GEETHA, K.; MISHRA, S.K.; ELDHO, T.I.; RASTOGI, A.K.; PANDEY, R.P. **SCSCN-based continuous simulation model for hydrologic forecasting.** Water Resources Management. v.22, n.2, p.165-190, Feb. 2008.
- GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações.** 2010. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Heuvelink G. B. M. **Error Propagation in Environmental Modeling with GIS,** Bristol, Taylor and Francis Inc, 1998.
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA) Censo 2010; Disponível em:< www.ibge.gov.br/home>. Acesso em 18 nov 2016.
- LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J.B. **Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços.** Simpósio sobre terraceamento agrícola. Campinas, 1989. Fundação Cargill. p. 99-124.
- LORANDI, R.; TAKEMOTO, F.; SALVADOR, N. N. B; TORRESAN, F. E. **Carta de potencial à erosão laminar da parte superior da bacia do córrego do Monjolinho (São Carlos, SP).** Revista Brasileira de Cartografia, v.53, p.111-117, 2001.
- LOU, A. P. F. **Modelagem Geoestatística Aplicada a Integração entre Dados de Postos Pluviométricos e Radar Meteorológico.** Rio de Janeiro: 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.
- MAGALHÃES, L.P.C. **Modelo integrada para simulação de sistemas hídricos.** 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: Acesso em: 5 set. 2008.
- MARSHALL, J. S; PALMER, W. MCK. **The distribution of raindrops with size.** *Journal of Meteorology.* 5, p. 165-166, 1948.
- MC CUEN, R. H., WONG, S. L., RAWLS, W. J. **Estimating urban time of concentration.** *Journal of Hydraulic Engineering* 110 (7), pp 887-904. 1984.
- MACDONALD, I. A. **Quantifying the effects of uncertainty in building simulation.** Ph.D. Thesis, ESRU, University of Strathclyde. 2002. 253 pp.2002.
- MOTA, J. L. O. **Modelos Matemáticos y su Aplicación al Manejo de Cuencas Hidrográficas.** In: Congreso Nacional de Irrigación, Culiacán, Sinaloa, México, 1999.
- ROSS, J. L. S. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados.** Revista do Departamento de Geografia. n.8, p.63-74. 1994.
- SARTORI, A. **Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos.** 2004, 189p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

SARTORI, A; GENOVEZ, A. M; LOMBARDI NETO, F. **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos parte II: Aplicação.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH. Vol. 10, n4, p. 05-18. Dezembro, 2005.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **National Engineering Handbook:** Section 4, Hydrology. 1972.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Editora Universitária UFRGS, Porto Alegre, 1998.

TUCCI, C. E. M.; CAMPANA, N. A., 1993: **Simulação Distribuída com IPH II: nova versão.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10, Gramado-RS. Rio de Janeiro: ABRH, v. 3, p. 495-504, 1993.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 3.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 934p, 2002.

WOODWARD, D.E.; HAWKINS, R.H.; JIANG, R.; HJELMFELT, A.T.; VAN MULLEM, J.A.; QUAN, Q.D. **Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio.** In: World Water and Environmental Resources Congress, 2003.