

Análise do crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica de escoamento superficial da bacia do Pararangaba.

Iria Fernandes Vendrame¹
hiria@ita.br

Wallace Alan Blois Lopes¹
blois@ita.br

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA Praça Mal. Eduardo Gomes 50, Vila das Acácias
CEP12228-900 São José dos Campos-SP.

Abstract – Runoff changes in the Pararangaba river basin located at São José dos Campos at São Paulo state-Brazil are analysed with the aid of the hydrologic model IPHS1. The hydrographs simulated for the basin outlet show significant peak flood increases for three urbanization scenarios: before basin occupation, nowadays and future urbanization.

The hydrologic parameters required by IPHS1 like Curve Number(CN) and concentration time for each scenario are also applied in the comparative analysis, which shows how the urbanizing process is changing the basin natural hydrologic conditions.

A GIS (Geographic Information System) and the complementary municipal zoning law 165/97 were used to obtain the hydrologic parameters

Palavras-Chave: urbanization, floods, runoff models, urbanização, inundações, modelo precipitação-vazão.

1.Introdução

O crescimento populacional acelerado e os avanços da urbanização podem provocar impactos ambientais, que modificam profundamente as condições naturais de uma determinada região.

O desenvolvimento urbano produz aumento significativo na frequência de inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água. Na fase de desenvolvimento, o aumento da produção de sedimentos na bacia hidrográfica é significativo, devido às construções, limpeza de terrenos para novos loteamentos, construção de ruas, avenidas, rodovias, etc.

Com relação ao processo de risco de inundação, os impactos principais devido à urbanização sobre um sistema de drenagem são o aumento do pico da vazão de cheia, a antecipação no tempo desta vazão máxima e o aumento do volume do escoamento superficial.

A urbanização, como toda obra que interpõe estruturas pouco permeáveis entre o solo e a chuva, faz com que o escoamento seja incrementado e que a infiltração diminua, numa mudança de regime de escoamento localmente mais drástica do que aquela provocada pelo desmatamento, (Fendrich & Iwasa, 1998).

O impacto da urbanização pode produzir aumento sensível nos coeficientes de escoamento de uma bacia. Um habitante produz em média cerca de 49m² de área impermeável numa bacia, e para cada 10% de aumento na área impermeável, ocorre cerca de 100% de aumento no coeficiente de cheia e no volume de escoamento superficial, (Tucci, 2000).

2. Área de estudo – descrição da bacia do rio Pararangaba

O rio Pararangaba, afluente da margem direita do rio Paraíba do Sul, corta o município de São José dos Campos no sentido sudeste / nordeste e tem sua nascente na vertente interior da Serra do Mar.

Geograficamente, a sub-bacia do rio Pararangaba encontra-se no extremo leste do município, próximo à divisa com o município de Caçapava. Possui área de 75,64 Km², correspondendo a 6,8% da área total da cidade de São José dos Campos, e apresenta três afluentes principais: ribeirão do Cajuru, córrego do Bairrinho e córrego do Bueirinho (**Figura 01**). Entre a rodovia Presidente Dutra e a rodovia Governador Carvalho Pinto, onde domina o médio curso do rio Pararangaba, estão concentrados os maiores problemas da bacia.

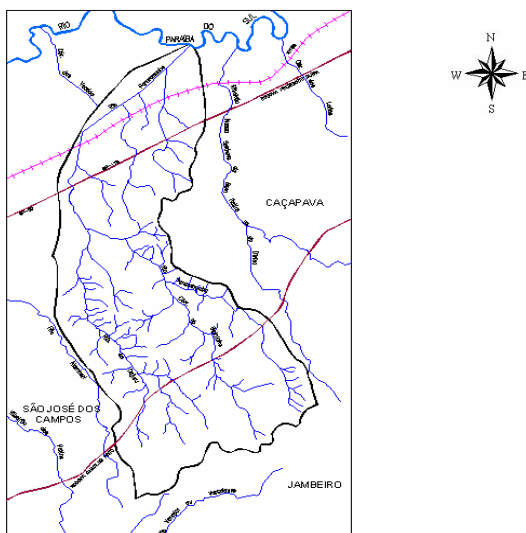


Figura 01: Caracterização da bacia do rio Pararangaba (Fonte: CPTI, 2000).

A análise geomorfológica da bacia do Pararangaba indica a presença de aluviões argilosos que pertencem à área de drenagem do rio Paraíba do Sul. Há também terraços fluviais, aluviões arenosos (característicos das várzeas do rio Pararangaba e de dois de seus afluentes, Cajuru e Bairrinho). Nas nascentes desses corpos d'água há morros com substrato de rochas graníticas e declividades que variam entre 20 a 50% (IPT/PMSJC, 1996).

3. Aplicação do modelo precipitação-vazão IPHS 1

A operação realizada com o programa IPHS1 incluiu etapas como inserção de pontos de controle na seção relativa ao exutório das bacias, e interligação dos pontos de controle ao módulo que realiza a transformação precipitação-vazão (módulo bacia).

Depois de executada a montagem da estrutura de funcionamento do modelo, ou seja, conexão das sub-bacias aos pontos de controle, definiram-se os parâmetros necessários para geração de um arquivo de saída que contivesse todos os resultados.

O emprego do modelo permitiu a análise da variação dos hidrogramas de projeto relativos ao exutório das bacias, em função do crescimento populacional e conseqüentemente da impermeabilização do solo. Foram analisados três cenários distintos: pré-urbanização, adensamento urbano atual e impermeabilização do solo através de ocupação futura.

A análise das bacias para o cenário de pré-urbanização considerou suas respectivas áreas sem ocupação e 99% permeáveis. Para o cenário atual, foram analisados dados digitalizados relativos ao uso e ocupação do solo, mapa pedológico e carta geotécnica na escala de 1:50.000, através de informações que foram lançadas sobre a imagem do satélite LANDSAT no ano de 2001 (PMSJC, 2003). O cenário futuro foi elaborado com base no plano diretor e na lei de Zoneamento, do município de São José dos Campos, (Lei Complementar nº 165/97).

A operação do programa IPHS1 necessita de alguns parâmetros de entrada relacionados às características físicas da bacia analisada, bem como dados de precipitação sobre a região de

estudo e características dos solos pertencentes à área da bacia. Pode-se gerar inicialmente um arquivo com extensão.txt com os dados de chuva previamente determinados para o local, através dos gráficos ou equações que relacionam intensidade, duração, frequência. Um problema encontrado na aplicação do método foi o fato que a equação das chuvas desenvolvida para o município de São José dos Campos, foi determinada para um tempo de concentração menor que vinte e cinco minutos. Assim, optou-se por aplicar a equação das chuvas do município de Taubaté, em função da similaridade, ou seja, proximidade da região de estudo, e não ocorrência marcante de variação espacial de características como vegetação, clima, intensidades pluviométricas, etc.

Os hietogramas utilizados nas simulações de transformação precipitação-vazão, foram determinados a partir da análise com as equações de intensidade-duração-frequência da cidade de Taubaté desenvolvidas pelo Engenheiro Otto Pfafstetter. Foram realizadas simulações para tempo de retorno de 10 anos, e as precipitações foram acumuladas para intervalos de tempo de 30 minutos.

A distribuição temporal dos volumes precipitados condiciona o volume infiltrado e a forma do hidrograma de escoamento superficial direto originado pela chuva excedente. O sistema IPHS 1 realiza a distribuição temporal através do método dos blocos alternados. Esse método propõe a distribuição de totais de chuva em intervalos de tempo contidos na duração total. Para a determinação da intensidade pluviométrica, bem como a altura de precipitação para os diversos incrementos de tempo, foi utilizado o programa do banco de dados pluviográficos do DAEE de São Paulo. Desta forma, considerando o tempo de concentração calculado para a bacia hidrográfica em cada análise, pré-urbanização e cenário atual e futuro, foi possível montar o arquivo texto de entrada relativo às precipitações que incidem sobre a bacia analisada.

Os modelos utilizados pelo sistema IPHS1 para separação do escoamento, levam em consideração parâmetros como taxa de impermeabilização do solo, capacidade de infiltração, perdas de água de chuva, etc.

O sistema compreende cinco modelos de separação de escoamento, (IPH II, SCS, HEC1, FI, e Holtan), sendo que cada modelo possui seus parâmetros de entrada específicos.

Para o projeto da bacia do rio Pararangaba, foi utilizado o método do SCS ou do Número de Curva (CN) (Tucci, 2000).

4.Cálculo do número de curva para diferentes cenários de urbanização

A aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG'S), facilitou o processo de estimativa do parâmetro CN (número de curva), em função da manipulação do mapa geotécnico e do mapa de uso e ocupação do solo da região.

Caso a bacia apresente diversos tipos de solo e de ocupação, deve-se adotar o valor de CN obtido da média ponderada dos coeficientes correspondentes às áreas homogêneas. Alternativamente, pode-se separar a bacia em áreas permeáveis e impermeáveis e calcular o CN ponderado.

A utilização de SIG'S possibilitou o cálculo de área permeável e impermeável, para as bacias estudadas e conseqüentemente a obtenção do CN ponderado, que foi utilizado como parâmetro de entrada no sistema IPHS 1.

4.1Análise do cálculo do número de curva (CN) para a bacia do Rio Pararangaba

A **figura 2.a** mostra o mapa relativo à área permeável e impermeável para cada grupo de solo classificado de acordo com o SCS, relativo ao cenário atual de urbanização na bacia. O mesmo foi gerado através do cruzamento dos planos de informação temáticos de uso e

ocupação do solo, carta geotécnica e mapa pedológico. A partir deste, foi possível obter o número de curva (CN) ponderado para a situação atual.

Para um cenário de pré-urbanização, o número de curva ponderado foi calculado admitindo-se a área da referida bacia como totalmente permeável.

O cenário de ocupação atual da bacia indicou um número de curva superior ao número de curva obtido para um cenário de pré-urbanização, refletindo a impermeabilização ocorrida na bacia em função de uma ocupação desordenada.

Para a determinação da área impermeável e permeável para cada grupo de solo na análise de cenário atual, foi utilizada uma metodologia onde foram geradas grades numéricas através de operações de ponderação dos mapas de uso e ocupação do solo, e do mapa pedológico da bacia hidrográfica.

O número de curva (CN) ponderado para o cenário de urbanização futura foi obtido através do cruzamento dos planos de informação temáticos de uso do solo, carta geotécnica e mapa pedológico com o mapa de zonas do uso do solo urbano (**Figura 2.b**). De forma similar à obtenção do número de curva para o cenário atual, foram geradas grades numéricas a partir de cada plano de informação citado, e em seguida processadas operações de álgebra de mapas através do SIG SPRING.

Para que fosse possível a determinação do número de curva para o cenário futuro, foram aplicados os coeficientes relativos à taxa de ocupação definida segundo a lei de zoneamento 165/97 pertencente ao município de São José dos Campos.

A **Tabela 01** detalha as variáveis utilizadas nos cálculos para o número de curva ponderado para os diversos cenários de urbanização.

5. Cálculo do tempo de concentração para diferentes cenários de urbanização

O modelo adotado para o cálculo do tempo de concentração para as análises hidrológicas foi particularmente útil para o presente estudo porque possibilitou de modo simples e direto avaliar o impacto da urbanização no regime hidrológico da bacia.

A falta de observações simultâneas de chuva e vazão em adequados intervalos de tempo, que possibilitem estabelecer o hidrograma em respostas de chuva é muito comum, principalmente no caso de bacias de pequeno porte, como a bacia do Pararangaba. Este fato tem motivado a concepção de metodologias empíricas para estimar parâmetros característicos do hidrograma tipo, como o tempo de concentração, por exemplo.

Segundo Germano et al (1998), entre os resultados que apresentaram as melhores regressões está a equação 1 para o tempo de concentração. Em função das diversas condições de urbanização e conseqüentemente da impermeabilização do solo, foi possível estimar o tempo de concentração para cada cenário analisado, e posteriormente utilizá-lo como parâmetro de entrada na simulação com o sistema IPHS1.

$$tc = 18,628 \frac{L^{0,882}}{IMP^{0,272}} \quad (01)$$

Onde L é o comprimento do talvegue em Km, IMP é a porcentagem de área impermeável e tc tempo de concentração em minutos.

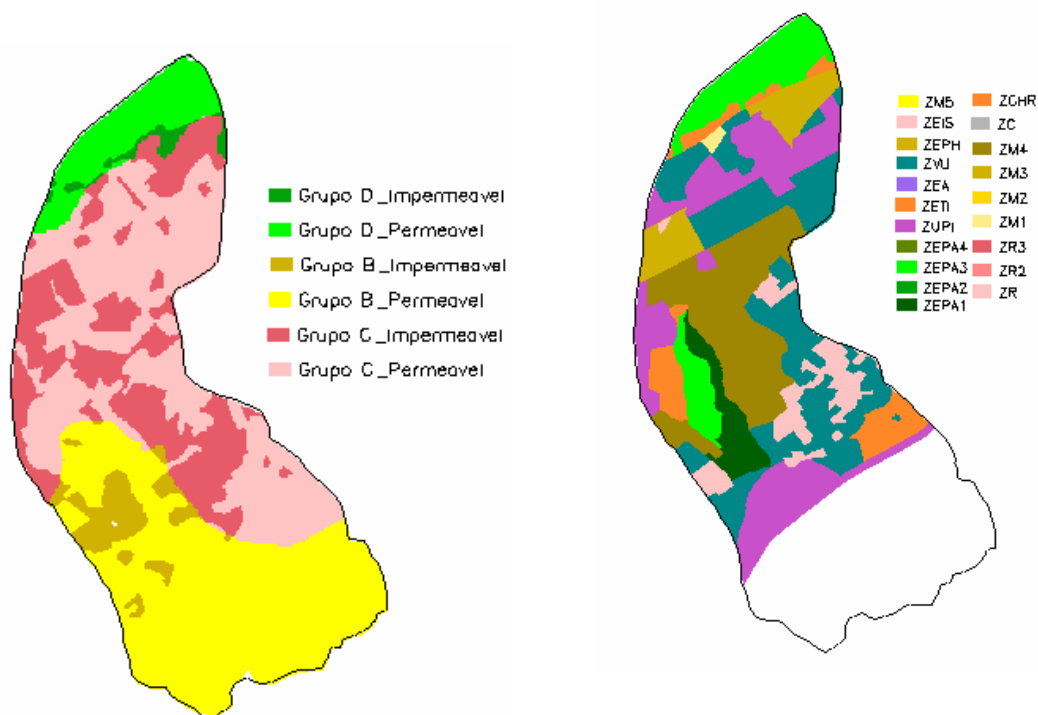
5.1 Cálculo do tempo de concentração para diferentes cenários da bacia do Pararangaba

O tempo de concentração foi calculado para os três cenários analisados, utilizando-se o valor estimado para o comprimento do rio principal, que é de 19,95 Km. Para o cenário de pré-urbanização admitiu-se 99% de área da bacia permeável, que conduz a um $t_c=15,25$ horas.

| Tipo de Solo | CN Permeável | Área Permeável (Km2) | CN Impermeável | Área Impermeável (Km2) | Área Total (Km2) |
|--|--------------|----------------------|----------------|------------------------|------------------|
| B | 61 | 28,66 | 98 | 0 | 28,66 |
| C | 74 | 37,05 | 98 | 0 | 37,05 |
| D | 80 | 6,19 | 98 | 0 | 6,19 |
| CN Ponderado (Pré - Urbanização)..... | | | | | 69,33 |
| Tipo de Solo | CN Permeável | Área Permeável (Km2) | CN Impermeável | Área Impermeável (Km2) | Área Total (Km2) |
| B | 61 | 25,28 | 98 | 3,38 | 28,66 |
| C | 74 | 22,73 | 98 | 14,32 | 37,05 |
| D | 80 | 5,26 | 98 | 0,93 | 6,19 |
| CN Ponderado (Cenário Atual)..... | | | | | 76,09 |
| Tipo de Solo | CN Permeável | Área Permeável (Km2) | CN Impermeável | Área Impermeável (Km2) | Área Total (Km2) |
| B | 61 | 18,32 | 98 | 10,34 | 28,66 |
| C | 74 | 8,19 | 98 | 28,86 | 37,05 |
| D | 80 | 4,25 | 98 | 1,94 | 6,19 |
| CN Ponderado (Cenário Futuro - Lei de Zoneamento 165/97)..... | | | | | 84,77 |

Tabela 01: Cálculo do CN ponderado para diversas análises de adensamento urbano

Figura 02: a) Mapa de Classificação do Solo da Bacia do Pararangaba Segundo SCS – Cenário Atual.
b) Mapa de Zoneamento da Bacia do Pararangaba. Fonte: PMSJC, 2003



O mapa de uso e ocupação do solo atualizado indicou para o cenário atual uma taxa de impermeabilização do solo de 25,91 %, o que conduz a um $t_c = 6,27$ horas. Os resultados mostram a mudança ocorrida no tempo de concentração da bacia, o que reflete na antecipação de pico do hidrograma para a situação atual em relação ao pico do hidrograma original.

A taxa de impermeabilização do solo para o cenário futuro, baseado nos coeficientes das taxas de ocupação permitidos na lei 165/97 para cada zona de solo na bacia, indicam que devido ao adensamento descontrolado, a área ocupada na bacia deverá atingir aproximadamente 56,54 % da bacia, caso não sejam alteradas as taxas de ocupação atuais para as áreas ainda não ocupadas, conforme a **Tabela 02**.

| Classes | Área Permeável (Km²) | Área Impermeabilizada (Km²) | Área Total (Km²) | Taxa de Ocupação (%) | Ocupação Máxima Pelo Zoneamento (Km²) | Áreas Livres para Ocupação (Km²) |
|---|----------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| ZR3 | - | 0,0018 | 0,0018 | 65 | 0,00117 | - |
| ZM1 | 0,03 | 0,1638 | 0,1971 | 65 | 0,128115 | 0,021645 |
| ZM3 | 0,17 | 3,2733 | 3,4416 | 65 | 2,23704 | 0,109395 |
| ZM4 | 5,23 | 4,7403 | 9,9747 | 65 | 6,483555 | 3,40236 |
| ZEPA1 | 0,89 | 1,4067 | 2,2923 | 65 | 1,489995 | 0,57564 |
| ZEPA3 | 5,63 | 0,1188 | 5,751 | 2 | 0,11502 | 0,112644 |
| ZUPI | 8,03 | 2,8125 | 10,8468 | 80 | 8,67744 | 6,42744 |
| ZETI | 3,30 | 0,4662 | 3,7674 | 80 | 3,01392 | 2,64096 |
| ZUV | 10,62 | 2,5488 | 13,1715 | 65 | 8,561475 | 6,904755 |
| ZEIS | 0,52 | 3,1113 | 3,636 | 65 | 2,3634 | 0,341055 |
| APA | 19,70 | - | 19,7 | 10 | 1,97 | 1,97 |
| Total | 54,14 | 18,64 | 72,78 | - | 35,04 | 22,51 |
| % da Bacia | 74,38 | 25,62 | 100,00 | | 48,15 | 30,92 |
| % de Área Impermeável da Bacia (Ocupação Futura)..... | | | | | | 56,54 |

Tabela 02: Análise de Ocupação Futura da Bacia do Pararangaba

Ocorrerá desta forma uma variação da taxa de impermeabilização do solo de 25,91%, que representa o cenário atual, para uma taxa de 56,54 % que representa o cenário futuro. Conseqüentemente o tempo de concentração para o cenário futuro diminuirá para 5,07 horas.

O método escolhido para as simulações do escoamento superficial no sistema IPHS, foi o método de Nash modificado. Os métodos de Clark e Nash também necessitam de dados de vazão para determinação de alguns parâmetros, no entanto alguns algoritmos de cálculo são capazes de estimar tais parâmetros através de expressões que levam em consideração características geométricas da bacia.

6. Discussão dos Resultados

6.1 Resultados Obtidos com o Auxílio do Modelo IPHS1

Os resultados obtidos através das metodologias, como modelo de separação de escoamento e modelo de hidrograma através do sistema IPHS1, mostraram a variação dos picos de vazão para cada cenário de urbanização, (pré-urbanização, urbanização atual e urbanização futura).

Os hidrogramas gerados foram obtidos considerando uma contribuição total da área da bacia, ou seja, considerou-se como ponto de controle no sistema o exutório da bacia. As simulações foram realizadas para tempos de retorno de 10 anos, em função da bacia hidrográfica apresentar, atualmente, intenso processo de urbanização.

O hidrograma final de projeto para cada cenário de urbanização indicou uma variação nas vazões máximas de forma crescente em função do acréscimo da taxa de ocupação na bacia. Essa variação coincide com os próprios parâmetros de entrada que indicavam mudança no número de curva e redução do tempo de concentração.

Considerando como exemplo de análise, uma simulação para período de retorno de dez anos, a vazão máxima no exutório da bacia aumentou de 100,62 m³/s, obtido na simulação de pré-urbanização, para 129,95 m³/s na simulação para cenário de urbanização atual.

Conforme a lei de zoneamento 165/97, foi possível simular uma condição futura de ocupação na bacia, e conseqüentemente obter os parâmetros de entrada no sistema IPHS como número de curva (CN) ponderado e tempo de concentração, referente ao adensamento urbano futuro.

Para este novo quadro, os resultados mostraram que a vazão máxima no exutório varia de 129,95 m³/s que representa a simulação de urbanização atual, para 181,69 m³/s que representa a vazão máxima que deverá ocorrer na bacia hidrográfica.

A **Tabela 3** indica os parâmetros de entrada utilizados nas simulações, bem como os resultados obtidos para tempos de retorno de 10, 25 e 50 anos. A **Figura 3** mostra o hietograma e o hidrograma resultante para o cenário de pré-urbanização, para tempo de retorno de 10 anos.

A **Figura 4** compara a variação das vazões em cada simulação de urbanização, comprovando como a urbanização crescente e desordenada da bacia tende a incrementar e antecipar a vazão de pico nos hidrogramas, o que pode desencadear cada vez mais impactos ambientais como processos erosivos em fundo e margens de canais, assoreamentos e inundações.

| Bacia Hidrográfica do Rio Pararangaba | | | |
|---|-----------------|-------------------|--------------------|
| Parâmetros | Pré-Urbanização | Urbanização Atual | Urbanização Futura |
| CN | 69,33 | 76,09 | 84,77 |
| Tempo de Concentração (horas) | 15,23 | 6,27 | 5,07 |
| Área Impermeável (Km ²) | - | 18,63 | 41,14 |
| Taxa de Impermeabilização (%) | - | 25,91 | 56,54 |
| Vazão Máxima (m ³ /s) - Tr 10 Anos | 100,62 | 129,95 | 181,69 |
| Vazão Máxima (m ³ /s) - Tr 25 Anos | 143,03 | 174,96 | 230,92 |
| Vazão Máxima (m ³ /s) - Tr 50 Anos | 178,21 | 212,90 | 270,43 |

Tabela 3: Parâmetros de Entrada e Resultados obtidos para Cenários de Urbanização

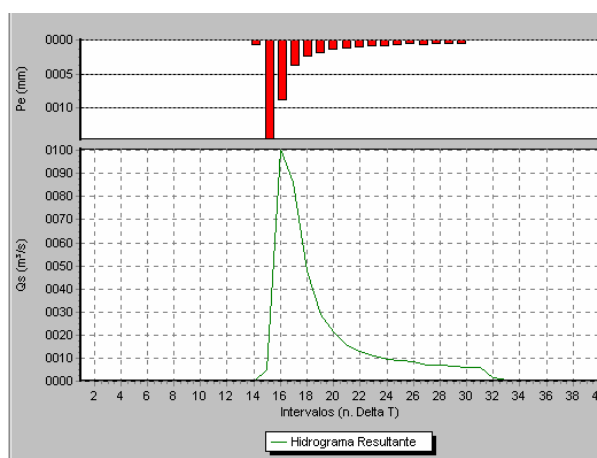


Figura 3: Hietograma e hidrograma gerado para cenário de Pré - Urbanização – Tr 10 Anos: Bacia do Pararangaba

7 Conclusões

Os resultados apresentados neste trabalho têm importância significativa para orientar o planejamento das ações de prevenção relacionadas ao impacto ambiental nos recursos hídricos, causado pelo acentuado crescimento urbano na bacia hidrográfica do rio Pararangaba.

O estudo apresentado é uma demonstração objetiva das vantagens de se utilizar tecnologias relativas aos Sistemas de Informações Geográficas, como ferramenta na modelagem hidrológica relacionada a impactos ambientais hidrológicos causados por um adensamento urbano sem planejamento.

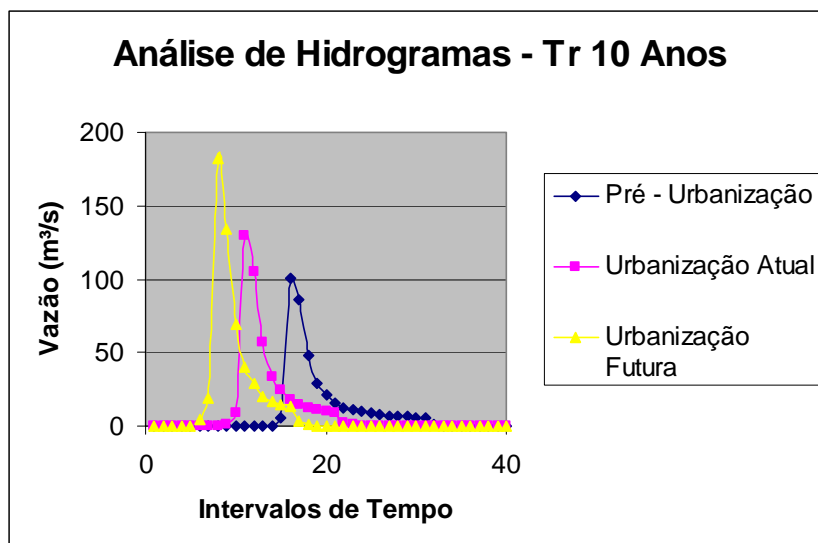


Figura 4: Análise comparativa de hidrogramas – Tr 10 Anos: Bacia do Pararangaba

Analisando o reflexo da acelerada impermeabilização na bacia hidrográfica, se observa que a vazão máxima para a seção de controle em questão para todas as simulações, aumentou significativamente em relação à vazão natural.

O prognóstico para o futuro da bacia, caso não sejam tomadas medidas preventivas, é de que as vazões serão muito superiores em relação às vazões para condição rural. Isso mostra que serão necessários investimentos consideráveis no futuro para controlar o incremento do volume de escoamento superficial.

A análise do adensamento urbano mostrou que o impacto da urbanização vem ocasionando sérios danos ao meio ambiente, e pesados ônus aos cofres municipais, ocasionados principalmente pela falta de uma legislação que contemple os aspectos do controle das vazões e pela implantação de medidas preventivas que impeçam que a ocupação das bacias continue de forma caótica.

Referências Bibliográficas

- COOPERATIVA DE SERVIÇOS E PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS (CPTI), **Plano de Bacias (UGRHI 01-02)**. Coordenação técnica de Antônio Melhem Saad. São Paulo, 2000. 1 CD-ROM.
- FENDRICH, R. e IWASA O. Y. Controle de Erosão Urbana. In: **Geologia de Engenharia**, São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia de Engenharia (ABGE), 1998. p. 271-281.
- FERREIRA E. M. e BRANDÃO N. I. Bacia do Rio Pararangaba, São José dos Campos, SP : Características Físicas e Impacto da Urbanização. In: **XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2000.
- GERMANO Andréa, TUCCI Carlos E. M., SILVEIRA André L.L. da. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, 1998 v.3, n.4, p. 103-120.
- IPT , PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Carta Geotécnica de São José dos Campos, SP**. Relatório Técnico nº 34645. São José dos Campos, 1996.
- LEI COMPLEMENTAR nº 165/97, de 15 de Dezembro de 1997. Dispõe Sobre a Ordenação do Território Mediante Controle do Parcelamento, do Uso e da Ocupação do Solo no Município de São José dos Campos, SP. Disponível em: < <http://www.sjc.sp.gov.br/html/legislacao.htm>>
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS – Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente. **Banco de Dados Geográfico Cidade Viva**. São José dos Campos, 2003. CD-ROM.
- TUCCI, C. Coeficiente de Escoamento e Vazão Máxima de Bacias Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, Porto Alegre, RS, 2000 v.5, n.1. p. 61-68.