

Doi: 10.5212/Publ.Exatas.v.15i1.025037

ESTUDOS HIDROLÓGICOS E EFEITOS DA URBANIZAÇÃO NA BACIA DO ARROIO DA RONDA EM PONTA GROSSA – PARANÁ

HIDROLOGIC STUDIES AND URBAN DEVELOPMENT EFFECTS IN RONDA STREAM BASIN AT PONTA GROSSA - PARANÁ STATE

Aleksander Schmidt Diedrichs¹, Alceu Gomes de Andrade Filho² e Carlos Roberto Balarim²

¹ Bolsista PIBIC/CNPq, Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Rua Dr. Penteadó de Almeida, n. 711, Ponta Grossa - PR. Tel.: (42) 9975-0462. E-mail: <aleksander_diedrichs@yahoo.com.br>.

² Prof. Dr., Depto. de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, Ponta Grossa-PR. CEP: 84.030-900 Tel.: (42) 3220-3074. E-mail: <agafilho@uepg.br>.

Recebido para publicação em 17/12/2008

Aceito para publicação em 05/03/2009

RESUMO

Um dos maiores problemas enfrentados pela população das grandes cidades brasileiras reside no controle de enchentes urbanas consequentes do aumento da taxa de impermeabilização do solo imposto pelo descontrolado aumento da urbanização. Realizou-se a análise dos hidrogramas em face de duas situações: antes e após a urbanização. A metodologia adotada baseou-se na caracterização fisiográfica da bacia do Arroio da Ronda, em Ponta Grossa; a seguir, foram construídos os hidrogramas unitários, as tormentas críticas, os hidrogramas de enchente nas situações antes e após a urbanização e, finalmente, foram efetuadas a sobreposição e a análise dos hidrogramas resultantes. A obtenção dos hidrogramas unitários e de enchentes foi realizada com base no método do CUHP (Colorado Urban Hydrograph Procedure), proposto em 1984 pelo Conselho Governamental da Região de Denver, no Colorado (EUA). De posse dos hidrogramas, foram então feitas sobreposições dos mesmos com o intuito de analisá-los mediante às situações de pré e pós-urbanização. Os resultados revelaram, na bacia estudada, um relevo bastante acidentado, principalmente nas encostas, com uma atenuação do perfil ao longo do curso e a existência de grandes vazios urbanos na zona central de Ponta Grossa, cujo aumento da taxa de impermeabilização dos solos eleva o pico de vazão do hidrograma e também reduz o tempo de concentração da bacia. Esses resultados demonstram o quanto as ações antrópicas influenciam nas características hidrológicas de uma bacia urbana.

Palavras-chave: Enchentes urbanas. Hidrogramas. Taxa de impermeabilização.

ABSTRACT

One of the main problems faced for the larger Brazilian cities is the urban flood control, consequence of the increase waterproofing tax of the ground imposed by the uncontrolled urbanization increase. This work had as objective to after carry through hydrographs analysis in face of two situations, being these before and after of the urbanization. The used methodology consists first of the physical characterization at Ronda basin in Ponta Grossa city, to follow had been constructed the unitary hydrographs, critical storms, construction of the hydrograph of flood in the situations before and after the urbanization and finally the overlapping and analysis hydrograph results. The attainment of the unitary hydrographs and floods had been made on the basis of CUHP (Colorado Urban Hydrograph Procedure) method considered in 1984 for the Governmental Council of the Region of Denver, in Colorado (USA). With the hydrograph then over of the same ones with intention had been made to analyze them by means of the situations before and after urbanization. The results gotten had disclosed in the studied basin a relief sufficient caused an accident mainly in the hillsides with an attenuation of the profile to the long one of the course, existence of great urban free areas in the central zone in Ponta Grossa city and that the increase of the tax of waterproofing of ground raises the peak of outflow of the hydrograph and also reduces the basin time concentration. These results demonstrate how much the human actions influence in the hydrologics characteristics of an urban basin.

Keywords: Urban floods. Hydrograph. Waterproofing degree.

1 Introdução

Tendo em vista a grande problemática causada pelas enchentes urbanas, a exemplo da interrupção de atividades econômicas nas áreas inundadas; veiculação de doenças através da água, como a leptospirose, cólera e outras; destruição de casas por meio do desmoronamento de encostas, ocasionado pelo processo erosivo do solo pelas enxurradas; contaminação hídrica em função do contato com depósitos de materiais tóxicos e estações de tratamento; e outros problemas advindos das inundações, torna-se evidente a necessidade de estudos visando à atenuação destes transtornos. Nesse contexto, a drenagem urbana tem uma função precípua: minimizar a presença de excessos de circulação de água, especialmente pluviais, em locais indevidos no meio urbano, visando, de maneira integrada, à diminuição desses problemas.

Um importante aspecto a ser levantado é que a urbanização torna-se a principal responsável pelo aumento do escoamento de águas na superfície do solo e, conseqüentemente, pelo agravamento dos

problemas advindos das enchentes, devido à impermeabilização imposta por telhados, ruas e calçadas asfaltadas. Esse escoamento, que anteriormente realizava-se sobre a superfície de maneira lenta e natural, passou então a escoar por áreas impermeabilizadas, aumentando a sua velocidade e reduzindo o tempo de concentração da bacia. Podem ser observados, na Tabela 1, as principais causas da urbanização de bacias hidrográficas urbanas e os seus principais problemas nos arroios urbanos.

Para a compreensão desses fenômenos indesejáveis, são desenvolvidos os estudos hidrológicos, os quais, entre outros, têm os seguintes enfoques: determinação das características fisiográficas da região; grau de urbanização/impermeabilização dos solos; estabelecimento de tempos de retorno de determinado evento; e quantificação das vazões máximas de projeto.

O estudo da drenagem urbana, bem como métodos de previsão de vazão e o descontrole do processo de urbanização têm sido alvos constantes de investigação. (TUCCI; BERTONI, 1994; SIL

Tabela 1 – Causas e efeitos da urbanização sobre as cheias dos arroios urbanos.

CAUSAS	EFEITOS
Impermeabilização	Maiores picos de cheia e vazões em rios
Redes de drenagem	Maiores picos de cheia a jusante
Lixo	Degradação da qualidade da água Entupimento de bueiros e galerias pluviais
Redes de esgotos sanitários deficientes	Degradação da qualidade da água Doenças de veiculação hídrica
Desmatamento de desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos de cheia e volumes escoados Maior erosão Assoreamento em canais e galerias
Ocupação de várzeas	Maiores prejuízos ao patrimônio por enchentes Maiores picos de cheia Maiores custos de utilidades públicas

Fonte: Leopold (1954 apud PORTO et al., 1995).

VEIRA et al., 2000). Tendo-se em vista a grande importância da drenagem urbana na sociedade e sendo esta alicerçada pelos estudos hidrológicos, foram aplicados, neste trabalho, os conhecimentos de Hidrologia para então prever futuros problemas e tentar minimizá-los, de forma a não causar prejuízos. O objetivo específico é estudar a variação do comportamento hidrológico da bacia do Arroio da Ronda – a qual localiza-se no perímetro urbano de Ponta Grossa – em duas situações, sendo estas antes e após a urbanização, com base nos hidrogramas unitário e de enchente, obtidos segundo o método do CUHP (Colorado Urban Hydrograph Procedure), proposto pelo distrito de drenagem urbana de Denver, no Colorado (EUA), em 1984.

Denomina-se hidrograma unitário o hidrograma resultante produzido por uma unidade de chuva excedente distribuída uniformemente sobre a bacia, com uma duração especificada do escoamento superficial de uma precipitação efetiva, com altura correspondente a 1 (um) centímetro. (AMARAL, 1998).

De acordo com a teoria do hidrograma unitário, as bases do método podem ser definidas através de três proposições, conhecidas como princípios de Sherman, transcritas em Ramos (1989 apud AMARAL, 1998) e enunciadas a partir de estudos desenvolvidos em bacias hidrográficas situadas nos Estados Unidos, conforme segue:

Para chuvas de iguais durações, as durações dos escoamentos superficiais correspondentes são iguais;

- a. Duas chuvas da mesma duração, mas com volumes escoados diferentes, resultam em hidrogramas cujas ordenadas são proporcionais aos correspondentes volumes escoados;
- b. Considera-se que as precipitações anteriores não influenciam a distribuição no tempo do escoamento superficial de uma dada chuva.

2 Materiais e métodos

Tendo em vista que o método adotado é baseado na teoria do hidrograma unitário, porém sintetizado, e através de dados climáticos e parâmetros físicos da região estudada, chega-se a um hidrograma final representativo.

As características fisiográficas da região foram criteriosamente determinadas a partir de mapas e fotos obtidos da base cartográfica do IPLAN – Instituto de Planejamento Urbano do Município de Ponta Grossa –, os quais foram confeccionados por restituição aerofotogramétrica do voo de 1995 e mapas de zoneamento do município de Ponta

Grossa. Na caracterização das sub-bacias, tornou-se necessária a análise de cartas topográficas, durante a qual foram traçados os divisores de água e as correntes formadoras e, em sequência, determinados as áreas, o perímetro, os coeficientes de compacidade, o comprimento ao longo do talvegue, a declividade do canal e os coeficientes de impermeabilização do solo com base no mapa de zoneamento do município de Ponta Grossa. Com relação à drenagem da bacia, foi realizada, em novembro de 2005, uma visita técnica e também foram consultados mapas da rede de galerias de águas pluviais da cidade, importante parâmetro para se fazer os ajustes necessários aos coeficientes para a obtenção da chuva unitária.

Os dados de precipitação pluviométrica da bacia do Arroio da Ronda foram obtidos a partir da estação agrometeorológica de Ponta Grossa, pertencente ao Instituto Agronômico do Paraná, situada no parque estadual de Vila Velha (lat. 25°13'S, long. 50°1'W, alt. 880 m), os quais foram sintetizados por Roberto Fendrich para a cidade de Ponta Grossa, resultando em uma equação que fornece a intensidade da precipitação em função do tempo de duração da chuva e também do período de retorno adotado, que varia de acordo com o tipo de ocupação da área, onde:

$$i = \frac{1902,39 Tr^{0,152}}{(t + 21)^{0,893}}$$

A seguir, é apresentada a Tabela 2 para a adoção do período de retorno.

Tabela 2 – Períodos de retorno para diferentes ocupações de área.

Tipo de obra	Ocupação da área	Tr (anos)
Microdrenagem	Residencial	2
Microdrenagem	Comercial	5
Microdrenagem	Áreas com edifícios de serviços ao público	5
Microdrenagem	Aeroportos	2 – 5
Microdrenagem	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5 – 10
Macro-drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50 – 100
Macro-drenagem	Áreas de importância específica	500 –

Fonte: Tucci (1993).

A obtenção dos hidrogramas unitários e de projeto nas situações de pré e pós-urbanização é feita de acordo com o método do CUHP, com a escolha do período de retorno de 100 anos, conforme indica

Tucci (1993). No entanto, para se aplicar o método adotado, é necessário definir o quadro de precipitações efetivas para cada sub-bacia estudada no âmbito da macrodrenagem, sendo necessário, neste caso, fazer uma correção de valores caso a área da sub-bacia seja maior que 12,95 km² (Tabela 3), com a intenção de não superestimar esses valores. O método de cálculo da precipitação efetiva crítica estabelece que sejam determinados os incrementos de precipitação para cada período unitário, rearranjando-os de modo que o maior valor seja colocado ao final dos primeiros 30 minutos, dispondo os demais valores de forma decrescente a partir do ponto de máximo.

Tabela 3 – Fatores de ajuste para distribuição da chuva de projeto.

Tempo (min)	Chuva de projeto de 50 e 100 anos				
	Área - Km ²				
	12,95 - 25,89	25,89 - 51,79	51,79 - 77,69	77,69 - 129,49	129,49 - 197,25
5	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
10	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
15	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
20	1,00	1,00	1,00	1,05	1,00
25	0,96	0,90	0,81	0,74	0,60
30	0,96	0,90	0,81	0,74	0,60
35	0,96	0,90	0,81	0,74	0,70
40	1,00	1,00	1,00	1,05	1,00
45	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
50	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
55	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
60	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
65 - 120	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
125 - 180	N/A	1,00	1,15	1,20	1,40
185 - 360	N/A	N/A	1,15	1,20	1,20

Fonte: Andrade Filho (2001, apud CETESB, 1986).

(ANDRADE FILHO, 2001).

As parcelas principais de desagregação da precipitação são duas: a primeira, relativa à área impermeável em que são considerados os valores de perdas por infiltração e por retenção na bacia; e a segunda parcela representando os valores da área permeável, onde são consideradas as perdas por retenção e perdas adicionais correspondentes a 5% do valor residual de precipitação. Deve ser considerado também o valor da duração da chuva de projeto de acordo com o tamanho da bacia ou sub-bacia, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Ajustes de área-duração recomendados.

Área da bacia ou sub-bacia (km ²)	Duração mínima (horas)	Necessidade de ajuste
Menos de 12,95	2	Não
Entre 12,95 e 25,89	2	Sim
Entre 25,89 e 51,79	3	Sim
51,79 ou mais	6	Sim

Fonte: DENVER REGIONAL COUNCIL OF GOVERNMENTS (1984 apud AMARAL, 1998).

Em seguida, foram construídos e traçados os hidrogramas unitário e de enchente para cada seção nos períodos de pré e pós-urbanização, considerando que no período de pré-urbanização foi adotado um coeficiente de impermeabilidade do solo de 15% para a caracterização fisiográfica em toda a bacia, que se refere às áreas gramíneas com vegetação rasteira, tendo em vista a sugestão do método adotado.

As principais ferramentas computacionais para a execução do trabalho foram o AutoCad 2004, programa gráfico necessário para a organização dos mapas e também para os cálculos de elementos de área, perímetro, grau de impermeabilização do solo,

centro de massa das sub-bacias e distâncias. Para a elaboração e cálculos das tabelas de caracterização fisiográfica, precipitação efetiva e hidrogramas de projeto foi utilizada a planilha eletrônica Excel 2003 da Microsoft. Finalmente, para o traçado dos hidrogramas unitário e de enchente e também dos perfis topográficos dos canais foi utilizado o programa gráfico Origin 5.0.

3 Apresentação dos Resultados

3.1 Caracterização da bacia hidrográfica de estudo

A bacia hidrográfica do Arroio da Ronda encontra-se situada na área urbana de Ponta Grossa. A bacia é afluente do rio Tibagi e, conforme indica a Figura 1, as principais bacias que limitam a área de estudo são: bacia do Arroio Gertrudes, localizada a noroeste da área de estudo; ao norte e nordeste, encontra-se a bacia do Lageado Grande; a leste, a bacia do Pilão de Pedra; e a sudeste e ao sul, a bacia de Olarias e a de Santa Tereza.

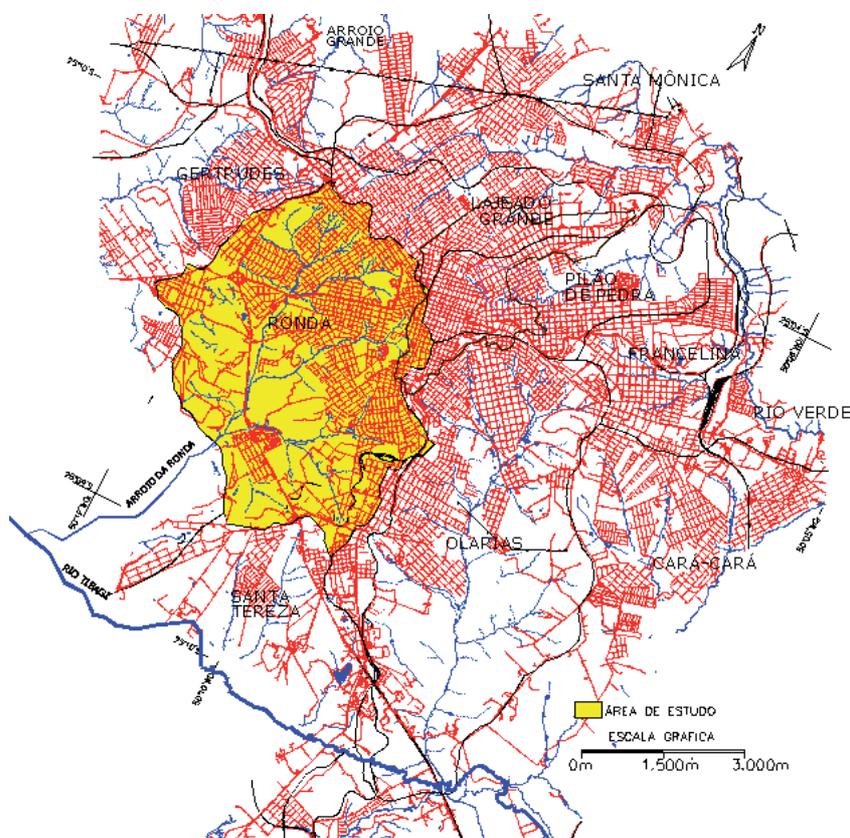


Figura 1 – Distribuição espacial das bacias urbanas de Ponta Grossa.

Com relação à análise geológica da bacia do Arroio da Ronda, pode ser encontrado na região, segundo Florenzano Júnior (1999), que situa-se no graben de Ponta Grossa sobre a formação Campo do Tenente (Grupo Itararé). São arenitos muito finos a síltico-arenosos, com coloração que varia do amarelo claro ao ocre e avermelhado, apresentando estratificação plano-paralela.



Figura 2 – Distribuição espacial das sub-bacias da bacia do Arroio da Ronda.

A bacia hidrográfica do Arroio da Ronda conta com 16 sub-bacias, conforme apresentado na Figura 2, sendo que os cursos d'água de algumas destas sub-bacias convergem para um único ponto – nestes locais foram definidas as seções de estudo. Deve-se notar que as áreas de algumas sub-bacias são acumuladas, ou seja, a área de uma sub-bacia é igual à própria área incremental mais a área da(s)

sub-bacia(s) a montante, se esta contribuir para o aumento do escoamento a jusante. Como exemplo tem-se a sub-bacia 2-B, a qual apresenta uma área formada pela soma da própria sub-bacia mais a área proveniente da 1-A, 1-B e 1-C. Podem-se observar alguns pontos de referências das sub-bacias do Arroio da Ronda na Tabela 5.

A seção de estudo S-1 é formada pela convergência da sub-bacia 1-A, 1-B e 1-C para um único ponto, apresentando neste local um grande volume de água concentrado, muito embora não seja um local propício a enchentes por apresentar uma elevada declividade topográfica, já que a seção de estudo encontra-se num trecho médio, portanto contendo forte inclinação e não ocorrendo acúmulo de água. Situação semelhante pode ser encontrada na seção S-2 que, além de somar as áreas das sub-bacias 2-A, 2-B e 2-C, também acumula a seção de estudos S-1 (sub-bacia 1-A, 1-B e 1-C).

A seção S-3 é formada pela sub-bacia 3, acumulada da seção S-2, formando naquela um ponto de alagamento, já que o perfil topográfico apresentado pelo curso d'água a montante tende a acentuar a partir deste ponto, o que propicia o risco de enchentes.

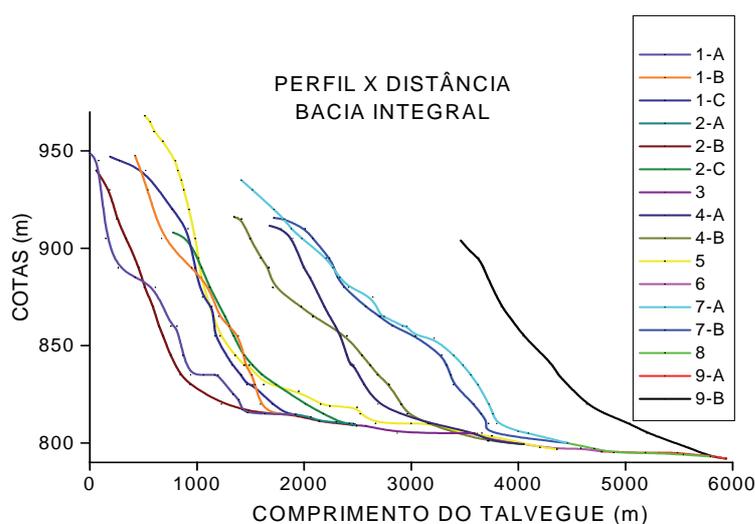
As sub-bacias 4-A e 4-B são independentes de escoamento de água a sua montante e estas convergem para um ponto no qual está localizada a seção S-4. Pode-se notar nas sub-bacias a jusante desta, a intensa forma-

ção de alagamento, o que pode ser demonstrado na Figura 3. Nesta figura, pode-se observar que os rios geralmente possuem um trecho superior, com características de planalto, onde a declividade não é muito elevada. A seguir, observa-se um trecho médio de grande declividade e no seu trecho inferior a declividade é pequena, onde o rio tende a meandrar. (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Tabela 5 – Características das sub-bacias e principais pontos de referência.

Sub-bacia	Área (km ²)	Ia %	Ponto de referência
1-a	1,43	37,10	Trevo Prefeito Eurico Batista Rosas – Nova Rússia
1-b	0,61	23,94	Café Lontrinha – Nova Rússia
1-c	0,57	18,63	Bradesco – Nova Rússia
1	2,61	30,01	
2-a	0,79	54,37	Jardim Maracanã – Contorno Oeste
2-b	2,85	28,60	
2-c	1,91	35,06	Supermercado Condor – Ronda
2	5,55	34,49	
3	6,69	34,74	Praça Hulda Roedel
4-a	1,15	49,68	Trevo do Contorno
4-b	1,34	17,85	13º Regimento de Infantaria Blindada
4	2,49	32,52	
5	3,69	20,84	Gurarani Esporte Clube – Jardim América
6	13,82	36,52	Área Militar 13º Regimento de Infantaria Blindada e Av. Presidente Kennedy
7-a	2,78	28,28	Fórum Joaquim Guimarães
7-b	1,97	17,04	Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos
7	4,75	23,60	
8	6,07	23,35	Autódromo André de Geus
9-a	15,01	35,05	Área Militar 13º Regimento de Infantaria Blindada
9-b	7,56	21,15	Pista de Aprendizagem DER
9	22,57	33,62	

Ia: grau de impermeabilização do solo

**Figura 3** – Variação das cotas altimétricas das sub-bacias ao longo do curso d'água do Arroio da Ronda.

A sub-bacia 5 também encontra-se isolada de contribuições a sua montante, muito embora o seu córrego principal (Arroio do Padre) contribua significativamente com um aumento da vazão no Arroio da Ronda.

A sub-bacia 6 na sua seção de estudo apresenta uma grande área de alagamento, devido a esta seção ser influenciada por todas as sub-bacias a montante discutidas anteriormente. É importante notar também que próximo à seção de estudos (S-6) existe a avenida Presidente Kennedy, importante via de acesso do município, a qual sofre em determinados pontos com frequentes problemas de encharcamentos.

As sub-bacias 7-A e 7-B são isoladas a sua montante, portanto não sofrem influências de outras áreas, embora os córregos destas duas sub-bacias convirjam num ponto onde foi definida a seção de estudos S-7: a partir deste ponto, os dois córregos unem-se e seguem em direção ao arroio principal. Também foi feita mais uma seção de estudos, nomeada de seção S-8, na união entre o córrego proveniente dessa sub-bacia com o Arroio da Ronda. Nesse ponto, apresenta-se uma área sujeita a alagamentos, já que além de ser intensamente urbanizado, este setor também apresenta uma topografia bastante plana, dificultando o escoamento e favorecendo a acumulação de água.

A sub-bacia 9-A é influenciada a sua jusante pela sucessão das sub-bacias que se encontram na seção de estudo S-6; a contribuição da 9-A se dá através de um pequeno córrego que encontra o Arroio da Ronda um pouco antes da sua desembocadura final. Ao contrário da sub-bacia 9-A, a 9-B não é influenciada por nenhuma

ma outra área a sua montante, portanto exerce apenas uma pequena contribuição para a seção de estudo S-9. É importante observar que toda a contribuição da bacia, resultando numa área de 22,57 km², encontra-se convergindo para um único ponto, sendo este fortemente propício ao acúmulo de águas, favorecendo o risco de enchentes. O córrego, então, contando com um maior volume de água, escoar por um canal de maior magnitude até encontrar seu destino final, que é a desembocadu-

ra no Rio Tibagi, a 4,23 km do ponto correspondente à seção S-9.

3.2 Características fisiográficas da bacia do Arroio da Ronda

As características físicas da bacia podem ser observadas de acordo com a Tabela 6, a qual representa as principais variações dos dados hidrológicos nas situações de pós e pré-urbanização.

Analisando as características fisiográficas, pode-se observar que o coeficiente de compactidade (Cc) representado na Tabela 6, cujos valores concentram-se em média em torno de 1,30, apresenta-se, portanto, distante da unidade. Esse coeficiente pode ser utilizado como indicativo de sensibilidade a enchentes e quanto mais próximo da unidade, mais circular é determinada área, embora na bacia de estudos os resultados tenham indicado um baixo potencial de agravamento de inundações em relação ao aspecto da forma da bacia hidrográfica. Entretanto, os valores das declividades naturais, obtidos pela análise topográfica do perfil dos cursos d'água, conforme Figura 3, a partir da qual foram feitas médias destes valores, em grande parte, apresentaram-se bastante elevados nos trechos próximos às suas nascentes, proporcionando um rápido escoamento e representando um problema quanto à transferência das vazões para as regiões de menor declividade, além de aumentar a erosão das encostas, favorecendo a diminuição da seção de escoamento e, conseqüentemente, o seu transbordamento.

Fazendo uma analogia entre a declividade apresentada na região de estudo, com os índices de urbanização, dispostos na Tabela 6, como grau de impermeabilidade do solo, pode-se notar a existência de vazios urbanos localizados na região central da cidade, principalmente nas sub-bacias 1-A, 1-B, 1-C e 2-C as quais apresentam elevadas declividades e baixo grau de impermeabilização do solo. Pode-se concluir, então, que a bacia em estudo apresenta uma grande incidência de vazios urbanos provocados pela topografia local, ou seja, determinadas regiões da cidade não são aproveitadas pela alta inclinação dos terrenos. Como exemplo dessa situação tem-se a porção superior da sub-bacia 5, a qual situa-se numa região central da cidade, tendo como pontos de referência as imediações do Supermercado Condor, Hotel Vila Velha e Ginásio de Esportes Borell

Tabela 6 – Quadro Comparativo das situações de urbanização da bacia hidrográfica do Arroio da Ronda.

Características fisiográficas			Pré-urbanização			Pós-urbanização		
MB	Cc	So (%)	Ia %	Qp (m ³ /s)	Tp (h)	Ia %	Qp (m ³ /s)	Tp (h)
1-A	1,32	7,09	15,00	4,14	0,79	37,10	8,27	0,33
1-B	1,37	9,26	15,00	1,78	0,73	23,94	3,24	0,41
1-C	1,46	7,93	15,00	1,56	0,79	18,63	2,54	0,53
S-1	1,20	7,09	15,00	6,52	0,86	30,01	13,04	0,41
2-A	1,22	5,90	15,00	2,15	0,81	54,37	5,53	0,26
2-B	1,21	5,55	15,00	6,11	1,02	28,60	11,99	0,50
2-C	1,31	5,25	15,00	3,79	1,09	35,06	8,11	0,47
S-2	1,28	5,55	15,00	11,89	1,02	34,49	25,22	0,44
S-3	1,24	3,92	15,00	10,88	1,35	34,74	23,15	0,62
4-A	1,39	5,41	15,00	2,64	0,97	49,68	4,38	0,38
4-B	1,31	4,85	15,00	2,93	1,01	17,85	3,15	0,90
S-4	1,20	5,63	15,00	6,05	0,91	32,52	8,39	0,49
S-5	1,36	4,37	15,00	5,89	1,36	20,84	6,77	1,07
S-6	1,20	3,19	15,00	18,44	1,66	36,52	40,08	0,73
7-A	1,29	4,43	15,00	4,97	1,22	28,28	9,71	0,65
7-B	1,32	4,23	15,00	3,78	1,15	17,04	5,96	0,87
S-7	1,33	4,93	15,00	9,61	1,08	23,60	17,39	0,66
S-8	1,38	3,53	15,00	9,03	1,49	23,35	10,88	1,08
9-A	1,24	2,64	15,00	17,24	1,95	35,05	36,83	0,87
9-B	1,37	3,19	15,00	10,69	1,57	21,15	12,36	1,22
S-9	1,33	2,64	15,00	28,27	1,79	33,62	59,33	0,83

MB: identificação de cada sub-bacia/seção; Cc: coeficiente de compactidade $Cc = P/(2.\pi.R)$, $A = \pi.R^2$; So: declividade em %; Ia: grau de impermeabilização do solo em %; Qp: pico do hidrograma unitário para a área total da sub-bacia em m³/s; Tp: intervalo de tempo desde o início da chuva e o pico do hidrograma unitário.

du Vernay, apresentando vazios urbanos devido à topografia local proporcionada pelos córregos dos arroios urbanos. Pode-se citar outros exemplos, como o grande espaço localizado na parte inferior das sub-bacias 3 e 5 e a porção central da sub-bacia 6, cujos locais estão à direita da Av. Presidente Kennedy, sentido trevo do Santa Paula ao trevo Eurico Batista Rosas, os quais, apesar de não encontrarem-se em regiões centrais, localizam-se muito próximas a estas e apresentam um baixo grau de urbanização.

3.3. Obtenção dos hidrogramas unitários e de enchente nas situações de pré e pós-urbanização:

Conforme exposto na metodologia, para a obtenção dos hidrogramas unitário e de enchente, é necessário a elaboração do quadro de precipitação

efetiva da sub-bacia. Na Tabela 7 pode-se observar um exemplo do cálculo da precipitação efetiva da bacia integral do Arroio da Ronda, na situação de pós-urbanização.

Analisando a Tabela 7, nota-se a presença de alguns dados destacados, os quais foram corrigidos com a finalidade de não superestimar os valores de precipitação, já que a área da bacia (22,57 km²) excede 12,5 km² e, conforme a Tabela 3, necessitam de reajuste. Tais valores também foram rearranjados com a finalidade da maior precipitação de chuva situar-se ao final dos 30 minutos, dispondo os demais de forma decrescente a partir do ponto de máximo da chuva unitária. O valor de 92,3 representa a precipitação efetiva na bacia do Arroio da Ronda com duração de duas horas, sendo que, após a correção, este valor diminuiu para 91,7 mm.

A parte final da aplicação do método CUHP é

Tabela 7 – Precipitação efetiva da bacia do Arroio da Ronda na seção S-9 na situação de pós-urbanização.

Tempo (min)	Chuva (mm)	Incremento		Área permeável				Área impermeável				Precipitação efetiva
		Natural	Arranjado	Infiltração	Detenção	Efetiva	(1-Ia).Pe	Detenção	Perda	Efetiva	Ia. Pe	
0	0,0	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
5	17,4	17,40	1,12	1,1	0,1	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,01
10	29,7	12,34	1,86	1,1	0,8	0,0	0,0	1,4	0,0	0,4	0,2	0,16
15	39,0	9,29	2,49	1,1	1,4	0,0	0,0	0,0	0,1	2,4	0,9	0,88
20	46,3	7,30	4,02	1,1	2,9	0,0	0,0	0,0	0,2	3,8	1,4	1,42
25	52,3	5,93	5,69	1,1	2,3	2,3	1,6	0,0	0,3	5,4	2,0	3,60
30	57,2	4,93	9,29	1,1	0,0	8,2	5,7	0,0	0,5	8,8	3,3	8,96
35	61,4	4,19	17,40	1,1	0,0	16,3	11,3	0,0	0,9	16,5	6,1	17,45
40	65,0	3,61	12,34	1,1	0,0	11,2	7,8	0,0	0,6	11,7	4,4	12,15
45	68,2	3,16	7,30	1,1	0,0	6,2	4,3	0,0	0,4	6,9	2,6	6,88
50	70,9	2,79	4,74	1,1	0,0	3,6	2,5	0,0	0,2	4,5	1,7	4,19
55	73,4	2,49	3,61	1,1	0,0	2,5	1,7	0,0	0,2	3,4	1,3	3,02
60	75,7	2,25	3,16	1,1	0,0	2,1	1,4	0,0	0,2	3,0	1,1	2,54
65	77,7	2,04	2,79	1,1	0,0	1,7	1,2	0,0	0,1	2,7	1,0	2,16
70	79,6	1,86	2,25	1,1	0,0	1,1	0,8	0,0	0,1	2,1	0,8	1,59
75	81,3	1,71	2,04	1,1	0,0	0,9	0,7	0,0	0,1	1,9	0,7	1,37
80	82,9	1,58	1,71	1,1	0,0	0,6	0,4	0,0	0,1	1,6	0,6	1,02
85	84,3	1,46	1,58	1,1	0,0	0,5	0,3	0,0	0,1	1,5	0,6	0,89
90	85,7	1,36	1,46	1,1	0,0	0,4	0,3	0,0	0,1	1,4	0,5	0,77
95	87,0	1,27	1,36	1,1	0,0	0,3	0,2	0,0	0,1	1,3	0,5	0,66
100	88,1	1,19	1,27	1,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	1,2	0,4	0,57
105	89,3	1,12	1,19	1,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	1,1	0,4	0,48
110	90,3	1,06	1,06	1,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	1,0	0,4	0,44
115	91,3	1,00	1,00	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,4	0,35
120	92,3	0,95	0,95	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,3	0,33
		92,3	91,7			7,5					31,4	71,88

a construção do hidrograma de enchente, tendo como base o hidrograma unitário do Arroio da Ronda, o qual foi traçado segundo os dados constantes na Tabela 8, obtidos das características apresentadas na Tabela 6 e também da tormenta crítica de projeto calculada na Tabela 7.

Com relação aos dados da Tabela 8, estes foram

Tabela 8 - Valores do hidrograma unitário referentes à bacia do Arroio da Ronda na seção S-9 na situação de pós-urbanização.

T_p (min)	Q (m^3/s)
0,00	0,00
35,41	28,65
41,05	42,97
55,00	56,73
67,79	42,97
85,94	28,65
164,81	0,00

obtidos a partir do traçado do hidrograma unitário, no qual é fornecida a vazão de pico, o intervalo de tempo desde o início da chuva até o pico do hidrograma unitário e o seu volume. Com esses dados, é traçado o hidrograma, com base na Figura 4.

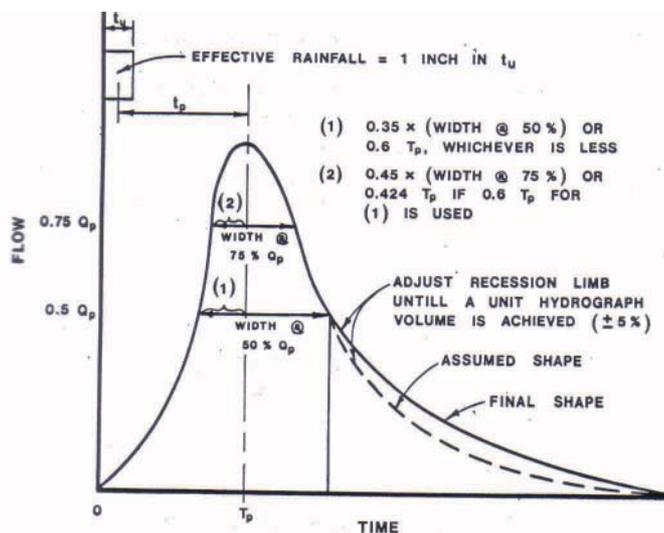


Figura 4 – Obtenção do hidrograma unitário.

Fonte: DENVER REGIONAL COUNCIL OF GOVERNMENTS (1984 apud AMARAL, 1998).

Como exemplo, apresenta-se a Figura 5, construída considerando-se os eventos individuais de precipitação com duração de 5 minutos, compondo o hidrograma resultante com base no princípio de independência da distribuição temporal de cada resposta da bacia hidrográfica.

Nota-se que a vazão de pico do hidrograma unitário estava ocorrendo após 55 minutos, com valor estimado de $56,73 m^3 \cdot s^{-1}$, adotada a tormenta crítica de projeto com duração de 120 minutos. Conforme indicação da Tabela 4, a vazão de pico no hidrograma de enchente passou a acontecer após 95 minutos, com valor estimado de $317,39 m^3 \cdot s^{-1}$, de acordo com a Figura 6.

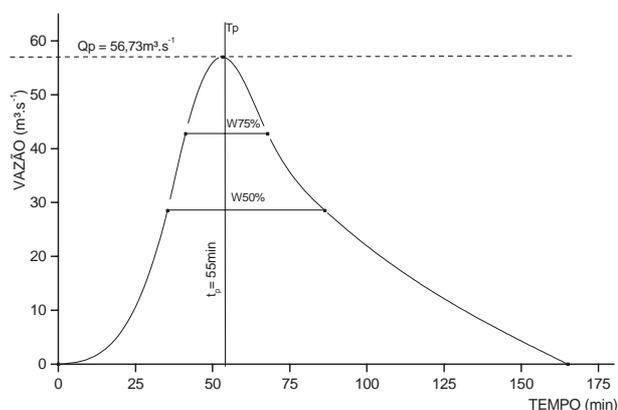


Figura 5 – Hidrograma unitário referente à bacia do Arroio da Ronda na seção S-9.

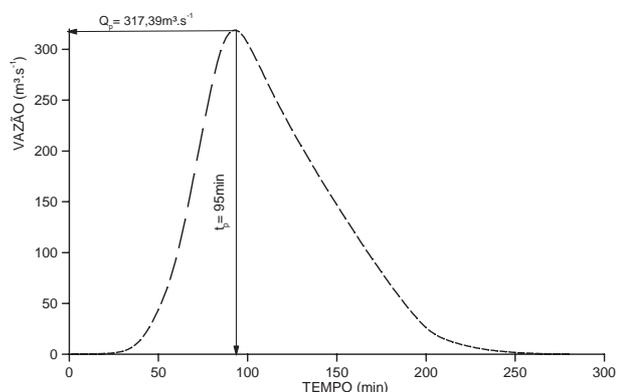


Figura 6 – Hidrograma de projeto referente à bacia do Arroio da Ronda na seção S-9.

3.4 – Sobreposição dos hidrogramas de enchentes nas situações de pré e pós-urbanização

Ao analisar a evolução da urbanização na bacia hidrográfica de estudo, algumas considerações devem ser feitas no que diz respeito aos aspectos hidrológicos. Como primeiro ponto de interesse, tem-se o tempo de concentração das sub-bacias, o qual diminuiu em grandes proporções devido ao incremento das áreas impermeáveis, as quais proporcionam um rápido escoamento pela baixa retenção das águas pluviais sob sua superfície. Antes da urbanização, o

Tabela 9 - Comparação dos hidrogramas de projeto nas situações de pré e pós-urbanização.

Sub-bacia/ seção	Pré-urbanização		Pós-urbanização	
	Q (m ³ .s ⁻¹)	tp (min)	Q (m ³ .s ⁻¹)	tp (min)
1-A	16,84	90	32,50	60
1-B	6,93	70	14,89	65
1-C	6,61	90	13,92	70
S-1	27,38	100	65,78	60
2-A	8,57	90	17,18	55
2-B	26,61	110	59,62	70
2-C	35,58	110	38,15	70
S-2	52,34	110	180,77	70
S-3	48,78	130	111,58	75
4-A	11,71	100	17,98	60
4-B	14,57	110	21,82	95
S-4	27,63	100	41,63	70
S-5	29,44	130	41,69	105
S-6	86,14	150	209,64	85
7-A	22,86	120	55,37	80
7-B	17,41	120	35,17	90
S-7	43,55	110	94,68	80
S-8	47,36	140	69,67	105
9-A	84,21	160	202,95	90
9-B	6,07	155	17,83	105
S-9	136,35	150	317,39	95

escoamento da água ficava limitado pela infiltração no solo e também pela retenção exercida pela vegetação, o que promovia um retardo do escoamento, ocasionando um maior tempo de concentração, já que a velocidade das águas pluviais era reduzida. Na bacia do Arroio da Ronda observou-se, no entanto, um comportamento anômalo apresentado na sub-bacia 1-B, conforme os resultados do hidrograma de projeto, indicados na Tabela 9, já que o tempo de concentração desta sub-bacia não sofre grandes alterações, apesar do aumento da impermeabilização do solo. Esse caso pode ser explicado pela declividade desta seção de estudo que apresenta elevados valores de inclinação (da ordem de 9%).

Como exemplo desse caso tem-se a Figura 7 abaixo, que demonstra uma pequena variação do tempo de concentração nas situações de pré e pós-urbanização.

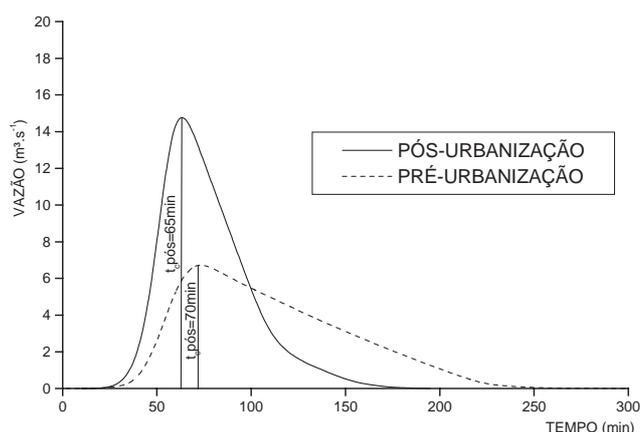


Figura 7 – Sobreposição dos hidrogramas de projeto referentes à sub-bacia 1-B.

Entretanto, ao comparar as Figuras 7 e 8, nota-se uma grande diferença em relação à defasagem dos tempos de concentração, o que pode ser explicado devido à baixa declividade que a sub-bacia 6 (na ordem de 3%) apresenta em relação à 1-B (9%), já que quanto menor a inclinação das correntes de água, menor é a velocidade, devido à equação de canais, no qual $V = \frac{S_0^{1/2} \cdot Rh^{2/3}}{n}$ onde V é a velocidade, S_0

a declividade do canal, Rh é o raio hidráulico do canal, parâmetro de forma, e “n” o coeficiente de Manning, que representa a rugosidade das paredes do canal.

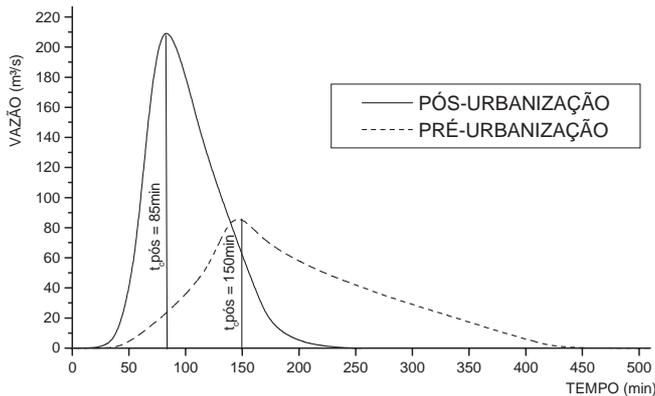


Figura 8 – Superposição dos hidrogramas de projeto referentes à seção S-6

Outro fator importante a ser considerado é o grande aumento observado nos picos dos hidrogramas, que no primeiro caso apresenta-se 2,15 vezes maior (de 6,93 para 14,89 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e no segundo, 2,43 vezes maior (de 86,14 para 209,64 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) na situação de pós-urbanização. Tal situação é explicada devido às diferenças das taxas de urbanização apresentadas pelas duas sub-bacias: enquanto a 1-B apresenta um índice de impermeabilidade de 23,9% a sub-bacia 6 apresenta índice de 36,5%. Fica claro que quanto maior o grau de impermeabilização, maior também será o pico de enchente, já que a água tende a escoar com maior facilidade com o apoio das galerias de águas pluviais que intensificam este processo.

Considerando a área compreendida entre os hidrogramas de pré e pós-urbanização (ver Figura 7 – área em destaque), essa região revela o volume

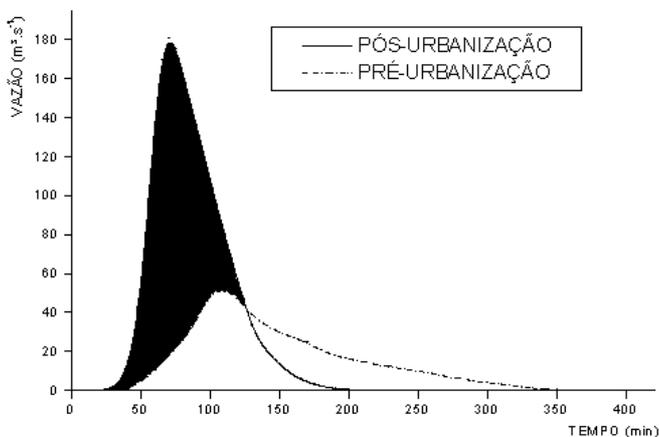


Figura 9 – Volume de água apresentado pelo processo de urbanização referente à seção S-2 do Arroio da Ronda.

que o sistema de drenagem natural tem de sobrecarga excedente, ocasionado pela incrementação da impermeabilização do solo.

Com relação à bacia como um todo, o comportamento hidrológico apresentado situou-se dentro de esperado. Houve um aumento significativo da vazão de pico (de 136,35 para 317,39 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e uma considerável defasagem entre o tempo de concentração (de 150 para 95 minutos) da situação de pré e pós-urbanização, refletindo o impacto da impermeabilização no comportamento dos hidrogramas, diminuindo o tempo de concentração da bacia e aumentando o pico de vazão do arroio.

A partir desses resultados, observa-se que o processo de urbanização alterou significativamente os valores de vazão suportados pelo córrego, visando à diminuição do pico das enchentes e também a um aumento no tempo de concentração da bacia. Com o intuito de amenizar futuros problemas de inundações, são apresentadas as seguintes sugestões: implantação de áreas permeáveis, a exemplo de parques e bosques, com a finalidade de reter o escoamento e realizar a recarga do lençol freático; também torna-se interessante a inserção de reservatórios de retenção e detenção de enchentes; e a promoção de programas sociais que visem à relocação da população que vive às margens dos arroios urbanos, de forma a recuperar os aspectos ambientais anteriores à ocupação.

4 Conclusões

Um dos maiores problemas enfrentados pela população mundial diz respeito às enchentes. Nesse sentido, torna-se evidente a preocupação de estudar as diversas causas desses fenômenos, bem como intensificar métodos de previsão de chuvas, elaborar alternativas para controle de cheias e analisar as interferências antrópicas no meio urbano, de forma a buscar uma maior integração entre as cidades com as características ambientais onde estão inseridas.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a grande interferência que a urbanização acarreta nas características hidrológicas da bacia estudada devido à significativa diminuição do tempo de concentração das bacias pelo incremento das taxas de impermeabilização dos solos e também pela existência de canais artificiais que proporcionam um escoamento mais

rápido das águas pluviais a jusante. Também deve ser levado em consideração o considerável aumento do pico de enchente, acrescido em mais de 100% em todas as sub-bacias estudadas, sufocando, desta forma, a capacidade de vazão dos arroios urbanos.

A construção e análise de hidrogramas baseados nas características físicas das bacias hidrográficas representam importante passo na elaboração de estimativas de comportamento do escoamento superficial. Assim, almeja-se que este trabalho possa vir a ser um modelo para subsidiar estudos preliminares de dimensionamento do volume para a execução de estruturas de retenção de enchentes, no caso específico de bacias urbanas da cidade de Ponta Grossa.

Espera-se com este trabalho enfatizar o impacto que a urbanização acarreta no comportamento hidrológico de uma bacia e que a melhor forma de amenizá-la é pôr em prática um conjunto de medidas preventivas, como: aumento de áreas não impermeabilizadas, desobstrução dos córregos urbanos, não ocupação da área de várzeas dos rios e preservação da qualidade ambiental dos arroios urbanos, visando a uma diminuição no pico da enchente, amenizando o risco das inundações e seus transtornos adjacentes.

Agradecimentos

Ao programa CNPq, pela concessão da bolsa através do PIBIC.

Referências

- AMARAL, K. J. **Manual de utilização do método do Colorado Urban Hydrograph Procedure – CUHP**. Ponta Grossa, 1998. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia, Universidade Estadual de Ponta Grossa.
- ANDRADE FILHO, Alceu Gomes de et al. **Planejamento ambiental do Arroio Olarias em Ponta Grossa, Pr**. Relatório Técnico, NUCLEAM/UEPG, Ponta Grossa, 2001(a).
- CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. Estimativa de área impermeável de macrobacias urbanas. **Revista Brasileira de Engenharia – Caderno de Recursos Hídricos – ABRH**. Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 79-94, dez. 1994.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo, Edgard Blücher, v. 1, 313 p, 1981.
- DENVER REGIONAL COUNCIL OF GOVERNMENTS. **Drainage criteria manual**. Denver, Colorado, USA, 1984.
- FENDRICH, R. **Coleta, armazenamento, utilização e infiltração das águas pluviais na drenagem urbana**. Curitiba, 2002. 499 p. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.
- FLORENZANO JÚNIOR, Rogério José. **Estudos preliminares para implantação de uma proposta de gestão ambiental na bacia do Arroio da Ronda, no Município de Ponta Grossa, PR**. Ponta Grossa, 1999. 90 p. Tese (Especialista em Gestão Ambiental) - Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia, Universidade Estadual de Ponta Grossa.
- FRANCO, Edu José. **Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional**. Curitiba, 2004. Tese (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- PORTO, R. et al. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: UFRGS-ABRH, 1995. 428 p.
- TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 1993.
- TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: UFRGS-ABRH, 2003. 150 p.
- SILVEIRA, A. L. L. Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre. In: SEMINÁRIO DE HIDROLOGIA URBANA E DRENAGEM, 4., Belo horizonte, 2000. **Anais...** Belo Horizonte: ABRH, 2000.