

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL

Aline de Almeida Mota

**TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM PEQUENA BACIA  
EXPERIMENTAL**

Florianópolis  
2012



Aline de Almeida Mota

**TEMPO DE CONCENTRAÇÃO EM PEQUENA BACIA  
EXPERIMENTAL**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia  
Ambiental da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do Grau  
de Mestre em Engenharia Ambiental  
Orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

Florianópolis  
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mota, Aline de Almeida  
Tempo de concentração em pequena bacia experimental  
[dissertação] / Aline de Almeida Mota ; orientador, Masato  
Kobiyama - Florianópolis, SC, 2012.  
131 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. tempo de concentração. 3.  
pequena bacia experimental. 4. Floresta Ombrófila Mista. 5.  
mecanismos de geração de vazão. I. Kobiyama, Masato. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

**“Tempo de concentração em pequena bacia experimental”**

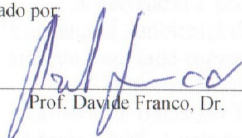
ALINE DE ALMEIDA MOTA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

**MESTRA EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:



---

Prof. Davide Franco, Dr.



---

Prof.<sup>a</sup> Alexandra Rodrigues Finotti, Dr.<sup>a</sup>



---

Prof. Jean Paolo Gomes Minella, Dr.



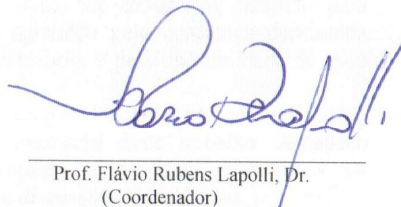
---

Prof.<sup>a</sup> Nadia Bernardi Bonumá, Dr.<sup>a</sup>



---

Prof. Masato Kobiyama, Dr.  
(Orientador)



---

Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr.  
(Coordenador)

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL  
SETEMBRO/2012



## AGRADECIMENTOS

A conclusão deste projeto de pesquisa se deu de maneira satisfatória graças à importante colaboração de instituições e pessoas. Aproveito então este espaço para expressar minha gratidão a todos que tornaram possível o êxito deste trabalho.

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, agradeço pelo auxílio financeiro em forma de bolsa de estudos e projeto de pesquisa, tornando este trabalho exequível.

À secretaria e coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, pela atenção e cuidado com os assuntos burocráticos.

A empresa Battistella Florestal, por ceder a área onde está localizada a Bacia do Rio Araçuaia, e também ao funcionário desta empresa José Lucindo (Porungo) pela ajuda sempre muito bem humorada nas visitas de campo. Assim possibilitando a realização desta pesquisa.

Aos professores que compuseram a banca examinadora agradeço pela valiosa contribuição que muito enriqueceram este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Masato, sou muito grata por além de me ensinar a ciência em termos técnicos, me mostrar o caminho para praticá-la com paixão. Também agradeço pela confiança depositada desde o primeiro momento no laboratório, e pela oportunidade de tê-lo como mestre.

Sou muito grata a todos os amigos do LabHidro, que indireta ou diretamente colaboraram para a execução deste trabalho. Agradeço especialmente aqueles que tornaram ainda mais agradáveis os fundamentais trabalhos de campo e discussões hidrológicas.

Agradeço muitíssimo às minhas amigas do coração, Melina, Pri, She e Vivian. Muito obrigada pelo carinho e por entender e perdoar minha frequente ausência!

Ao meu namorado, Fernando, pela imensa e indispensável ajuda em campo e na execução do trabalho. E também agradeço pelo constante apoio, companheirismo, senso de humor, amizade e amor que adoçam nossos dias.

Aos meus pais, pela educação, incentivo e inspiração. Aos meus irmãos pelo carinho e amor.

Muito obrigada!





“Heaven is under our feet as well as over our heads”  
(Henry David Thoreau, 1854)



## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o conceito de tempo de concentração em uma pequena bacia experimental caracterizada por vegetação secundária de Floresta Ombrófila Mista, por meio de dados monitorados de precipitação e vazão. Na série de chuva-vazão foi possível separar 30 eventos, os quais foram utilizados para calcular o tempo de concentração ( $t_c$ ), e algumas variáveis do hietograma e do hidrograma. A relação entre o  $t_c$  (variável dependente) e as variáveis independentes foi verificada por meio de uma matriz de correlação linear. Os maiores coeficientes de correlação foram, 0,90 e 0,82, obtidos da relação entre  $t_c$  e vazão de pico ( $Q_p$ ), e entre  $t_c$  e índice de precipitação antecedente ( $API$ ) de 21 dias, respectivamente. Assim propõe-se que o  $t_c$  é função da  $Q_p$  e do  $API$ :  $t_c = f(Q_p, API)$ . Para a bacia do rio Araponga, foi encontrado como mais adequado para representar o  $t_c$ , o  $API$  de 21 dias, porém este período pode variar. Estas variáveis foram utilizadas para o ajuste do modelo linear, e assim foi proposta uma nova fórmula para o cálculo de  $t_c$ :  $t_c = 0,29 \cdot Q_p + 0,08 \cdot API_{21d} - 0,24$ , onde  $t_c$  é o tempo de concentração, em (h);  $Q_p$  é a vazão máxima registrada no evento, em (L/s); e  $API_{21d}$  é  $API$  para o período de 21 dias antes do evento, em (mm). Utilizando 16 fórmulas existentes e a fórmula proposta, foram calculados valores de tempo de concentração para as 2 bases cartográficas ((1) cedida pela Prefeitura municipal de Rio Negrinho/SC; e (2) obtida a partir do levantamento topográfico detalhado da bacia). Os resultados mostram que a base cartográfica com menos detalhes acarreta em erros na estimativa dos parâmetros morfométricos da bacia, e conseqüentemente nas estimativas de  $t_c$ , chegando a até 20%. As fórmulas existentes subestimaram os valores de  $t_c$ , e apresentaram erros maiores que 90% em relação à fórmula proposta. O  $API$  está relacionado com a redistribuição da água da chuva e armazenamento de água no solo. Estes fatores são fundamentais na descrição dos mecanismos de resposta em bacias florestais, como a bacia do rio Araponga. No mesmo sentido, a forte correlação de  $t_c$  com  $Q_p$  pode estar associada ao fato de que o tempo que a bacia leva para reestabelecer o estado de umidade do início do evento é proporcional ao grau de umidade atingido por ela, já descontados os processos de perda, como interceptação, representado pela  $Q_p$ .

**Palavras-chave:** tempo de concentração; pequena bacia experimental; Floresta Ombrófila Mista; mecanismos de geração de vazão.



## ABSTRACT

The present work aims to evaluate the concept of time of concentration in a small experimental catchment covered by mixed Ombrophilous Forest using monitored precipitation and discharge data. The time of concentration ( $t_c$ ), and other characteristic variables of the hyetograph and hydrograph were computed by using data from the 30 events selected in the rainfall-runoff series. The relation between  $t_c$  (dependent variable), and the independent variables was verified by using a linear correlation matrix. The higher correlation coefficients were 0.90 and 0.82, obtained in the relation between  $t_c$  and maximum discharge ( $Q_p$ ) of the event and between  $t_c$  and  $API$  of 21 days, respectively. Therefore, it is proposed that  $t_c$  is a function of  $Q_p$  and  $API$ :  $t_c = f(Q_p, API)$ . It was found that the most adequate period of  $API$  to explain  $t_c$  of Araponga river basin is of 21 days. However it can vary with the basin characteristics. These variables were used to fit the linear regression model, and a new formula to compute  $t_c$  was proposed:  $t_c = 0.29 \cdot Q_p + 0.08 \cdot API_{21d} - 0.24$ , where  $t_c$  is the time of concentration, in (h);  $Q_p$  is the maximum discharge registered in the event, in (L/s); and  $API_{21d}$  is the  $API$  of 21 days before the event, in (mm). The values of time of concentration were computed by applying 16 existing formulae and the proposed one, considering the situation of the 2 cartographic data bases available ((1) made available by the City Hall administration of Rio Negrinho/SC; and (2) obtained from the detailed topographic survey). The results show that the less detailed cartographic basis causes errors on the estimative of morphometric parameters, and consequently the estimatives of  $t_c$  presented errors up to 20%. The existing formulae sub-estimated the values of  $t_c$ , and errors were higher than 90% in relation to the proposed formula. The  $API$  is related to rainfall water redistribution and to soil water storage. These factors are fundamental in describing the response mechanisms of forested catchments, such as Araponga river basin. On the same way, the strong correlation between  $t_c$  and  $Q_p$  may be associated to the proportionality that exists between the time that the basin takes to return to its initial humidity condition and the degree of humidity reached during the event, when discounted the process of loss, as interception, represented by  $Q_p$ .

**Keywords:** time of concentration; small experimental catchment; mixed Ombrophilous Forest; streamflow gereneration processes.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Hidrograma esquemático da vazão de equilíbrio resultante quando a duração da chuva, $t_d$ excede o tempo de equilíbrio $t_{eq}$ da bacia (Adaptado de Dingman, 2002). .....  | 37 |
| Figura 2 – Definição dos parâmetros de tempo envolvidos em um evento de chuva e seu hidrograma de resposta (Adaptado de Dingman, 2002). .....   | 38 |
| Figura 3 – Gráfico expandido por Kerby (1959) para cálculo de $t_c$ , e utilizado como base para criação da Equação 4. ....   | 43 |
| Figura 4 – Teste do vertedor. ....  | 52 |
| Figura 5 – Localização da bacia do rio Araponga. ....   | 54 |
| Figura 6 – Vegetação da ARA nas 4 estações do ano. (a) outono – 06/maio/2011; (b) inverno – 27/agosto/2011; (c) primavera – 18/novembro/2011; e (d) próximo do verão – 17/dezembro/2011. ....   | 56 |
| Figura 7 – Localização das estações de monitoramento hidrológico na ARA. ....   | 59 |
| Figura 8 – Estação Pluviométrica ARA. (a) Recomendação de distância do pluviôgrafo até os obstáculos; (b) corte de árvores no entorno do local de instalação do pluviôgrafo; e (c) estação instalada. ....  | 61 |
| Figura 9 – Estação pluviométrica do rio Araponga. (a) Estação completa; (b) Início do monitoramento: sem a tela, folhas e galhos acumulados no vertedor; e (c) Depois de um evento de chuva intensa, a tela não é capaz de reter a grande quantidade de sedimento. ....                                     | 63 |
| Figura 10 – Relação nível medido pelo sensor e na régua linimétrica. ....   | 64 |
| Figura 11 – Esquema de localização da régua linimétrica e vertedor, evidenciando o desnível entre o zero da régua e o vértice do vertedor. ....   | 64 |
| Figura 12 – Relação entre as medições de vazão e a carga hidráulica no vertedor, extrapolação da equação do vertedor e intervalo de confiança de 95%. ....  | 65 |
| Figura 13 – Estimativa hidrológica do tempo de concentração em um evento, em que identificou-se dois casos de hidrograma: (a) 1 ponto de inflexão; e (b) 2 pontos de inflexão. Nota-se que o ponto A indica o início do escoamento subsuperficial, e B é considerado início do escoamento subterrâneo. .... | 67 |

Figura 14 – Mapas de elevação da ARA. (a) Base cartográfica obtida a partir do levantamento topográfico, escala 1:5.000; e (b) Base cartográfica do levantamento aéreo da Prefeitura Municipal de Rio Negrinho, escala 1:10.000. .... 74

Figura 15 – Estatística do modelo de regressão. (a) Histograma dos resíduos; (b) Normal plot dos resíduos; e (c), (d), (e) e (f) são gráficos dos resíduos com  $Q_p$ ,  $API_{2ld}$ ,  $t_c$  calculado e observado, respectivamente.. .... 80



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores de $C_{iz}$ correspondentes ao tipo de superfície para a fórmula de Izzard (Fonte: Kibler, 1982; Silveira, 2005). .....                          | 41 |
| Tabela 2 – Valores de $N$ correspondentes ao tipo de superfície para a fórmula de Kerby-Hathaway (Fonte: Kerby, 1959). .....  | 43 |
| Tabela 3 – Resumo das fórmulas apresentadas para cálculo de tempo de concentração. ....   | 48 |
| Tabela 4 – Principais espécies encontradas na região da ARA. ....   | 57 |
| Tabela 5 – Informações sobre as medições volumétricas de vazão. ....  | 65 |
| Tabela 6 – Período das séries e estação proveniente. ....   | 66 |
| Tabela 7 – Parâmetros necessários para aplicação das fórmulas. ....   | 68 |
| Tabela 8 – Parâmetros morfométricos e comparação das duas escalas. ....   | 73 |
| Tabela 9 – Variáveis independentes medidas nos hidrogramas e hietogramas, bem como sua média, mediana e desvio padrão. ....   | 76 |
| Tabela 10 – Matriz de correlação linear simples (r-Pearson). ....   | 78 |
| Tabela 11 – Estatísticas do modelo de regressão. ....   | 79 |
| Tabela 12 – Cálculo de $t_c$ utilizando as 2 bases cartográficas e respectivos erros percentuais entre as bases e entre as fórmulas e a média de $t_c$ medido. .... | 83 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ARA – Bacia Hidrográfica do Rio Araponga  
EMMA – *End-Member Mixing Analysis*  
EUA – Estados Unidos da América  
FOM – Floresta Ombrófila Mista  
FSA – Fazenda Santa Alice  
GPS – *Global Positioning System*  
LabHidro – Laboratório de Hidrologia da Universidade Federal de Santa Catarina  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
RBMC – Rede Brasileira Monitoramento Contínuo  
SC – Santa Catarina  
SCS – *Soil Conservation Service*  
SEPLAN – Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Rio Negrinho  
SI – Sistema Internacional  
TOPMODEL – *TOPography based hydrological MODEL*  
UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura  
USDA – *U.S. Department of Agriculture*  
USGS – *U.S. Geological Survey*  
VSA – *Variable Source Area*



## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>  | <b>Descrição</b>                                      | <b>Unidade</b> |
|-----------------|---|----------------|
| $A$             | área da bacia   | $[L^2]$        |
| $API$           | índice de precipitação antecedente                    | $[L]$          |
| $A_t$           | área molhada transversal                              | $[L^2]$        |
| $c_f$           | fator de forma do canal                               | $[-]$          |
| $C_{iz}$        | coef. de retardo de Izzard                            | $[-]$          |
| $CN$            | parâmetro <i>curve number</i> do Método SCS           | $[-]$          |
| $C_b, C_n, C_v$ | concentrações do soluto considerado                   | $[M/V]$        |
| $D_{méd}$       | média da duração da chuva                             | $[T]$          |
| $E_{ex}$        | elevação na exutória da bacia                         | $[L]$          |
| $E_m$           | elevação média da bacia                               | $[L]$          |
| $H_m$           | elevação média a partir da exutória                   | $[L]$          |
| $H_v$           | carga hidráulica no vertedor                          | $[L]$          |
| $i$             | intensidade da chuva efetiva                          | $[L/T]$        |
| $i_{máx}$       | intensidade máxima                                    | $[L/T]$        |
| $K_{av}$        | condutividade hidráulica saturada média               | $[L/T]$        |
| $L$             | comprimento da bacia                                  | $[L]$          |
| $N$             | coef. de retardo de Kerby                             | $[-]$          |
| $n$             | coef. de rugosidade de Manning                        | $[T/L^{1/3}]$  |
| $P$             | precipitação total                                    | $[L]$          |
| $P_{méd}$       | média da precipitação acumulada                       | $[L]$          |
| $Q$             | vazão do vertedor                                     | $[L^3/T]$      |
| $Q_n$           | fração de água “nova”                                 | $[L^3/T]$      |
| $Q_p$           | vazão de pico   | $[L^3/T]$      |
| $Q_t$           | vazão total   | $[L^3/T]$      |
| $Q_v$           | fração de água velha                                  | $[L^3/T]$      |
| $r$             | coeficiente de correlação de Pearson                  | $[-]$          |
| $R_H$           | raio hidráulico                                       | $[L]$          |
| $S$             | declividade do talvegue principal                     | $[-]$          |
| $S_H$           | declividade da encosta                                | $[-]$          |
| $S_m$           | declividade média                                     | $[-]$          |
| $S_{SCS}$       | potencial máximo de retenção (Método SCS)             | $[L]$          |
| $t_c$           | tempo de concentração                                 | $[T]$          |
| $t_d$           | duração da chuva                                      | $[T]$          |
| $t_L$           | tempo de retardo - <i>lag time</i>                    | $[T]$          |
| $t_{Lc}$        | tempo de retardo                                      | $[T]$          |
| $t_{pk}$        | instante correspondente à vazão de pico do hidrograma | $[T]$          |
| $t_{q0}$        | início do hidrograma                                  | $[T]$          |
| $t_{qc}$        | centro de massa do hidrograma                         | $[T]$          |
| $t_{qe}$        | fim do hidrograma                                     | $[T]$          |

| <b>Símbolo</b> | <b>Descrição</b>                          | <b>Unidade</b> |
|----------------|---|----------------|
| $t_{w0}$       | início do evento de precipitação          | [T]            |
| $t_{wc}$       | centro de massa do evento de precipitação | [T]            |
| $t_{we}$       | fim do evento de precipitação             | [T]            |

## SUMÁRIO

|   |             |
|---|-------------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                           | <b>VII</b>  |
| <b>RESUMO</b> .....                                   | <b>XI</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                 | <b>XIII</b> |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....                         | <b>XV</b>   |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....                         | <b>XVII</b> |
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....           | <b>XIX</b>  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....                        | <b>XXI</b>  |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                            | <b>25</b>   |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....                             | <b>29</b>   |
| 2.1 OBJETIVO GERAL .....                              | 29          |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                       | 29          |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                 | <b>31</b>   |
| 3.1 PEQUENAS BACIAS EXPERIMENTAIS .....               | 31          |
| 3.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DE VAZÃO .....              | 33          |
| 3.3 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO.....                        | 36          |
| 3.3.1 Histórico .....                                 | 36          |
| 3.3.2 Conceito.....                                   | 36          |
| 3.3.3 Equações e métodos de estimativa .....          | 39          |
| 3.3.4 Análise e avaliação dos métodos e fórmulas..... | 49          |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                   | <b>51</b>   |
| 4.1 SELEÇÃO DA BACIA DE ESTUDO .....                  | 51          |
| 4.2 ÁREA DE ESTUDO .....                              | 53          |
| 4.2.1 Localização.....                                | 53          |
| 4.2.2 Caracterização de solo e rocha.....             | 53          |
| 4.2.3 Caracterização de flora e fauna .....           | 55          |
| 4.3 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO .....                    | 57          |
| 4.4 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO .....                   | 58          |
| 4.4.1 Dados pluviométricos .....                      | 60          |
| 4.4.2 Dados fluviométricos.....                       | 62          |
| 4.5 ESTIMATIVA DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO.....          | 66          |
| 4.6 CÁLCULO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES.....          | 69          |
| 4.7 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA .....                   | 70          |
| 4.8 ANÁLISE COMPARATIVA .....                         | 71          |

|  |            |
|--|------------|
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>73</b>  |
| 5.1 ESCALAS .....  | 73         |
| 5.2 NOVA FÓRMULA DE $t_c$ .....  | 75         |
| 5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DE $t_c$ .....   | 81         |
| <b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>  | <b>85</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>87</b>  |
| <b>APÊNDICE A – FÓRMULA DE KIRPICH (1940) PARA O<br/>CÁLCULO DE TEMPO DE CONCENTRAÇÃO .....</b>                      | <b>95</b>  |
| <b>APÊNDICE B – EVENTOS HIDROLÓGICOS UTILIZADOS NA<br/>ANÁLISE.....</b>  | <b>99</b>  |
| <b>APÊNDICE C – PARÂMETROS MEDIDOS E ADOTADOS<br/>UTILIZADOS NA APLICAÇÃO DAS FÓRMULAS DE <math>t_c</math> .....</b> | <b>130</b> |



## 1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da hidrologia é entender e descrever os mecanismos de passagem da água proveniente da precipitação até o rio. Com o propósito de compreender melhor estes processos, foram feitos muitos estudos que deram origem a conceitos para explicar os mecanismos de geração de vazão a partir de medições e observações em campo. Inclusive, o primeiro volume da série “*Benchmark Papers in Hydrology*” da Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (IAHS), publicado em 2006, selecionou os principais estudos realizados sobre o tema de processos de geração de vazão.

Estes processos estão relacionados à característica de resposta da bacia hidrográfica a eventos de precipitação. O tempo de concentração é um parâmetro de tempo de resposta de bacias hidrográficas, e apresenta certa complexidade para ser definido objetivamente. Este conceito, surgiu em 1850, justamente quando Mulvany sentiu a necessidade de estimar a resposta de uma bacia hidrográfica a um evento de chuva.

A partir de então, o tempo de concentração passou a ser amplamente pesquisado e utilizado. Em geral, praticamente qualquer análise hidrológica precisa de pelo menos um parâmetro de tempo de resposta da bacia, e na maioria das vezes esse parâmetro é o tempo de concentração (McCUEN et al., 1984). As aplicações do tempo de concentração são diversas. Por exemplo: implementação de sistemas de alerta contra inundações, projetos de drenagem urbana, separação do hidrograma, definição do intervalo de monitoramento hidrológico, e etc.

Whitehead & Robinson (1993) e Jones & Swanson (2001) relataram a importância de estudos e da observação detalhada em pequenas bacias experimentais, demonstrando como tais estudos e observações contribuíram para o avanço da hidrologia básica. Portanto, acredita-se que esses estudos ainda possam contribuir para um melhor entendimento dos processos hidrológicos e do tempo de concentração de uma bacia.

Entretanto, para que os processos hidrológicos monitorados não sejam confundidos com tendências ou ruídos, é importante saber em que escala acontecem, e utilizar uma escala espaço-temporal adequada para observá-los. A escala do fluxo subsuperficial não-saturado é relativa a 1 m de perfil de solo, (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995). Então, o uso de pequenas bacias, e até apenas encostas destas bacias é extremamente adequado.

No Brasil, há grande carência de dados hidrológicos de pequenas bacias. A instalação e coleta de dados tiveram como seu principal agente

o setor de geração de energia elétrica. Desta forma, há poucos postos em bacias com menos de 500 km<sup>2</sup>. O monitoramento das pequenas bacias reveste-se, portanto, de fundamental importância para complementação da rede de informações hidrológicas, além de sua natural vocação para o estudo do funcionamento dos processos físicos, químicos e biológicos atuantes no ciclo hidrológico (PAIVA & PAIVA, 2001).

Os diversos estudos sobre geração de vazão com bacias experimentais se concentraram principalmente em regiões temperadas. Assim, como os solos tropicais possuem características diferentes, a implementação de experimentos para estudo do mecanismo de geração de vazão em clima tropical e subtropical é necessária, pois estes mecanismos devem ser diferentes também (DYKES & THORNES, 2000).

Não apenas o tipo de solo, mas também seu uso e cobertura podem influenciar nos mecanismos de resposta e inclusive no tempo de concentração. O entendimento dos processos hidrológicos em bacias caracterizadas por floresta nativa pode ser muito útil para avaliar a interferência causada pelos usos e cobertura resultante de modificações antrópicas.

Considerando as diferentes funções em diferentes componentes do ecossistema florestal, Kobiyama et al. (2008) resumidamente apresentaram que as funções das florestas são: (1) atenuação do clima (temperatura e umidade), (2) atenuação do hidrograma (redução da enchente e recarga ao rio), (3) controle de erosão, (4) melhora da qualidade da água no solo e no rio, (5) redução da poluição atmosférica, (6) fornecimento de oxigênio (O<sub>2</sub>) e fixação do gás carbono (CO<sub>2</sub>), (7) redução do vento e barulho, (8) amenidade, recreação e educação, (9) produção de biomassa, remédios, alimentos, etc. (10) fornecimento de energia, entre outras. A principal característica da floresta pode ser considerada como a ocorrência simultânea de todas as suas funções, mesmo que em maior ou menor grau.

Diante disto, no Brasil, existem leis que visam a proteção do bioma Mata Atlântica (BRASIL, 2006) e dos remanescentes de Floresta Ombrófila Mista - FOM (BRASIL, 2002). No capítulo II da Lei nº 11.428 são apresentados os objetivos específicos da utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e um deles, no mesmo nível de importância que a salvaguarda da biodiversidade, é a salvaguarda do regime hídrico (BRASIL, 2006). E na Portaria nº 49 do Ministério do Meio Ambiente é prevista a criação de um grupo de trabalho para preservação dos remanescentes de FOM especificamente no estado de Santa Catarina.

O manejo do solo e preservação dos remanescentes de FOM também é tema de discussão na região do município de Rio Negrinho/SC, onde a cobertura vegetal original, caracterizada predominantemente pela floresta de araucária (FOM), foi degradada pela exploração de seus espécimes e até pela substituição para utilização do solo para reflorestamento e agricultura. Diante disso, ambientalistas e comunidades começaram a questionar o uso de solo mais adequado para a preservação dos recursos hídricos. Neste caso, uma base para a tomada de decisões é primeiramente compreender a dinâmica dos recursos hídricos em ambientes preservados.

Para que os remanescentes sejam preservados, é necessário que sejam realizadas atividades de monitoramento hidrológico nestas áreas. Isso significa que proteger o regime hídrico implica em, primeiramente, quantificar os recursos hídricos, e promover o uso racional.

O monitoramento hidrológico representa uma das atividades de maior importância para tomadas de decisão adequadas no que diz respeito ao planejamento, aproveitamento e controle de recursos hídricos. Além disso, diversos avanços científicos na hidrologia são atribuídos a experimentos de monitoramento em campo. Como o desenvolvimento do conceito de área variável de contribuição (McDONELL, 2009).

Neste sentido, o presente trabalho apresenta o estudo de tempo de concentração, a partir de monitoramento hidrológico intensivo em uma pequena bacia experimental caracterizada por vegetação secundária de FOM, no intuito de compreender os mecanismos de resposta nesta bacia.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar o conceito de tempo de concentração em pequena bacia experimental caracterizada por vegetação secundária de Floresta Ombrófila Mista.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Demonstrar a influência do levantamento topográfico detalhado na caracterização de pequena bacia, assim como sua importância nas estimativas de tempo de concentração;
- Identificar as principais variáveis hidrológicas que explicam o tempo de concentração na bacia do rio Araponga, e propor uma nova fórmula para estimativa de tempo de concentração;
- Estimar o tempo de concentração com métodos existentes na literatura;
- Comparar as estimativas de tempo de concentração entre os métodos existentes e a nova fórmula proposta.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 PEQUENAS BACIAS EXPERIMENTAIS

Pequena ou microbacia hidrográfica é uma bacia hidrográfica com algumas peculiaridades. A definição de bacia hidrográfica é a área delimitada por um divisor topográfico de águas que drena a água (escoamento superficial) para um único ponto convergente, a exutória.

Ainda não existem critérios definitivos e universalmente aceitos para classificação de pequena bacia, porém, conforme a perspectiva, os pesquisadores propuseram limites de tamanho para as microbacias.

No Brasil, Rocha & Kurtz (2001) definiram microbacia desde a perspectiva do planejamento integrado com enfoque em atividades de reflorestamento. Segundo esses autores, microbacia é a bacia que tem área menor que 20.000 hec (200 km<sup>2</sup>), em cartas com escala de 1:50.000. Eles consideram que esta seja a área máxima que uma equipe de campo deve trabalhar para o Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas.

Na área da hidrologia urbana, Ponce (1989) define pequena bacia como sendo aquela na qual a vazão pode ser modelada considerando que a chuva seja constante no tempo e no espaço. O mesmo autor propõe que bacias que apresentem todas ou algumas das 5 propriedades listadas a seguir podem ser consideradas pequenas bacias na hidrologia:

1. a chuva é distribuída uniformemente no tempo;
2. a chuva é distribuída uniformemente no espaço;
3. a duração da chuva geralmente excede o tempo de concentração;
4. a principal componente do escoamento é o superficial;
5. os processos de armazenamento no canal são desprezíveis.

Apesar de os limites existentes para definir pequenas bacias incluïrem sempre algum grau de arbitrariedade, segundo Ponce (1989), algumas autoridades consideram que bacias com tempo de concentração menor que 1 h, ou área menor que 2,5 km<sup>2</sup>, podem ser ditas pequenas.

Em pequenas bacias, a tendência é que a variabilidade espacial de variáveis como cobertura vegetal, tipo de solo, pedologia, e etc seja menor (PAIVA & PAIVA, 2001). Principalmente por isso, foram e são amplamente utilizadas como bacias experimentais.

Para que determinados processos hidrológicos monitorados não sejam confundidos com tendência ou ruído, é importante estudar a escala espaço-temporal em que acontecem e aquela em que devem ser observados. Segundo Blöschl & Sivapalan (1995) os processos

hidrológicos ocorrem em uma ampla faixa de escalas, desde o fluxo não-saturado em 1 m de perfil de solo, até muitos km<sup>2</sup> quando se trata da inundação em um sistema fluvial.

Uma escala de monitoramento que foi amplamente aplicada na hidrologia é a de pequena bacia experimental (ROTHACHER, 1970; HEWLETT & HIBBERT, 1967; McGLYNN et al., 2002). Hewlett et al. (1969) esclarecem sobre a definição de bacia experimental: bacia onde experimentos planejados são ou serão realizados e os resultados de observações de vazão, precipitação e outras variáveis hidrológicas são constantemente analisadas. Então, pequenas bacias monitoradas ao acaso por um período e que tem as séries de dados analisadas posteriormente não podem ser ditas bacias experimentais.

Bacias experimentais são bacias relativamente homogêneas no que se refere a solo e vegetação e que possuem características físicas uniformes, onde são efetuados estudos detalhados do ciclo hidrológico. Por isso, geralmente estas bacias são pequenas, com área de no máximo 4 km<sup>2</sup> (TOEBES & OURYVAEV, 1970).

Durante a Década Internacional da Hidrologia (1965-74), promovida pela UNESCO, diversas bacias experimentais foram implementadas no intuito de possibilitar aos países a realização de uma avaliação completa de seus recursos hídricos, e promover o uso racional dos mesmos (TOEBES & OURYVAEV, 1970).

Whitehead & Robinson (1993) relatam a história da hidrologia de bacias experimentais, e como esta área da ciência hidrológica rendeu avanços não só para a ciência da água, mas também para o entendimento de processos físicos, biológicos e químicos envolvidos na ecologia de bacias. Em concordância, Jones & Swanson (2001) avaliam que o emprego de estudos em pequenas bacias ainda pode render muitos avanços para as ciências hidrológicas e ecológicas.

Uma das descobertas e avanços mais significativos da hidrologia se deu a partir de observações em bacias experimentais florestais. A ausência de ocorrência de escoamento superficial, fato que levou os cientistas a rever todo o mecanismo de geração de vazão. Então, estas pesquisas conduziram a criação do conceito de que a fonte do escoamento subsuperficial é uma área variável ao longo do canal do rio (HEWLETT & HIBBERT, 1961; RAGAN, 1967; TSUKAMOTO, 1963).

Este tipo de descoberta, realizada a partir de bacias experimentais, conduz o avanço no sentido de melhorar as previsões e o controle da vazão em regiões de montanha (HEWLETT et al., 1969).



McDonnell (2009) discute a contribuição de Hewlett & Hibbert (1967) para a hidrologia, principalmente o conceito de área variável de contribuição (*variable source area* - VSA). O autor evidencia que novas teorias na hidrologia são incomuns, e que o conceito de VSA é um dos mais importantes e duradouros da hidrologia de bacia hidrográfica. McDonnell (2009) atribui este avanço ao monitoramento desenvolvido em campo, e lamenta que atualmente as observações em campo sejam renegadas e reduzidas a esforços mínimos apenas para conseguir parâmetros para modelos hidrológicos. Assim, ele valoriza o monitoramento hidrológico.

Segundo Farrell (1995) os benefícios do conhecimento adquirido e das tecnologias desenvolvidas utilizando dados de bacias experimentais atingem a ciência e a sociedade. Porém, ainda existem muitos desafios para serem resolvidos, e que requerem ainda mais monitoramento hidrológico.

### 3.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DE VAZÃO

A hidrologia é a ciência que estuda a água através do ciclo hidrológico. Os processos do ciclo hidrológico, por sua vez, são compostos por subprocessos. A vazão é um dos processos hidrológicos mais importantes que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Para sua melhor compreensão, a vazão no rio pode ser separada em porções de acordo com o percurso que descreve para chegar ao rio. Assim, os componentes da vazão são classificados por Kulandaiswamy & Seetharaman (1969) como:

- Escoamento superficial: água que escoar sobre a superfície da bacia hidrográfica até um canal de drenagem (é computada a precipitação que cai diretamente sobre o rio);
- Escoamento subsuperficial: água que infiltra no solo, e escoar lateralmente pelo solo até o rio;
- Escoamento subterrâneo (ou de base): água do aquífero ou lençol freático que escoar para o rio.

O estudo dos mecanismos de geração de escoamento consiste na compreensão qualitativa e quantitativa de cada componente da vazão.

Horton (1933) foi pioneiro no estudo de geração de vazão, e criou o clássico conceito de geração de escoamento superficial (FREEZE, 1974). Horton descreve que a água proveniente da precipitação infiltra no solo da bacia. A taxa de infiltração decresce no tempo até atingir um valor limite, definido como capacidade de infiltração, que é uma

característica própria de cada solo. A partir desse momento, se a intensidade da chuva exceder a capacidade de infiltração, então se acumulará água na superfície, e gerará escoamento superficial (HORTON, 1933).

Esse conceito, conhecido como escoamento “hortoniano” (*overland hortonian flow*), se aplica muito bem em bacias hidrográficas de regiões semi-áridas e áridas com pouca cobertura vegetal e solo compactado, onde praticamente não há armazenamento pelo solo e a geração de vazão é dominada pelo escoamento superficial. Porém, para áreas com capacidade de infiltração maior e caracterizadas por cobertura vegetal, esse conceito não é identificado em campo. Santos (2009) verificou, em uma bacia caracterizada por reflorestamento de Pinus, a não ocorrência de escoamento do tipo “hortoniano”.

Assim, surgiram outros conceitos que se aplicam melhor a bacias hidrográficas mais heterogêneas e localizadas em regiões úmidas. Betson (1964) criou o conceito de área parcial de contribuição (*partial area contribution*) ao reconhecer que o escoamento superficial é gerado em algumas áreas da bacia, e outras nunca ou raramente contribuem com o escoamento superficial. Hewllet (1961a, 1961b) definiu o conceito de VSA, em que a área de geração de escoamento superficial é variável durante o evento de precipitação.

Estudos reconheceram a importância das características do solo, topografia e sua influência na geração de escoamento superficial através de medições em campo (TSUKAMOTO, 1963; AMERMAN, 1965).

Dunne & Black (1970a, 1970b) aprimoraram o conceito de área variável, introduzindo a idéia de escoamento superficial por saturação. Nessas áreas o escoamento superficial ocorre no solo saturado pelo aumento no nível freático alimentado pela precipitação. Os parâmetros determinantes do processo são topografia, geologia e tipo de solo.

Em resumo, as principais teorias são: escoamento “hortoniano”, área parcial de contribuição – escoamento superficial; área variável de contribuição – escoamento superficial e área variável de contribuição – escoamento subsuperficial (FREEZE, 1974).

O hidrograma é a representação gráfica dos valores de vazão no tempo. A separação das componentes do escoamento (análise do hidrograma) pode ser feita com base em parâmetros gráficos do próprio hidrograma, e características da bacia. Kulandaiswamy & Seetharaman (1969), utilizando o método de Barnes (1940), tentaram separar o hidrograma em 3 componentes: escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. Porém, assim como Linsley & Ackermann (1942), apenas

conseguiram diferenciar duas componentes, escoamento superficial e subterrâneo.

Além dos métodos gráficos, podem ser utilizados métodos baseados em concentração de traçadores químicos ou isótopos naturais na água proveniente de cada componente responsável pela geração de vazão (SKLASH, 1990). Ao utilizar essa técnica, considera-se que a água no rio é composta por uma mistura de duas partes: água “velha”, água que já estava no rio, proveniente do escoamento subsuperficial ou subterrâneo; e água “nova”, água da chuva ou do derretimento da neve no evento considerado. Então, devem ser medidas as concentrações de traçador na água da chuva (nova), na água do rio antes (velha) e durante o evento de precipitação. Além disso, é necessário realizar medição de vazão. Resolvendo as Equações (1) e (2), baseadas na equação da continuidade e conservação de massa respectivamente, pode-se obter as frações de água “nova” e “velha” (SKLASH & FARVOLDEN, 1979).

$$Q_t = Q_n + Q_v \quad (1)$$

$$C_t Q_t = C_n Q_n + C_v Q_v \quad (2)$$

onde  $Q_t$  é a vazão total;  $Q_n$  é a fração de água “nova”; e  $Q_v$  é a fração de água velha, todas na exutória; e  $C_t$ ,  $C_n$ ,  $C_v$  são suas respectivas concentrações do soluto considerado.

Dincer et al. (1970), Zektser (1963) e outros autores obtiveram resultados satisfatórios através da aplicação de isótopos (oxigênio-18, deutério e trítio) para separação entre água “nova” e “velha”.

As técnicas para separação em 2 componentes computam o escoamento subsuperficial e subterrâneo juntos. Porém, o escoamento subsuperficial foi identificado por Hewlett & Hibbert (1967) e Kennedy et al. (1986) como componente importante na geração de vazão. Portanto, os estudos começaram a aplicar a separação em pelo menos três componentes (DEWALLE et al., 1988; BAZEMORE et al., 1994; OGUNKOYA & JENKINS, 1993).

Christophersen et al. (1990) e DeWalle et al. (1988) foram motivados a estudar qual a maior fonte responsável pela geração de vazão para poder relacionar com a acidificação da água pelas concentrações de alumínio.

Outra técnica amplamente aplicada é a análise conjunta de *end-members* (EMMA – *End-Member Mixing Analysis*). Nesse método, considera-se que a composição química da água no rio pode ser analisada por uma mistura de determinados componentes *end-member* (traçadores geoquímicos) na água do solo (CHRISTOPHERSEN et al., 1990). Essa técnica utiliza mais traçadores do que a quantidade de

componentes a determinar. Utilizando EMMA, Robson & Neal (1990) e Hooper et al. (1990) concluíram que a qualidade da água está intimamente relacionada à composição química do solo e é afetada pelos diferentes usos e coberturas.

### 3.3 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

#### 3.3.1 Histórico

Na tentativa de relacionar o efeito de uma chuva sobre uma bacia hidrográfica, Mulvany (1850) descreveu um método muito similar ao conhecido como método racional. Segundo Singh (1976), acredita-se que neste trabalho se encontra a primeira exposição clara sobre o conceito de tempo de concentração ( $t_c$ ). Mulvany (1850) definiu tempo de concentração como o tempo necessário para a chuva que cai no ponto mais remoto da bacia chegar à exutória, ou ainda, até que toda a área da bacia contribua para a vazão na exutória. Neste momento acontece a vazão máxima, e por isso, pode-se dizer que o conceito de tempo de concentração é a base do método racional (BRUTSAERT, 2005).

Posteriormente a definição e o conceito de tempo de concentração foram sendo aprimorados de acordo com a perspectiva considerada. Atualmente conclui-se que o ponto mais remoto é determinado hidráulicamente, e não só pela maior distância.

#### 3.3.2 Conceito

O entendimento teórico de tempo de concentração é, de certa maneira, consenso entre os cientistas e comunidade técnica, porém a maneira prática de determiná-lo utilizando dados de chuva e vazão não é muito precisa. Consiste em definir o tempo entre o final da chuva efetiva e o ponto de inflexão do hidrograma resultante daquele evento, ou momento final do escoamento direto.

Dingman (2002) define  $t_c$  como um conceito muito útil para visualizar a resposta hidrológica. Considera-se que quando a chuva efetiva continua em taxa constante por uma duração igual ou maior que  $t_c$ , a vazão de resposta será constante e na mesma taxa que a chuva efetiva, até que a chuva acabe (Figura 1). A essa condição se denomina vazão de equilíbrio, e o momento em que a taxa de chuva e vazão se igualam é chamado de tempo de equilíbrio, que pode ser considerado o tempo de concentração aparente. Alguns autores preferem utilizar o conceito de tempo de equilíbrio como sinônimo para  $t_c$  na dedução de fórmulas empíricas ou teóricas (BUTLER, 1977). Wong (2005) definiu como tempo de concentração “medido” o intervalo do fim da chuva

efetiva até o momento que o hidrograma chega a 95% do escoamento de equilíbrio.

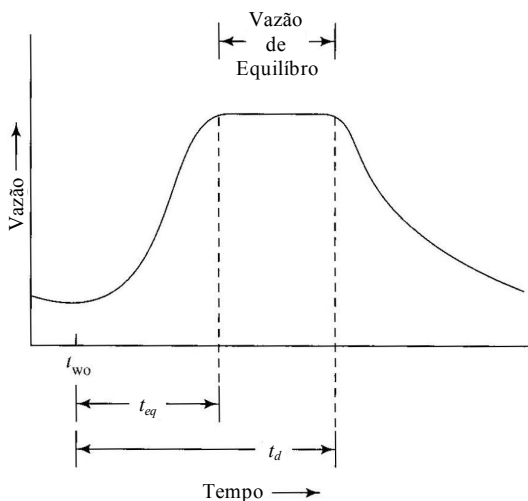


Figura 1 – Hidrograma esquemático da vazão de equilíbrio resultante quando a duração da chuva,  $t_d$  excede o tempo de equilíbrio  $t_{eq}$  da bacia (Adaptado de Dingman, 2002). Nota-se que  $t_{w0}$  é o tempo de início da precipitação.

Além do  $t_c$ , existem outros parâmetros de tempo que estão envolvidos na descrição de um hietograma efetivo e seu respectivo hidrograma de resposta (Figura 2). Estes parâmetros são função de características da bacia, como tamanho, forma, declividade, características do solo, geologia, entre outros (DINGMAN, 2002).

O tempo de retardo  $t_L$ , conhecido também como *lag time*, é um parâmetro tão utilizado quanto o  $t_c$ . A determinação do  $t_L$  pode ser de 2 maneiras mais comuns apresentadas na literatura. Segundo Dingman (2002), a primeira, e mais útil, por representar o tempo de resposta da bacia, é o tempo entre os centroides do hietograma e do hidrograma (*centroide lag time* -  $t_{Lc}$ ). A segunda é o intervalo de tempo entre o centroide da precipitação e o pico do hidrograma (*peak lag time* -  $t_L$ ). A última é mais utilizada, por conta da maior dificuldade em se determinar o centroide do hidrograma (McCUEN et al., 1984). Alguns autores, entre eles (DOOGE, 1973), no relatório USDA-SCS, também denominam o  $t_L$ , como *time lag to peak*.

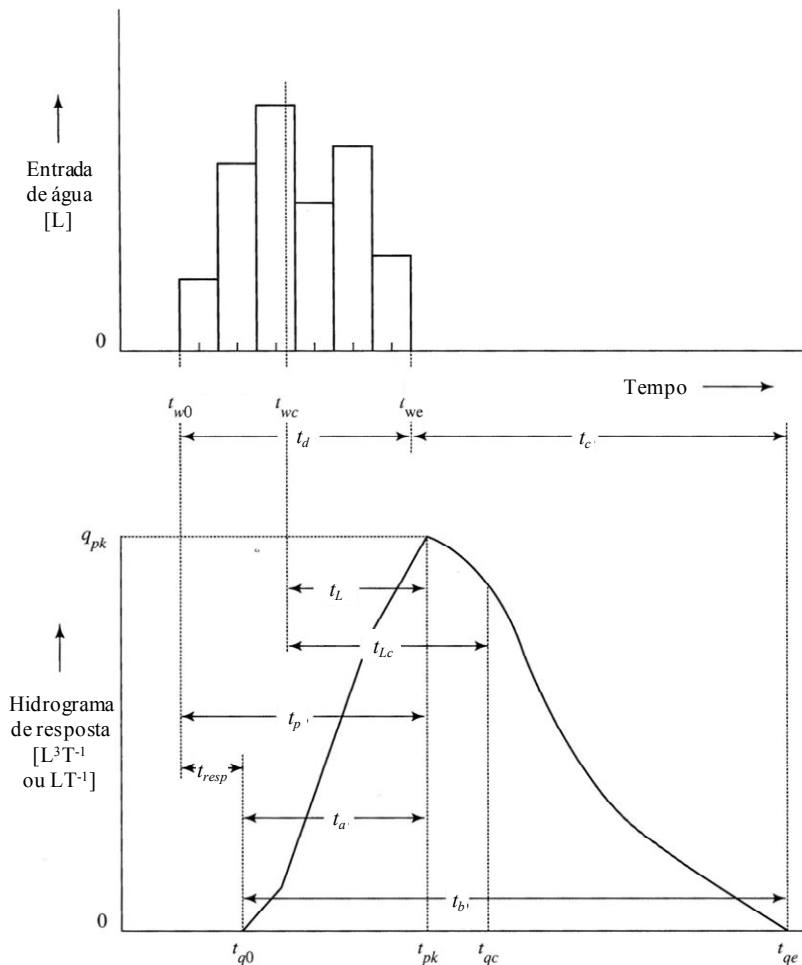


Figura 2 – Definição dos parâmetros de tempo envolvidos em um evento de chuva e seu hidrograma de resposta (Adaptado de Dingman, 2002). Nota-se que  $t_{w0}$ ,  $t_{we}$  e  $t_{wc}$  são os instantes correspondentes ao início, fim e centro de massa do evento de precipitação;  $t_{q0}$ ,  $t_{qc}$ ,  $t_{pk}$  e  $t_{qc}$  são os instantes correspondentes ao início, fim, pico e centro de massa do hidrograma.

O  $t_L$  ou  $t_{Lc}$  também podem ser determinados por fórmulas empíricas, assim como o  $t_c$ . Como cada fórmula empírica ou teórica tem restrições de aplicação, buscou-se relacionar estes 3 parâmetros de tempo. Dessa maneira é possível calcular um determinado parâmetro de tempo por uma fórmula adequada para a bacia e/ou região em questão, e

utilizando a relação entre  $t_L$ ,  $t_{Lc}$  e  $t_c$ , obter outro parâmetro de tempo de interesse.

As relações mais utilizadas são entre o  $t_c$  e alguma das alternativas de tempo de retardo. McCuen et al. (1984) e Singh (1991) resumiram as principais relações. A Equação (3) foi indicada no relatório da USDA-SCS por Kent (1973). Conforme relatado por McCuen et al. (1984), Overton & Meadows (1976) chegaram na Equação (4) utilizando proporcionalidade do hidrograma unitário triangular do SCS. A partir das duas últimas equações é possível obter a Equação (5).

$$t_L = 0,6 \cdot t_c \quad (3)$$

$$t_L = 0,85 \cdot t_{Lc} \quad (4)$$

$$t_{Lc} = \frac{0,6}{0,85} \cdot t_c \quad (5)$$

onde  $t_L$  é o tempo de retardo do centro de massa do hietograma da chuva efetiva até o pico do hidrograma;  $t_c$  é o tempo de concentração; e  $t_{Lc}$  é o tempo de retardo determinado pelo intervalo entre os centros de massa do hietograma da chuva efetiva e do hidrograma. Todos na mesma unidade de tempo.

Outro parâmetro de tempo importante é o tempo de trânsito, que é o intervalo necessário para um determinado volume de água escoar de um ponto a outro. Também está relacionado às características da bacia, e por isso, muitas vezes é utilizado como equivalente do tempo de concentração (GERGOV, 1971).

Aron et al. (1991) alertam que a prática de se dividir o percurso da bacia em diferentes tipos de escoamento, por exemplo, superficial e canalizado, e calcular o tempo de trânsito de cada trecho e depois somar para obter o  $t_c$  da bacia toda pode acarretar erros. Isso porque não é considerada a velocidade de entrada em cada trecho.

### 3.3.3 Equações e métodos de estimativa

Vários artigos que trataram do assunto de  $t_c$  e/ou propuseram fórmulas de  $t_c$  são antigos, e muitas vezes, é difícil ter acesso aos artigos originais. Então, o que acaba acontecendo na prática é a citação de outra citação, sem a verificação dos originais, como também observou Silveira (2005). Um exemplo disso é a fórmula de Kirpich. O autor não propôs a formulação explícita de  $t_c$  em seu trabalho publicado em 1940. Este fato sobre a fórmula de Kirpich (1940) é discutido mais detalhadamente no Apêndice A.

a) Fórmula de Kirpich:

Como dito anteriormente, esta equação foi demonstrada, porém não explicitamente publicada pelo então engenheiro civil, contratado como engenheiro hidráulico assistente no Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (*U.S. Army Corps of Engineers*) em Baltimore.

Kirpich (1940) utilizou os dados de 6 pequenas bacias rurais e com alguma porcentagem de reflorestamento do trabalho de Ramser (1927) (ver Tabela A1). As bacias tinham área entre 0,0051 e 0,4533 km<sup>2</sup> (1,25 e 112 acres), e Kirpich (1940) recomendou que suas curvas de ajuste sejam aplicadas apenas para pequenas bacias rurais com área entre 0,0040 e 0,8094 km<sup>2</sup> (1 e 200 acres).

Neste trabalho será considerada como equação de Kirpich o melhor ajuste para os dados (Equação A4 = Equação 6) com a conversão de  $t_c$  para horas. O desenvolvimento pode ser visto no Apêndice A.

$$t_c = 0,0620 \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,80} \quad (6)$$

onde  $t_c$  é o tempo de concentração, em (h);  $L$  é o comprimento da bacia em linha reta da exutória até o divisor, em (km); e  $S$  é o desnível entre a exutória e o divisor da bacia dividido pelo comprimento, em (m/m).

b) Fórmula de Pasini:

Greppi (2005) sugeriu que a Equação (7) seja aplicada para bacias pequenas, e com pouca declividade.

$$t_c = 0,108 \cdot \frac{\sqrt[3]{A \cdot L}}{\sqrt{S}} \quad (7)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $A$  é a área da bacia, em (km<sup>2</sup>);  $L$ , em (km); e  $S$ , em (m/m).

São poucos os trabalhos que aplicam esta fórmula, porém como é recomendada para bacias pequenas foi selecionada. Segundo Luino et al. (2009), que aplicaram esta fórmula em um estudo de inundações, ela foi publicada no trabalho de Pasini (1914).

c) Fórmula de Giandotti:

Esta fórmula (Equação 8) foi desenvolvida com uma base de dados de bacias da região da Itália setentrional e central, com tamanho bem variado de 170 a 70.000 km<sup>2</sup> (GREPPI, 2005). Apesar de não ter se difundido muito no Brasil, na Europa, principalmente na Itália é muito utilizada. Assim, diversos autores têm aplicado esta fórmula para bacias



italianas e obtido resultados coerentes (ROSSI, 1974; DESSENA et al., 1991; BERTOLI & MOISELLO 1994; LÓPEZ et al., 2010; NAPOLITANO et al., 2010; GRIMALDI et al., 2011; PRETI et al., 2011; RADICE et al., 2012)

Berti et al. (1999), López et al. (2010) e Radice et al. (2012) destacam que esta fórmula é indicada principalmente para bacias de montanha.

$$t_c = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{H_m}} \quad (8)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $A$ , em (km<sup>2</sup>);  $L$ , em (km); e  $H_m$  é a elevação média a partir da exutória, em (m).

Como o parâmetro  $H_m$  não é comumente encontrado nas fórmulas, alguns trabalhos o utilizaram de maneira equivocada. É importante alertar para a estimativa correta de todos os parâmetros das fórmulas, principalmente os mais incomuns, para evitar erros.

#### d) Fórmula de Izzard:

Esta fórmula foi desenvolvida com base em experimentos de laboratório a respeito de escoamento superficial em rodovias e gramados realizados pelo antigo Departamento de estradas dos Estados Unidos da América (Bureau of Public Roads, atualmente Federal Highway Administration). É necessário iterar para obter solução com esta equação, por isso sua utilização é morosa. Deve ser observada a condição de que o produto de  $L$  por  $i$  seja menor ou igual a 500 nas unidades inglesas (no SI este valor é 3,87) (KIBLER, 1982).

$$t_c = 85,5454 \cdot \left(\frac{L}{S}\right)^{0,333} \cdot \left(\frac{i^{0,333}}{36286} + \frac{C_{iz}}{i^{0,667}}\right) \quad (9)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $L$ , em (km);  $i$  é chuva efetiva, em (mm/h); e  $C_{iz}$  é o coeficiente de retardo de Izzard, adimensional. Os valores de  $C_{iz}$  podem ser obtidos com base em Kibler (1982) e Silveira (2005) (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores de  $C_{iz}$  correspondentes ao tipo de superfície para a fórmula de Izzard (Fonte: Kibler, 1982; Silveira, 2005).

| <b>Tipo de superfície</b>    | <b><math>C_{iz}</math></b> |
|------------------------------|----------------------------|
| Pavimento muito liso         | 0,007                      |
| Pavimento de concreto        | 0,012                      |
| Pavimento de cascalho-betume | 0,017                      |
| Gramado aparado              | 0,046                      |
| Gramado denso                | 0,060                      |

e) Fórmula de Johnstone

Segundo Dooge (1973), Johnstone & Cross (1949) desenvolveram esta fórmula com base em dados de 19 bacias com área entre 64,8 e 4206,1 km<sup>2</sup>, na região do rio Scioto-Sandusky, nos EUA.

$$t_c = 0,4623 \cdot L^{0,5} \cdot S^{-0,25} \quad (10)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $L$ , em (km);  $S$  é a declividade do canal principal, em (m/m).

f) Fórmula de Dooge

O'Kelly (1955) desenvolveu uma primeira versão desta fórmula a com base em dados de 10 bacias na Irlanda, com área entre 145 e 948 km<sup>2</sup> (DOOGE, 1973). A partir desta equação, Dooge (1956) deduziu sua fórmula para cálculo de tempo de concentração.

$$t_c = 0,3649 \cdot A^{0,41} \cdot S^{-0,17} \quad (11)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $A$ , em (km<sup>2</sup>);  $S$  é a declividade do canal principal, em (m/m).

g) Fórmula de Kerby-Hathaway

A Equação (12) foi desenvolvida com base em dados de bacias pequenas onde o escoamento superficial é dominante (McCUEN et al., 1984). Em 1945, esta base de dados foi explorada pelo engenheiro civil Gail Hathaway, que desenvolveu diagramas para obtenção do tempo de concentração do escoamento superficial. Posteriormente, Kerby (1959) publicou o método que o autor descreve como sendo uma expansão dos esquemas publicados por Hathaway (1945) (Figura 3). Kerby (1959) combina as Equações (12) e (13), para obter a Equação (14). Na última equação,  $t_c$  pode ser isolado para obtenção da Equação (15), que é a forma mais conhecida da fórmula de Kerby-Hathaway, porém com uma correção no arredondamento do coeficiente. No desenvolvimento da fórmula aparece o parâmetro  $L''$ , que é o comprimento necessário para obter o cálculo de vazão correto. Porém, na fórmula final resta apenas o comprimento da bacia, que é um parâmetro obtido mais facilmente.

$$L'' = \frac{L \cdot N}{4 \cdot \sqrt{S}} \quad (12)$$

$$L'' = \frac{t_c^{2,14}}{2,66} \quad (13)$$

$$t_c^{2,14} = \frac{2 \cdot L \cdot N}{3 \cdot \sqrt{S}} \quad (14)$$

onde  $t_c$ , em (min);  $L''$  é o comprimento necessário para obter o cálculo de vazão correto, em (pé);  $L$ , em (pé);  $S$ , em (pé/pés); e  $N$  é o coeficiente de retardamento do escoamento superficial, adimensional (valores de referência para este coeficiente podem ser obtidos na Tabela 2).

$$t_c = 0,6061 \cdot \left( \frac{L \cdot N}{\sqrt{S}} \right)^{0,467} \quad (15)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $L$ , em (km);  $S$ , em (km/km); e  $N$  é adimensional.

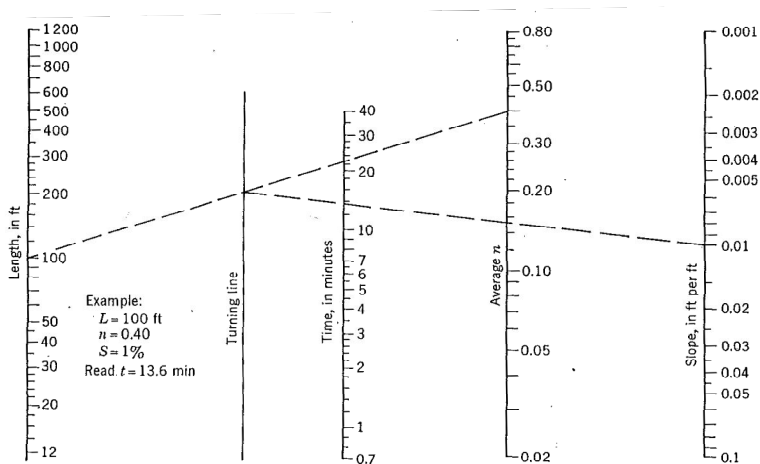


Figura 3 – Gráfico expandido por Kerby (1959) para cálculo de  $t_c$ , e utilizado como base para criação da Equação 4.

Tabela 2 – Valores de  $N$  correspondentes ao tipo de superfície para a fórmula de Kerby-Hathaway (Fonte: Kerby, 1959).

| Tipo de superfície  | $N$  |
|---|------|
| Superfície lisa e impermeável   | 0,02 |
| Solo exposto compactado e liso  | 0,10 |
| Gramma rala, cultivo agrícola em linha ou superfície exposta moderadamente rugosa                     | 0,20 |
| Pastagem ou grama média   | 0,40 |
| Floresta decídua plantada   | 0,60 |
| Floresta conífera plantada, floresta decídua plantada com camada alta de serrapilheira ou grama densa | 0,80 |

#### h) Fórmula de Chow

Esta fórmula foi desenvolvida empiricamente por meio de regressão a partir de dados de pequenas bacias hidrográficas (0,01 – 18,5 km<sup>2</sup>) com pouca declividade (9 – 0,51%), na região do meio oeste dos EUA. Os dados de 20 bacias, considerando 60 eventos de chuva e vazão, foram obtidos de publicações do Serviço Geológico dos EUA (USGS), e do Departamento de Agricultura dos EUA (USDA) (CHOW, 1962). A equação original foi desenvolvida para cálculo de tempo de retardo (Equação (16)). Então foi utilizada a relação (Equação (3)), para obter a fórmula final utilizada neste trabalho (Equação (17)).

$$t_L = 0,0961 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (16)$$

$$t_c = 0,1602 \cdot L^{0,64} \cdot S^{-0,32} \quad (17)$$

onde  $t_c$  e  $t_L$  são em horas;  $L$  é em km;  $S$  é a declividade do canal principal em m/m.

#### i) Métodos baseados na equação de onda cinemática

Segundo Freeze (1974), Henderson & Wooding (1964), Morgali & Linsley (1965) e Brakensiek (1966) foram os pioneiros na aplicação da equação de onda cinemática para descrever a geração de escoamento superficial. Ainda segundo o mesmo autor, a análise mais completa e rigorosa sobre essa teoria é encontrada em Woolhiser & Liggett (1967). Os últimos autores deduziram uma equação (Equação 19) para tempo de equilíbrio muito semelhante aquela deduzida empiricamente por Morgali & Linsley (1965) (Equação 18).

$$t_c = \frac{7,0631 \cdot n^{0,605} \cdot L^{0,593}}{i^{0,388} \cdot S^{0,38}} \quad (18)$$

$$t_c = \frac{7,3015 \cdot n^{0,6} \cdot L^{0,6}}{i^{0,4} \cdot S^{0,3}} \quad (19)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning, em (s/m<sup>1/3</sup>);  $L$ , em (km); e  $i$  é a intensidade da chuva, em (mm/h).

Existem diversas fórmulas com o mesmo padrão das Equações (18) e (19), desenvolvidas por diferentes autores. Sabol (1991) evidencia que apesar de algumas fórmulas terem sido obtidas a partir de análise empírica, e outras teórica, resultaram em expoentes muito similares para cada parâmetro.

j) Equação SCS lag

Folmar et al. (2007) documentaram o histórico de desenvolvimento desta fórmula. Segundo os autores, a fórmula foi criada por Victor Mockus quando surgiu a necessidade de um parâmetro de tempo para o cálculo do hidrograma de pico. Então, Victor utilizou inicialmente, 4 bases de dados diferentes com mais de 100 bacias hidrográficas em território estadunidense. Porém, ao longo da análise foi necessário excluir algumas bacias, e ao final, restaram 24 bacias com área entre 55 e 0,005 km<sup>2</sup>. A fórmula (Equação 20) se encontra no relatório de Kent (1973).

$$t_L = 0,0342 \cdot L^{0,8} \cdot (S_{SCS} + 1)^{0,7} \cdot S_m^{-0,5} \quad (20)$$

$$S_{SCS} = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (21)$$

$$t_c = 0,0570 \cdot L^{0,8} \cdot \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7} \cdot S_m^{-0,5} \quad (22)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $L$ , em (km);  $S_m$  é a declividade média, adimensional;  $S_{SCS}$  é o parâmetro do Método SCS que representa potencial máximo de retenção, em (pol); e  $CN$  é parâmetro *curve number* do Método SCS, adimensional.

k) Fórmula de McCuen et al.:

Na calibração desta fórmula foram utilizados dados de 48 bacias hidrográficas com área entre 16 e 0,4 km<sup>2</sup>, sendo que 36 destas apresentavam área menor que 8 km<sup>2</sup>. A declividade do canal principal das áreas é baixa (entre 0,07 e 3%). O tempo de concentração utilizado como medido na regressão da fórmula foi obtido por inspeção em campo e aplicação do método de velocidade do SCS descrito no relatório SCS-USDA (1986).

$$t_c = 2,2535 \cdot L^{0,5552} \cdot S^{-0,2070} \cdot i^{-0,7164} \quad (23)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $L$ , em (km);  $S$  é a declividade do canal principal, em (m/m); e  $i$  é a intensidade da chuva com período de retorno 2 anos, em (mm/h).

l) Fórmula de Papadakis & Kazan:

Segundo Loukas & Quick (1996) e USDA (2010), esta fórmula foi desenvolvida a partir de dados de 84 bacias rurais com área menor que 5 km<sup>2</sup> nos EUA.

$$t_c = \frac{2,1539 \cdot n^{0,52} \cdot L^{0,5}}{i^{0,38} \cdot S^{0,31}} \quad (24)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $n$ , em (s/m<sup>1/3</sup>);  $L$ , em (km);  $i$  é a intensidade da chuva efetiva, em (mm/h); e  $S$  é a declividade do canal principal, em (m/m).

m) Fórmula de Aron et al.:

Esta fórmula, apesar de apresentar o mesmo formato daquelas obtidas a partir de análises da equação de onda cinemática, inclui dois parâmetros interessantes: fator de forma da bacia (Equação 26) definido por Hack (1957), e fator de forma do canal (Equação 27).

O desenvolvimento da fórmula se baseou no conceito de fractal, fatores de forma da bacia e do canal principal, e no método racional e teoria da onda cinemática (Aron et al., 1991). Os autores não apresentam nenhum tipo de teste da mesma.

$$t_c = 0,93 \frac{k^{5/12} \cdot n^{3/4} \cdot L^{7/12}}{c_f^{1/2} \cdot i^{1/4} \cdot S^{3/8}} \quad (25)$$

$$k = \left( \frac{L}{A} \right)^{0,6} \quad (26)$$

$$R_H = c_f \cdot A_t^{0,5} \quad (27)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $n$ , em (s/m<sup>1/3</sup>);  $L$ , em (km);  $i$  é a intensidade da chuva efetiva, em (mm/h);  $k$  é o fator de forma da bacia, em (1/m<sup>0,2</sup>);  $S$  é a declividade do canal principal, em (m/m);  $c_f$  é o fator de forma do canal, adimensional;  $R_H$  é raio hidráulico, em (m); e  $A_t$  é a área molhada transversal, em (m<sup>2</sup>).

n) Fórmula de Loukas & Quick:

A justificativa de Loukas & Quick (1996) para a criação desta fórmula é a lacuna existente até então de fórmulas para estimativa de  $t_c$  em bacias montanhosas. Em geral, as fórmulas eram baseadas em dados de bacias rurais ou urbanas, e nunca montanhosas. Então, neste estudo, os autores consideraram parâmetros que levam em consideração o escoamento subsuperficial, e desconsideram a componente hortoniana.

A dedução da Equação (28) é teórica, e para tanto Loukas & Quick (1996) consideraram 2 fases do escoamento: (1) nas encostas (subsuperficial); e (2) no canal.

$$t_L = 0,072 \cdot \frac{B^{0,6}}{c_f^{0,4} \cdot (K_{av} \cdot i \cdot S_H)^{0,2}} \quad (28)$$

$$t_c = 0,120 \cdot \frac{B^{0,6}}{c_f^{0,4} \cdot (K_{av} \cdot i \cdot S_H)^{0,2}} \quad (29)$$

onde  $t_c$ , em (h);  $B$  é um parâmetro explicado abaixo;  $c_f$  é o fator de forma do canal, adimensional;  $K_{av}$  é a condutividade hidráulica saturada média considerando a matriz do solo e os macroporos, em (mm/h);  $i$  é a intensidade da chuva efetiva, em (mm/h); e  $S_H$  é a declividade da encosta, em (m/m).

$$B = B_1 + B_2 + B_3 \quad (30)$$

$$B_1 = \frac{p}{a^{1/2}} B_k \quad (31)$$

$$B_2 = \frac{q(a + bL_c + cL_c^2)}{a} - \frac{qb}{2a^{3/2}} B_k - \frac{qc^{1/2}}{a} \quad (32)$$

$$B_3 = m \left[ \frac{2aL_c - 3b}{4a^2} (a + bL_c + cL_c^2) + \frac{3bc^{1/2}}{4a^2} + \frac{3b^2 - 4ac}{8a^{5/2}} B_k \right] \quad (33)$$

$$B_k = \ln \left[ 2a^{1/2} (a + bL_c + cL_c^2) + 2aL_c + b \right] - \ln (2a^{1/2} c^{1/2} + b) \quad (34)$$

onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $p$ ,  $q$  e  $m$  são parâmetros calculados a partir do perfil longitudinal do rio principal;  $L_c$  é o comprimento do canal principal, em (m).

#### o) Equação Simas-Hawkins:

Esta fórmula foi obtida a partir de dados de 168 bacias hidrográficas nos EUA com área entre 0,001 e 14 km<sup>2</sup>. O tempo de retardo foi estimado em 50.000 eventos de chuva-vazão. (SIMAS & HAWKINS, 1996).

$$t_{Lc} = 0,2265 \cdot A^{0,5937} \cdot L^{-0,5937} \cdot S^{-0,1505} \cdot S_{SCS}^{0,3131} \quad (35)$$

$$t_c = 0,3209 \cdot A^{0,5937} \cdot L^{-0,5937} \cdot S^{-0,1505} \cdot S_{SCS}^{0,3131} \quad (36)$$

onde  $t_c$  e  $t_L$ , em (h);  $A$ , em (km<sup>2</sup>);  $L$ , em (km); e  $S$  é a declividade do canal principal, em fração decimal.

Tabela 3 – Resumo das fórmulas apresentadas para cálculo de tempo de concentração.

| Nome                | Referência utilizada                     | Características da base de dados de bacias utilizadas |                      |         | OBS.  |   |  |
|---------------------|--|---|----------------------|---------|---|---|--|
|                     |  | Área (km <sup>2</sup> )                               | Tipo                 | Local   |   |   |  |
| Kirpich             | Kirpich (1940)                           | 0,0051-0,4533   | rural e reflorestada | EUA     | 6 bacias utilizadas   |   |  |
| Pasini              | Greppi (2005)                            |   |                      |         | Itália  | desenvolvida para pequenas bacias com pouca declividade                                   |  |
| Giandotti           | Greppi (2005)                            |   |                      |         | montanhosa  | Itália  | indicada principalmente para bacias italianas  |
| Izzard              | Kibler (1982)                            |   |                      |         |   | EUA   | desenvolvida com base em experimentos de laboratório a respeito de escoamento superficial em rodovias e gramados |
| Johnstone           | Dooge (1973) e Johnstone & Cross (1949)  | 64,8 - 4206,1   |                      | EUA     | 19 bacias utilizadas  |   |  |
| Dooge               | Dooge (1973)                             | 145 e 948   |                      | Irlanda | 10 bacias utilizadas  |   |  |
| Kerby-Hathaway      | Kerby (1959)                             |   |                      |         | desenvolvida para pequenas bacias com escoamento superficial dominante                                  |   |  |
| Chow                | Chow (1962)                              | 0,01–18,5   |                      | EUA     | desenvolvida para bacias com pouca declividade (9 – 0,51%)  |   |  |
| Morgali & Linsley   | Woolhiser & Liggett (1967)               |   |                      |         | Utiliza a onda cinemática para descrever a geração de escoamento superficial – deduzida empiricamente   |   |  |
| Woolhiser & Liggett | Woolhiser & Liggett (1967)               |   |                      |         | Utiliza a onda cinemática para descrever a geração de escoamento superficial – deduzida teoricamente    |   |  |
| SCS lag             | USDA (1973)                              | 55 - 0,005  |                      | EUA     | 24 bacias utilizadas  |   |  |
| McCuen et al.       | McCuen et al. (1984)                     |   |                      |         | 16-0,4  | a declividade do canal principal das áreas é baixa (entre 0,07 e 3%) 48 bacias utilizadas |  |
| Papadakis & Kazan   | Loukas & Quick (1996) e USDA-NRCS (2010) | < 5   | rural                | EUA     | 84 bacias utilizadas  |   |  |
| Aron et al.         | Aron et al. (1991)                       |   |                      |         | inclui os parâmetros: fator de forma da bacia e fator de forma do canal                                 |   |  |
| Loukas & Quick      | Loukas & Quick (1996)                    |   | montanhosa           |         | leva em consideração o escoamento subsuperficial, e considera o componente hortoniano como inexistente. |   |  |
| Simas-Hawkins       | Simas & Hawkins (1996)                   | 0,001 - 14  |                      |         | com base em 50000 eventos de chuva-vazão. 168 bacias utilizadas   |   |  |



### 3.3.4 Análise e avaliação dos métodos e fórmulas

Fórmulas empíricas e teóricas para cálculo de  $t_c$  foram desenvolvidas, mas seu desempenho absoluto e relativo era pouco avaliado. Então, surgiu a necessidade de realizar avaliações das fórmulas, justamente pois a comunidade técnico-científica se deparava com casos em que mais de uma fórmula poderia ser aplicada e era necessário escolher a mais adequada. Além disso, é importante saber a verdadeira aplicabilidade das fórmulas.

Singh (1976) derivou expressões matemáticas para cálculo de  $t_c$  a partir da teoria da onda cinemática. Assim, assumindo diferentes condições de contorno, ele conseguiu mostrar que a variabilidade espaço-temporal da chuva também tem significativa influência no  $t_c$ . E com isso, o autor concluiu que a fórmula de Kirpich (1940) é um caso especial das expressões gerais e deve ser aplicada com cautela.

Wong (2005) também concluiu que fórmulas que não incluem a intensidade da chuva, só funcionam para uma faixa limitada de valores deste parâmetro, e então apresentam pior desempenho em relação às demais. O autor utilizou dados experimentais de parcela de concreto e gramados para testar 9 diferentes fórmulas para cálculo de  $t_c$ . De maneira geral, a fórmula de Chen & Wong (1993) apresentou os melhores resultados tanto para parcela de concreto quanto para os gramados.

No trabalho de Loukas & Quick (1996), eles propuseram uma fórmula e a compararam com outras 7 existentes. A conclusão é que a maioria subestimou o  $t_c$ , porque as bacias utilizadas eram declivosas e montanhosas, sendo que a principal componente do escoamento não é superficial, mas sim subsuperficial. E as bacias e condições de aplicação das fórmulas testadas eram bem diferentes disso.

O método utilizado para estimar o  $t_c$  que é considerado como medido também influencia na comparação. Diferentemente do trabalho de Loukas & Quick (1996), em que os  $t_c$ s foram obtidos a partir de análise do hidrograma e hietograma, McCuen et al. (1984) utilizaram, além de  $t_c$ s estimados pelo hidrograma, aqueles calculados pelo método de velocidade do SCS-USDA (1986). Então, na análise comparativa os métodos que tem a mesma base teórica (método da velocidade) apresentaram melhores resultados.

Com base em seu estudo, McCuen et al. (1984) recomendam a utilização das fórmulas que se baseiam no método da velocidade, pois estas apresentaram um valor médio muito próximo da média do medido para as 48 bacias. Apesar disso, os autores ressaltam que as diferenças

foram relativamente grandes quando considerados os valores individuais de algumas bacias.

Silveira (2005) observou, no Brasil, a carência de indicadores para uma escolha consciente da fórmula mais adequada, e então realizou uma análise de desempenho de algumas fórmulas existentes. Ele separou as bacias que tinham dados medidos de  $t_c$  em 2 grupos: rurais (29 bacias) e urbanas (32 bacias), nenhuma delas localizada no Brasil. Em suas conclusões ressalta que nem sempre as características das bacias integrantes da base de dados que originou a fórmula são as limitantes para aplicabilidade das fórmulas, mas sim é necessário confirmar esta informação.

Kobiyama et al. (2006) utilizaram como área de estudo a bacia do campus da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) e realizaram análise comparativa preliminar entre os  $t_c$ 's calculados em 5 eventos de chuva e aqueles calculados com 5 fórmulas. Ao calcular os erros entre a média de  $t_c$  medido e os calculados pelas fórmulas, observa-se que eles variam entre 12 e 72%, sendo que a pior estimativa foi da fórmula de Dooge, que superestimou o valor de  $t_c$ , e a melhor foi a de McCuen et al. (1984).

Silva et al. (2009) utilizaram hidrogramas simulados no modelo hidrológico TOPMODEL além daqueles medidos, para avaliar o desempenho de 23 fórmulas de  $t_c$  existentes. Os valores médios de  $t_c$  obtidos pelos hidrogramas medidos e simulados foram muito próximos, porém as equações, de maneira geral, subestimaram muito o valor médio de  $t_c$ .

Nota-se que como a fórmula de Kirpich (1940) é uma das mais conhecidas e empregadas nas estimativas de  $t_c$ , e seus resultados, em geral, são valores subestimados (SILVA et al., 2009; McCUEN et al., 1984; LOUKAS & QUICK, 1996).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa deste trabalho constituiu em localizar e implementar monitoramento hidrológico em uma pequena bacia caracterizada por floresta nativa. Neste caso, a vegetação nativa é referente à Floresta Ombrófila Mista. Nos dias de hoje, encontrar uma área preservada é uma tarefa um tanto quanto desafiadora. Porém, ao mesmo tempo, trouxe inúmeras lições e aprendizado que serão detalhados a seguir.

##### 4.1 SELEÇÃO DA BACIA DE ESTUDO

Inicialmente foram realizadas observações na área da bacia até a efetiva obra de construção do vertedor. No decorrer deste texto serão evidenciadas as 4 visitas mais decisivas. Na primeira visita à área (13/07/2010), fomos guiados pelo funcionário da empresa Battistella Florestal, José Lucindo (Porungo), que conhece muito bem a região e sabia indicar uma área com as características desejadas. A área foi considerada interessante para o estudo. Assim, foram coletados pontos onde poderia ser a exutória da bacia utilizando o aparelho Garmin GPSmap 76CSx. Os pontos foram plotados e a bacia localizada e previamente delimitada na ortofotocarta digital nº 23, em escala 1:10.000, cedida pela Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente (SEPLAN) da Prefeitura Municipal de Rio Negrinho. Esta etapa foi de suma importância, pois como se buscava uma bacia caracterizada por floresta nativa, a área investigada seria descartada se qualquer outro uso/cobertura do solo fosse identificado. Com isso, foi identificada uma porção na cabeceira da bacia com plantação de pinus.

A segunda visita (04/10/2010) foi para confirmar as condições de uso/cobertura do solo. Procurou-se verificar os divisores, principalmente na cabeceira da bacia, se haveria influência significativa de áreas com outra cobertura vegetal que não fosse nativa. Constatou-se que existe uma área de 0,05 hectares com plantação de pinus. Porém, a influência desta área no estudo não foi considerada significativa. Nessa ocasião percorreu-se também a rede de drenagem no intuito de reconhecer o rio principal e a nascente do mesmo, além de encontrar alternativas de seção para instalação da estação fluviométrica.

Após a decisão pela área, era preciso definir o local para instalação da estação fluviométrica. Em uma terceira visita (22/11/2010), duas seções foram consideradas apropriadas para a

instalação da estação fluviométrica, porém a mais a jusante apresentou uma característica negativa para a instalação, que é a existência de uma várzea ao lado. Isso poderia ter o efeito de retardar a água, e assim acarretar erros na medição de nível na exutória da bacia. Após a escolha da seção, foram medidas suas principais dimensões e a inclinação média do trecho a montante da seção a fim de pré-projetar o dispositivo hidráulico a ser instalado na estação fluviométrica. Para tanto, precisava-se conhecer aproximadamente o intervalo de vazões que se pretendia medir. Nas observações em campo, foram estimadas vazões da ordem de 2 L/s, e através do método racional, foi estimada a vazão de pico para a bacia de aproximadamente 140 L/s. Então, a partir da seção e do intervalo de vazões, foi feito o projeto da estação fluviométrica. Optou-se por utilizar o vertedor triangular de 90°, pois além de amplamente utilizado em estudos hidrológicos em pequenas bacias, atendia o intervalo de vazões necessário. O vertedor consiste de uma chapa de aço cortada apoiada em 2 muros, um em cada lado.

Para confirmação das dimensões do vertedor triangular, primeiramente foi cortada uma chapa de compensado de madeira nas mesmas dimensões que a chapa de aço seria confeccionada (08/01/2011). Com a chapa de madeira, o rio foi barrado com o auxílio de pedras coletadas no local para apoiar a chapa. Assim, foi simulada a situação de instalação do projeto, e seu bom funcionamento foi observado (Figura 4). Isto significa que a água verteu criando uma porção de ar entre a lâmina e a chapa (sem colar) e não criou um lago muito extenso a montante.



Figura 4 – Teste do vertedor.

## 4.2 ÁREA DE ESTUDO

### 4.2.1 Localização

O rio principal da bacia deste estudo não tinha nome, então em homenagem à ave Araponga, muito presente nesta região, cuja descrição mais detalhada é apresentada na seção 4.3.2, foi denominada bacia do rio Araponga. A bacia está localizada na zona rural do município de Rio Negrinho, norte do estado de Santa Catarina. A bacia fica 25 km ao sul do centro urbano do município de Rio Negrinho. Com respeito ao seu posicionamento geográfico, a bacia está 49° 29' 44'' oeste e 26° 29' 27'' sul. A bacia do rio Araponga (ARA) está nas cabeceiras da bacia do rio Corredeiras, e faz parte da Rede de Bacias-escola de Kobiyama et al. (2008). O rio Araponga drena na direção sudeste até o rio do Salto, que a jusante recebe contribuição do rio Feio e deságua no rio Corredeiras (Figura 5).

### 4.2.2 Caracterização de solo e rocha

A região onde está inserida a área de estudo do presente trabalho é a faixa sedimentar da Bacia do Paraná no estado de Santa Catarina. O substrato é formado por rochas sedimentares pertencentes ao grupo Itararé, do Super-Grupo Tubarão. Esta unidade litoestratigráfica resultou da decomposição de extensas e espessas sequências de sedimentos predominantemente finos desde os tempos do carbonífero até o início do Mesozóico. Assim, tais sedimentos formaram estratos de siltitos, folhelhos, argilitos, arenitos e conglomerados (SANTA CATARINA, 1986).

Os solos predominantes da região são os Cambissolos, tipicamente derivados de rochas sedimentares, com baixa fertilidade e elevados teores de matéria orgânica, com horizonte B incipiente, definido pelo baixo gradiente textural, pela média e alta relação silte/argila ou pela presença de minerais primários de fácil decomposição; não são hidromórficos, mas podem apresentar caráter gleico (SANTA CATARINA, 1986).

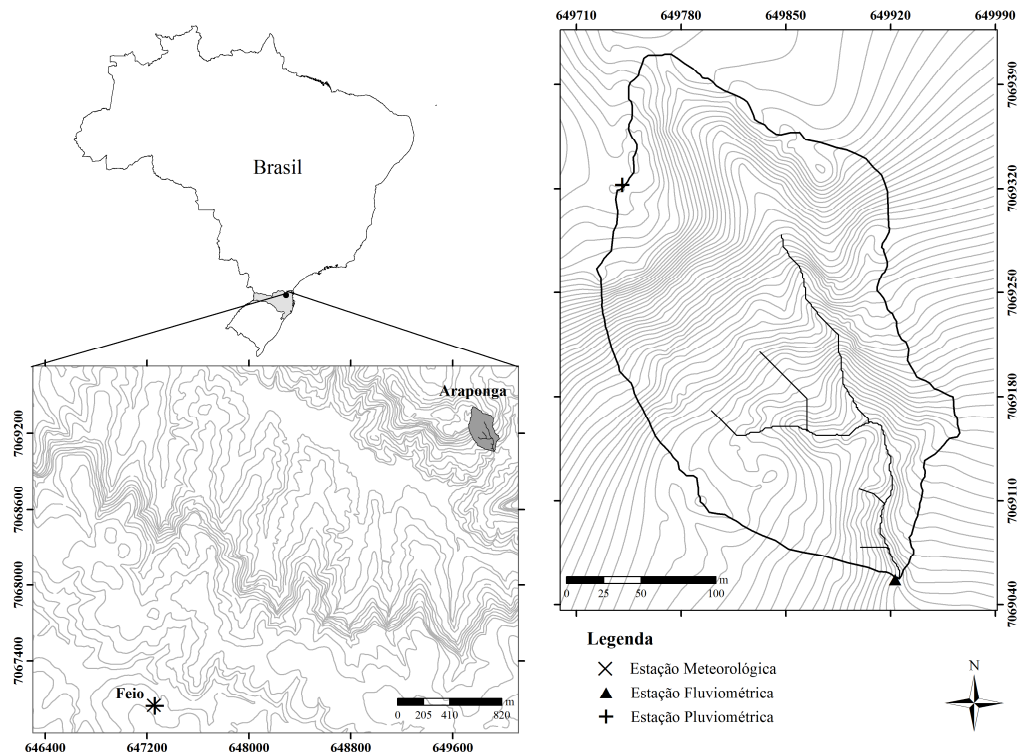


Figura 5 – Localização da bacia do rio Araponga (estações pluviométrica e fluviométrica), e estação pluviométrica Feio.

### 4.2.3 Caracterização de flora e fauna

A bacia do rio Araponga é uma área de preservação na Fazenda Santa Alice - FSA, propriedade da Empresa Battistella Florestal, que desenvolve atividade de silvicultura. A flora da região se insere originalmente na unidade fitogeográfica de Floresta Ombrófila Mista – FOM, (Floresta de Araucária ou Floresta de Pinheiro-brasileiro) formação Montana (altitudes entre 400 e 1000 m).

Esse tipo de vegetação se caracteriza principalmente, pela presença do pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) no estrato superior. No subosque dominam as imbuías (*Ocotea porosa*) e a canelalajeana (*Ocotea pulchella*). Além destas, são muito comuns a sacopema (*Sloanea lasiocoma*), a canela amarela (*Nectandra lanceolata*), a canela pururuca (*Cryptocarya aschersoniana*), o camboatá e outras árvores. O estrato das arvoretas é representado predominantemente pela erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e pela guaçatunga (*Casearia decandra*) dentre outras espécies. Existem, muitas vezes, densas touceiras de taquara-lisa (*Merostachys multiramea*) entre os estratos inferiores da floresta (IBGE, 1992; KLEIN, 1978; SANTA SATARINA, 1986).

Como o crescimento econômico da região se baseou principalmente na exploração vegetal em busca de madeira de valor econômico, e mais recentemente em atividades de silvicultura, os remanescentes de FOM são raros. Portanto, atualmente a região apresenta um mosaico com diversos usos/coberturas do solo, sendo os mais representativos o reflorestamento de pinus, e fragmentos de FOM em diversos estádios. A ARA se insere em um destes remanescentes de FOM em estágio avançado na FSA.

Scariot (2008) selecionou a FSA como área de estudo, e caracterizou sua paisagem e vegetação nativa. Tres (2010), por sua vez, teve como área de estudo a paisagem formada por duas fazendas produtoras de madeira mais um raio de 1 km, sendo uma das fazendas a FSA. Ela caracterizou a paisagem e a vegetação nativa da paisagem selecionada para a pesquisa. A ARA está inserida em um fragmento de vegetação nativa que foi selecionado como um dos pontos de amostragem para caracterização florística em ambos os estudos citados anteriormente.

Segundo os levantamentos fitossociológicos de Scariot (2008) e Tres (2010), as famílias mais representativas na área são (entre parênteses a espécie mais frequente): Cyatheaceae (*Cyathea schanschin*), Dicksoniaceae (*Dicksonia sellowiana*), Lauraceae (diversas

espécies), e Myrtaceae (diversas espécies). Vale ressaltar que apesar de a área ter sido classificada como vegetação nativa em estágio avançado, e apresentar alta diversidade, ainda não conseguiu recuperar a composição original (SCARIOT, 2008). A Figura 6 mostra fotos da vegetação da ARA nas 4 estações do ano.



Figura 6 – Vegetação da ARA nas 4 estações do ano. (a) outono – 06/maio/2011; (b) inverno – 27/agosto/2011; (c) primavera – 18/novembro/2011; e (d) próximo do verão – 17/dezembro/2011.

No intuito de identificar a fauna dispersora na área, Tres (2010) adotou diversos procedimentos, como: coleta de sementes; registro de animais silvestres por meio de armadilhas fotográficas; registro de



evidências de fauna como pegadas, fezes, trilhas, ninhos, tocas, dormitórios; registro de recursos não consumidos como plantas em frutificação. Na Tabela 4 a lista de espécies está em ordem decrescente de número de registros.

Tabela 4 – Principais espécies encontradas na região da ARA.

| Nome científico               | Nome comum                     |
|-------------------------------|--------------------------------|
| <i>Dasyprocta azarae</i>      | Cutia                          |
| <i>Cerdocyon thous</i>        | Cachorro do mato               |
| <i>Penelope</i> sp.           | Jacu                           |
| <i>Leopardus wiedii</i>       | Maracajá                       |
| <i>Sciurus vulgaris</i>       | Serelepe                       |
| <i>Mazama americana</i>       | Veado                          |
| <i>Dasypus novencinctus</i> e | Tatu                           |
| <i>Euphractus sexcinctus</i>  |                                |
| Não se aplica                 | Pequenos roedores e marsupiais |
| <i>Leopardus pardalis</i>     | Jaguatirica                    |
| <i>Coendou prehensilis</i>    | Ouriço                         |
| <i>Eira barbara</i>           | Irara                          |
| <i>Nasua nasua</i>            | Quati                          |
| <i>Tayassu tajacu</i>         | Cateto                         |
| <i>Agouti paca</i>            | Paca                           |

Fonte: Tres (2010)

Além das espécies apresentadas na Tabela 4, também foi registrada uma ave de canto alto e estridente, que lembra ora um som produzido por uma martelada forte, ora o atrito da lima contra o ferro. Essa ave é chamada Araponga (*Procnias nudicollis*), e devido à sua presença marcante na área, deu nome ao rio deste estudo. Essa é uma espécie endêmica da Mata Atlântica. Vive preferencialmente em mata primária, porém também vive em mata secundária dependendo da ocorrência de árvores frutíferas (SICK, 1997). Sua base alimentar é principalmente frutos, sendo excelente disseminadora de sementes. O canto dos machos é emitido incansavelmente durante o período de reprodução, no caso da Araponga vai de outubro a março (SICK, 1997).

#### 4.3 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Para os estudos preliminares foi utilizada a ortofotocarta digital nº 23, em escala 1:10.000, cedida pela Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente (SEPLAN) da Prefeitura Municipal de Rio Negrinho. A

escala da cobertura aerofotogramétrica é 1:20.000, o vôo foi realizado em 04/2005 e a restituição em 07/2006. Porém, como se trata de uma pequena bacia, identificou-se a necessidade de uma base cartográfica mais detalhada. Então foi realizado o levantamento topográfico de toda a área da ARA.

Inicialmente, foram levantados 2 pontos utilizando o receptor modelo Trimble® GPS 5700 e antena Zephyr™, com precisão estática horizontal de 5mm + 0,5 ppm e vertical de 5 mm + 1 ppm (TRIMBLE, 2001). Os pontos foram materializados com piquetes de madeira. Os locais escolhidos para instalação dos pontos de base fixa ficam livres de obstáculos que impeçam ou dificultem o rastreamento do sinal do GPS, bem como garantem a visibilidade necessária para posterior levantamento com estação total. O método de levantamento foi o estático pós-processado, sendo que o período de rastreamento de cada ponto foi de 6 horas. Em seguida, os dados obtidos em campo foram processados com o programa Leica Geo Office, Versão 6.0, e com informações de estações da rede brasileira monitoramento contínuo (RBMC), disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em seu sítio. O processamento constituiu da triangulação dos dados obtidos em campo com as estações instaladas nas cidades de Curitiba/PR (UFPR), Imbituba/SC (IMBT) e Lages (SCLA). As coordenadas planialtimétricas processadas dos 2 pontos foram utilizadas para dar início ao levantamento topográfico com a estação total modelo Leica® TCR407. O levantamento foi feito em 13 dias (5 campos com duração de 2 dias, e 1 com duração de 3 dias), distribuídos ao longo de 4 meses de trabalho. Foram coletados 1690 pontos, incluindo estações, rés e vantes, sendo a densidade média de pontos na área levantada de 2,5 pontos/100 m<sup>2</sup>.

O algoritmo disponível no ArcHidro (extensão do Arcgis) foi utilizado para gerar a rede de drenagem das duas bases cartográficas. Assim, foram aplicados os mesmos limites de valores para os parâmetros necessários. Apenas assim é possível comparar a rede de drenagem proveniente das duas bases.

#### 4.4 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Este trabalho envolveu além de observação em campo, instrumentação da bacia do rio Araponga com monitoramento automático intensivo de nível e temperatura da água na exutória, tensão e temperatura da água no solo, e precipitação. Porém, os parâmetros utilizados no trabalho são de vazão, e precipitação de duas estações: rio

Feio que já estava instalada antes do início deste trabalho, e pertence a rede de monitoramento do LabHidro e Araponga, que foi instalada posteriormente. As etapas de aquisição dos dados serão detalhadas a seguir. A Figura 7 apresenta a localização das estações de monitoramento hidrológico na ARA.

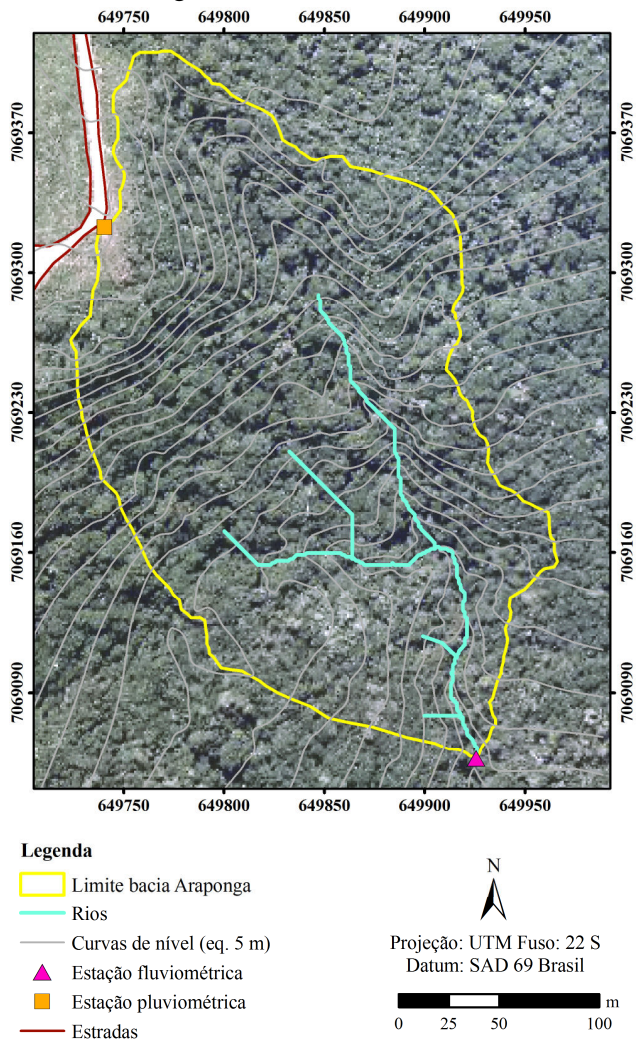


Figura 7 – Localização das estações de monitoramento hidrológico na ARA.

#### 4.4.1 Dados pluviométricos

A série de dados de precipitação foi obtida de duas estações pluviométricas: Feio e Araponga (Figura 5). A altitude da estação rio Feio é 951 m acima do nível do mar. Esta estação foi utilizada neste trabalho, pois apresenta uma série de dados mais longa (desde 2007), e estar próxima a ARA (3 km de distância). Ao lado existe também uma estação meteorológica profissional, com medição de umidade, radiação incidente e refletida, direção e velocidade do vento e temperatura atmosférica.

A instalação da estação Araponga se deu no dia 17 de dezembro de 2011. A autorização da empresa Battistella Florestal para o corte de algumas árvores de Pinus no entorno de onde seria localizado o pluviógrafo foi necessária, bem como o apoio para o corte durante a instalação dessa estação de acordo com as recomendações detalhadas por Santos et al. (2001) (Figura 8).

Ambas as estações são compostas por: pluviógrafo e *datalogger* da marca WaterLOG<sup>®</sup>, e modelos H-340 e H-500XL<sup>™</sup>, respectivamente. O pluviógrafo apresenta sistema de medição de básculas, com resolução 0,2 mm. A taxa de amostragem dos dados é 10 min na estação Feio, e 5 min na estação Araponga. Então, a série da ARA foi uniformizada para o intervalo de 10 min.

A série temporal de precipitação foi obtida a partir de dados de duas estações pluviométricas, Feio e ARA. No período de 23 de março de 2011 a 17 de dezembro do mesmo ano (data de instalação da estação ARA) foram utilizados os dados da estação Feio. E de 17 de dezembro 2011 até 12 de junho de 2012 foram utilizados os dados da estação ARA.

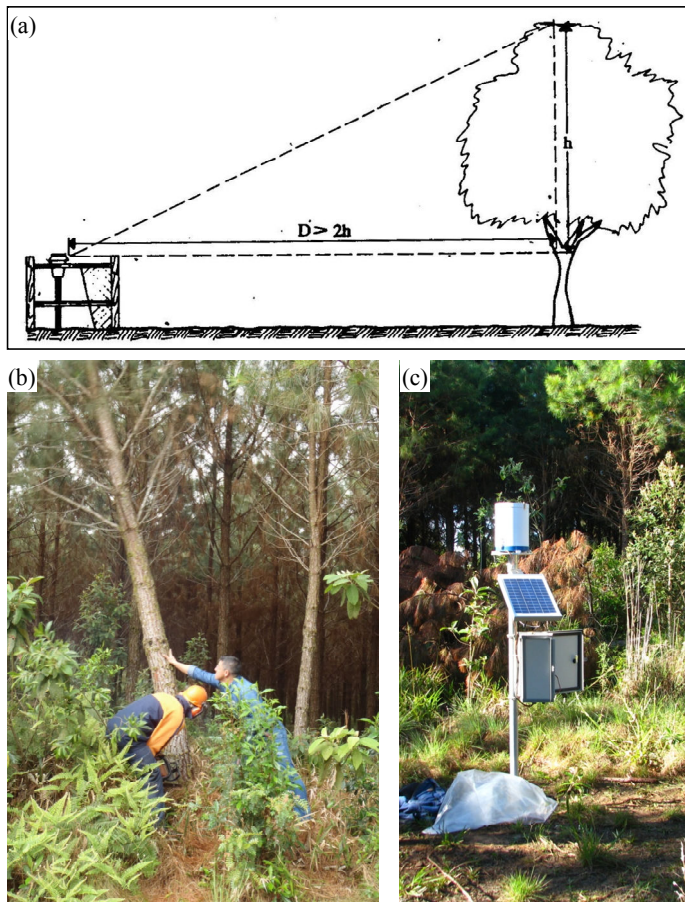


Figura 8 – Estação Pluviométrica ARA. (a) Recomendação de distância do pluviógrafo até os obstáculos (Fonte: Santos et al., 2001); (b) corte de árvores no entorno do local de instalação do pluviógrafo; e (c) estação instalada.

Através de análise estatística das séries obtidas nas duas estações (Feio e ARA) no período de 17/12/2011 a 11/06/2012 comprovou-se que é possível utilizar dados pluviométricos da estação Feio para preencher falhas existentes na série da estação pluviométrica ARA.

#### 4.4.2 Dados fluviométricos

Na exutória da bacia foi instalada uma estação fluviométrica composta de vertedor triangular 90° de parede fina, sensor de pressão da marca WaterLOG<sup>®</sup>, modelo H-310, e régua linimétrica (Figura 9(a)). O monitoramento é intensivo, e os dados de nível d'água e temperatura são armazenados a cada 5 minutos em um *datalogger* também da marca WaterLOG<sup>®</sup>, modelo H-500XL<sup>™</sup>. Ao longo do monitoramento é necessário aprimorar e corrigir alguns procedimentos e instalações. Na Figura 9(a) é apresentada a estação em suas condições atuais. Porém, no início do monitoramento, percebeu-se que muitas folhas se acumulavam no vertedor, causando erro na medição (Figura 9(b)). A providência tomada foi a instalação de uma tela com uma armação protegendo o lago formado pelo vertedor. Assim, a tela consegue segurar as folhas e galhos, mas quando acontece um evento de chuva intensa, uma grande quantidade de sedimento é carregada e enche o lago do vertedor (Figura 9(c)). Para este problema ainda se está estudando uma solução. Por enquanto, o registro destes eventos e a consistência de dados se fazem suficientes.



Figura 9 – Estação fluviométrica do rio Araponga. (a) Estação completa; (b) Início do monitoramento: sem a tela, folhas e galhos acumulados no vertedor; e (c) Depois de um evento de chuva intensa, a tela não é capaz de reter a grande quantidade de sedimento. Nota-se que R indica a posição da régua linimétrica, S do poço onde está instalado o sensor de pressão, e V o vertedor.

A série contínua de dados de vazão foi obtida pela determinação da equação do vertedor. Porém, na equação do vertedor, o parâmetro carga ( $H_v$ ) é em relação à medida na régua linimétrica. Como o sensor de nível não se encontra no mesmo nível que o zero da régua linimétrica, é necessário “transformar” a medição feita pelo sensor. Durante o monitoramento percebeu-se que a diferença entre a medição do sensor e na régua não é constante. Então, com 31 medidas concomitantes de nível no sensor e na régua, foi estabelecida a Equação (37), que permite a “transformação” da série contínua de dados de nível do sensor para o correspondente na régua (Figura 10).

$$\text{Régua} = 0,7075 \cdot \text{Sensor} + 0,0699 \quad (37)$$

onde *Régua* e *Sensor* são os níveis medidos na régua e pelo sensor, respectivamente, ambos em m.

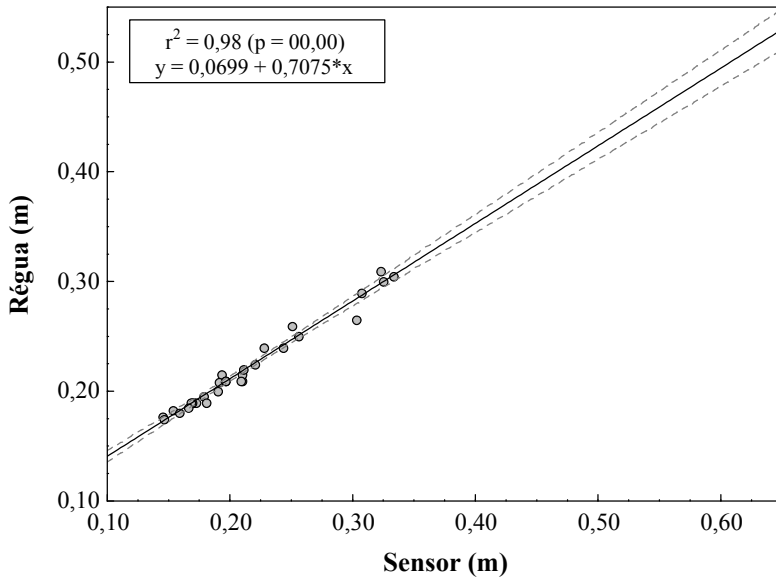


Figura 10 – Relação nível medido pelo sensor e na régua linimétrica.

Com o uso do nível topográfico mediu-se o desnível de 0,164 m entre o zero da régua e o vértice do vertedor (Figura 11). Assim, a carga hidráulica no vertedor é a medida na régua subtraída do desnível de 0,164 m.



Figura 11 – Esquema de localização da régua linimétrica e vertedor, evidenciando o desnível entre o zero da régua e o vértice do vertedor.



Foram realizadas 8 medições de vazão utilizando balde e cronômetro (Tabela 5), e ajustada a Equação (38), que é a equação de ajuste entre carga hidráulica no vertedor e a vazão (Figura 12), cujo  $R^2$  é de 0,99.

$$Q = 1,0306 \cdot H_v^{2,2664} \quad (38)$$

onde  $Q$  é a vazão, em ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $H_v$  é a carga no vertedor (= Régua - 0,164), em (m).

Tabela 5 – Informações sobre as medições volumétricas de vazão.

| Data       | Régua | Carga $H_v$ | Vazão $Q$                 |       |
|------------|-------|-------------|---------------------------|-------|
|            | (m)   | (m)         | ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | (L/s) |
| 14/10/2011 | 0,275 | 0,111       | 0,00734                   | 7,34  |
| 22/10/2011 | 0,215 | 0,051       | 0,00110                   | 1,10  |
| 06/11/2011 | 0,207 | 0,043       | 0,00082                   | 0,82  |
| 18/11/2011 | 0,220 | 0,056       | 0,00142                   | 1,42  |
| 17/12/2011 | 0,190 | 0,026       | 0,00029                   | 0,29  |
| 24/01/2012 | 0,250 | 0,086       | 0,00405                   | 4,05  |
| 27/04/2012 | 0,225 | 0,061       | 0,00182                   | 1,82  |
| 25/05/2012 | 0,305 | 0,141       | 0,01240                   | 12,40 |

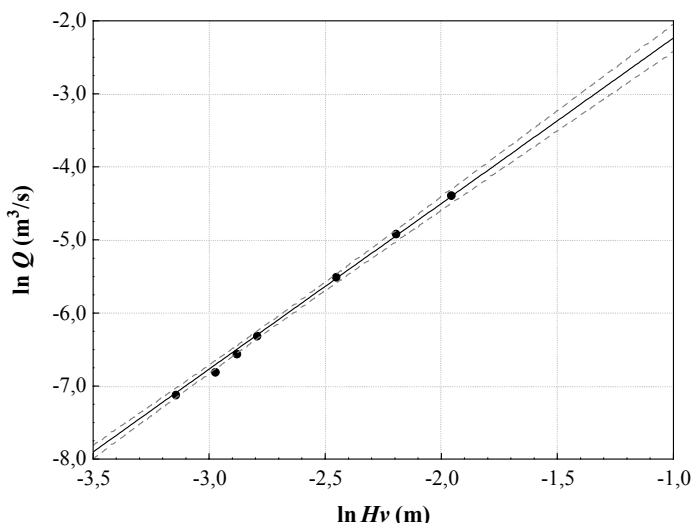


Figura 12 – Relação entre as medições de vazão e a carga hidráulica no vertedor, extrapolação da equação do vertedor e intervalo de confiança de 95%.

O início do monitoramento intensivo de nível foi em 23 de março de 2011, e continua até os dias de hoje. Porém a série utilizada para este trabalho se estende até o dia 12 de junho de 2012.

#### 4.5 ESTIMATIVA DO TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

A estimativa hidrológica de  $t_c$ , segundo explicado na seção 3.3.2, deve ser feita a partir do hietograma da chuva efetiva e do hidrograma de escoamento direto. Porém, acredita-se que estes conceitos sejam próprios da hidrologia urbana, e ainda não existem métodos universalmente aceitos para separação tanto da chuva efetiva quanto do escoamento direto. Como a ARA é uma bacia florestal, neste trabalho,  $t_c$  foi estimado como sendo o intervalo entre o final do evento de precipitação e o ponto de inflexão no hidrograma.

Como o monitoramento de nível d'água iniciou-se depois da instalação da estação de chuva Feio, a série de vazão foi a que limitou o período considerado (Tabela 6).

Tabela 6 – Período das séries e estação proveniente.

| Estação      | Série    | Início     | Fim        |
|--------------|----------|------------|------------|
| Vazão        | Araponga | 23/03/2011 | 12/06/2012 |
| Precipitação | Feio     | 23/03/2011 | 17/12/2011 |
|              | Araponga | 17/12/2011 | 12/06/2012 |

As séries contínuas de chuva e vazão foram analisadas, consistidas e foi possível separar 30 eventos de precipitação. Muitas vezes não é simples identificar o ponto de inflexão no hidrograma, então adotou-se um método para padronizar e eliminar ao máximo a subjetividade ao localizar o ponto de inflexão nos eventos selecionados. Este procedimento consiste em no hidrograma em escala logarítmica, separar os trechos PB e BF, ou PA, AB e BF, ilustrados na Figura 13, e em seguida ajustar equações lineares por tentativa e erro até obter o melhor par ou trio de  $R^2$ . Finalmente, o  $t_c$  foi calculado em dois casos diferentes entre o fim da chuva e o ponto de inflexão. Em 17 eventos foram identificados 2 pontos de inflexão, e neste caso o  $t_{c\_medido}$  é considerado como a média dos dois tempos de concentração A e B, que é igual a  $t_{c\_médio}$ .

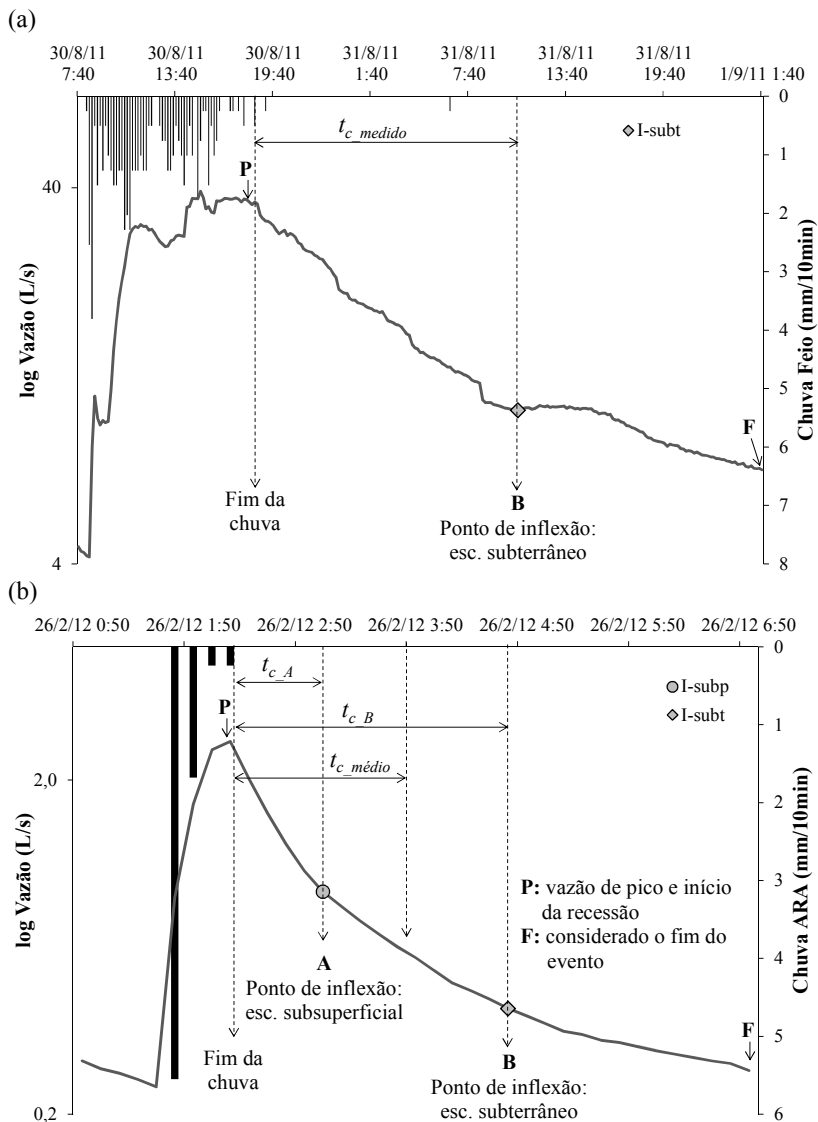


Figura 13 – Estimativa hidrológica do tempo de concentração em um evento, em que identificou-se dois casos de hidrograma: (a) 1 ponto de inflexão; e (b) 2 pontos de inflexão. Nota-se que o ponto A indica o início do escoamento subsuperficial, e B é considerado início do escoamento subterrâneo.

No Apêndice B são apresentados todos os eventos de precipitação utilizados neste trabalho, bem como seus respectivos hidrogramas e pontos de inflexão.

Além da estimativa hidrológica, também foram aplicadas as fórmulas descritas na seção 3.3.3 (Tabela 3). A forma de obtenção dos parâmetros necessários para aplicação das fórmulas é descrita na Tabela 7. Os procedimentos correspondentes às letras da coluna (3) desta tabela são explicados após a Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros necessários para aplicação das fórmulas.

| (1)<br>Parâmetro   | (2)<br>Unidade       | (3)<br>Obtenção                 |
|--------------------|----------------------|---------------------------------|
| $L$                | km                   | (i)                             |
| $L_c$              | m                    | (i)                             |
| $H$                | km                   | (i)                             |
| $S$                | m/m                  | $= H/L$                         |
| $A$                | km <sup>2</sup>      | (i)                             |
| $H_m$              | m                    | (ii)                            |
| $S_m$              | -                    | (iii)                           |
| $S_H$              | -                    | (iv)                            |
| $C_{iz}$           | -                    | Tabela (1)                      |
| $i$                | mm/h                 | (v)                             |
| $N$                | -                    | Tabela (2)                      |
| $n$                | s/(m) <sup>1/3</sup> | Tabela em Chow (1959)           |
| $S_{scs}$          | mm                   | Equação (21)                    |
| $CN$               | -                    | Tabela em SCS TR-55 (1986)      |
| $k$                | km <sup>-0,6</sup>   | Equação (26)                    |
| $cf$               | -                    | Tabela em Loukas & Quick (1996) |
| $B$                | -                    | Equação (30)                    |
| $B_1$              | -                    | Equação (31)                    |
| $B_2$              | -                    | Equação (32)                    |
| $B_3$              | -                    | Equação (33)                    |
| $K_{av}$           | mm/h                 | (vi)                            |
| $B_k$              | -                    | Equação (34)                    |
| $a, b, c, p, q, m$ | -                    | (vii)                           |

Os procedimentos de obtenção dos parâmetros da Tabela 7, são:

- i. Medição direta utilizando o software Arcgis e as bases cartográficas nas duas escalas;
- ii. Consultando as estatísticas do Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 1m, obtido da interpolação dos pontos do levantamento topográfico no software Arcgis, obteve-se a elevação média da bacia ( $E_m$ ). Então, calculou-se  $H_m = E_m - E_{ex}$ , onde  $E_{ex}$  é a elevação na exutória da bacia, todos os parâmetros em m.
- iii. Consultando as estatísticas do mapa de declividade gerado no software Arcgis, obteve-se a declividade média da bacia ( $S_m$ ).
- iv. Foram feitos 5 perfis de encostas no MDE utilizando o Arcgis, e calculou-se a média da declividade dos perfis.
- v.  $i = CN \cdot \bar{i}_{máx}$ , onde  $CN$  é parâmetro *curve number* do Método SCS, adimensional, e  $\bar{i}_{máx}$  é a média dos valores de intensidade máxima obtidas nos eventos de precipitação considerados neste estudo.
- vi. No dia 01/02/2012 foram realizados ensaios de condutividade hidráulica saturada utilizando o permeâmetro de Guelph em 2 profundidades (10 e 50 cm) em 6 pontos da bacia, totalizando 12 ensaios. Utilizou-se o valor médio obtido nos ensaios.
- vii. Traçado do perfil longitudinal do canal principal utilizando o software Arcgis, e em seguida foi ajustada uma equação polinomial de segundo grau conforme sugerido em Loukas & Quick (1996).

Os valores adotados ou estimados para os parâmetros da Tabela 7 são apresentados no Apêndice C.

#### 4.6 CÁLCULO DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES

A análise de correlação e em seguida a regressão linear multivariada foi realizada utilizando como variáveis independentes: vazão de pico ( $Q_p$ ), duração da chuva ( $t_d$ ), precipitação total ( $P$ ), intensidade máxima ( $i_{máx}$ ) e índice de precipitação antecedente ( $API$ ). Sendo que o  $API$  foi calculado para 150 intervalos diferentes, mas no texto foram selecionados 24 intervalos já que se encontrava muita repetição nos valores quanto mais se distanciava dos eventos.

As variáveis independentes utilizadas no processo de regressão linear multivariada foram calculadas para cada um dos 30 eventos de chuva selecionados da seguinte maneira:

- a) Vazão de pico ( $Q_p$ ): procurou-se no evento selecionado a vazão máxima registrada em cada evento.

- b) Duração da chuva ( $t_i$ ): período total de duração da chuva que originou cada evento, conforme pode-se observar na Figura 2.
- c) Precipitação total ( $P$ ): precipitação total acumulada de cada evento.
- d) Intensidade máxima ( $i_{máx}$ ): localizou-se em cada evento a intensidade máxima registrada em mm/10min.
- e) Índice de precipitação antecedente ( $API$ ): foi calculado considerando sempre a medição imediatamente anterior ao início da chuva do evento. Foi calculado para diversos períodos: dias, horas, 30, 20 e 10 minutos, utilizando a Equação (39) conforme sugerido por Linsley & Kohler (1951). O ponto de partida para o cálculo de  $API$  foi imediatamente anterior ao começo da chuva que caracterizou o evento selecionado.

$$API_i = b_1 \cdot P_1 + b_2 \cdot P_2 + b_3 \cdot P_3 + \dots + b_i \cdot P_i \quad (39)$$

onde  $P_i$  é o acumulado de chuva que ocorreu no  $i$ -ésimo período anterior à chuva do evento em questão, em mm; e  $b_i$  é uma constante calculada como  $b_i = 1/i$ .

#### 4.7 REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A análise de correlação antecedeu a regressão linear múltipla, momento em que se buscou alguma relação entre as variáveis independentes e a variável dependente, no caso  $t_c$ .

Neste trabalho utilizou-se o software STATISTICA 6.0 para gerar a matriz de correlação linear entre todas as variáveis pesquisadas. O coeficiente de correlação (linear) de Pearson descreve a correlação linear dos dados de duas variáveis aleatórias e não depende da unidade de medida. Para isso, são considerados valores normalizados de desvio da média com relação ao desvio padrão equações (40) e (41).

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \quad (40)$$

$$y'_i = \frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \quad (41)$$

onde  $\bar{x}$  é a média de  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ;  $\bar{y}$  é a média de  $y_1, y_2, \dots, y_n$ ;  $s_x$  é o desvio padrão de  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ; e  $s_y$  é o desvio padrão de  $y_1, y_2, \dots, y_n$ ; e  $(i = 1, 2, \dots, n)$ .

Dessa forma, o mesmo programa de análise estatística já citado aplica a Equação (42) para calcular o coeficiente de correlação de Pearson. Este coeficiente está sempre no intervalo entre 1 (correlação linear positiva) e -1 (correlação linear negativa). Quanto mais próximo de 1 (ou -1) mais forte será a correlação nos dados observados. Quando  $r = 1$ , todos os pontos estarão exatamente sobre uma reta ascendente, ou seja, a correlação é positiva e perfeita. Ao contrário, se ocorrer  $r = -1$  todos os pontos estarão exatamente sobre uma reta descendente, ou seja, a correlação é negativa e perfeita. Quando  $r$  tiver um valor próximo de 0 (zero) significa que não há correlação nos dados.

$$r = \frac{n \cdot \sum (x_i \cdot y_i) - (\sum x_i) \cdot (\sum y_i)}{\sqrt{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (42)$$

onde  $r$  é o coeficiente amostral de correlação de Pearson.

Após a seleção das variáveis independentes  $Q_p$  e  $API$  de 21 dias, novamente foi utilizado o software STATISTICA 6.0 para consolidar os parâmetros do modelo de regressão linear multivariada. O programa aplica o método dos mínimos quadrados que busca descrever a reta que passa o mais próximo possível dos pontos observados.

A etapa seguinte foi a análise de resíduos, em que se analisou se os resíduos apresentam distribuição normal, e se não tem correlação com as variáveis independentes para validar o modelo.

#### 4.8 ANÁLISE COMPARATIVA

A análise comparativa foi realizada com dois enfoques. O primeiro é para comparar as 2 bases cartográficas em questão (1:5.000 e 1:10.000). Para isso, foram comparados os  $t_c$  calculados a partir da aplicação de cada fórmula de estimativa morfométrica. O segundo enfoque é a comparação entre a média de  $t_c$  medidos nos eventos e os calculados com cada uma das fórmulas de estimativa morfométrica utilizando a base de escala 1:5.000.

O erro percentual foi utilizado para efetuar as comparações:

$$E_{\%} = \left( \frac{\text{medido} - \text{calculado}}{\text{medido}} \right) \cdot 100 \quad (43)$$





## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ESCALAS

Na Tabela 8 são apresentados alguns parâmetros morfométricos para comparação entre as 2 bases. Pela verificação do erro, percebe-se que a maioria estava subestimada com a base de menor detalhe. O levantamento topográfico confirmou sua extrema importância, pois os valores de parâmetros morfométricos da bacia muito relevantes se alteraram, a começar pela delimitação da bacia (Figura 14).

Os parâmetros relacionados ao comprimento da drenagem e à área da bacia foram os que apresentaram maiores erros. Em seguida, o maior erro é no perímetro, com aproximadamente 18% de erro.

Tabela 8 – Parâmetros morfométricos e comparação das duas escalas.

| <b>Parâmetro</b>           | <b>unidade</b>      | <b>1:10.000</b> | <b>1:5.000</b> | <b>Erro (%)</b> |
|----------------------------|---------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Área                       | (hec)               | 4,24            | 5,26           | -19,5           |
| Compr. Drenagem            | (m)                 | 364,80          | 506,25         | -27,9           |
| Dens. Drenagem             | (m/m <sup>2</sup> ) | 0,00860         | 0,00962        | -10,5           |
| Perímetro                  | (m)                 | 817,57          | 994,21         | -17,8           |
| Cota nascente              | (m)                 | 969,97          | 964,05         | 0,6             |
| Cota exultória             | (m)                 | 879,31          | 880,67         | -0,2            |
| Compr. Rio Principal       | (m)                 | 292,25          | 276,62         | 5,7             |
| Declividade média do canal | (m/m)               | 0,31            | 0,30           | 2,9             |

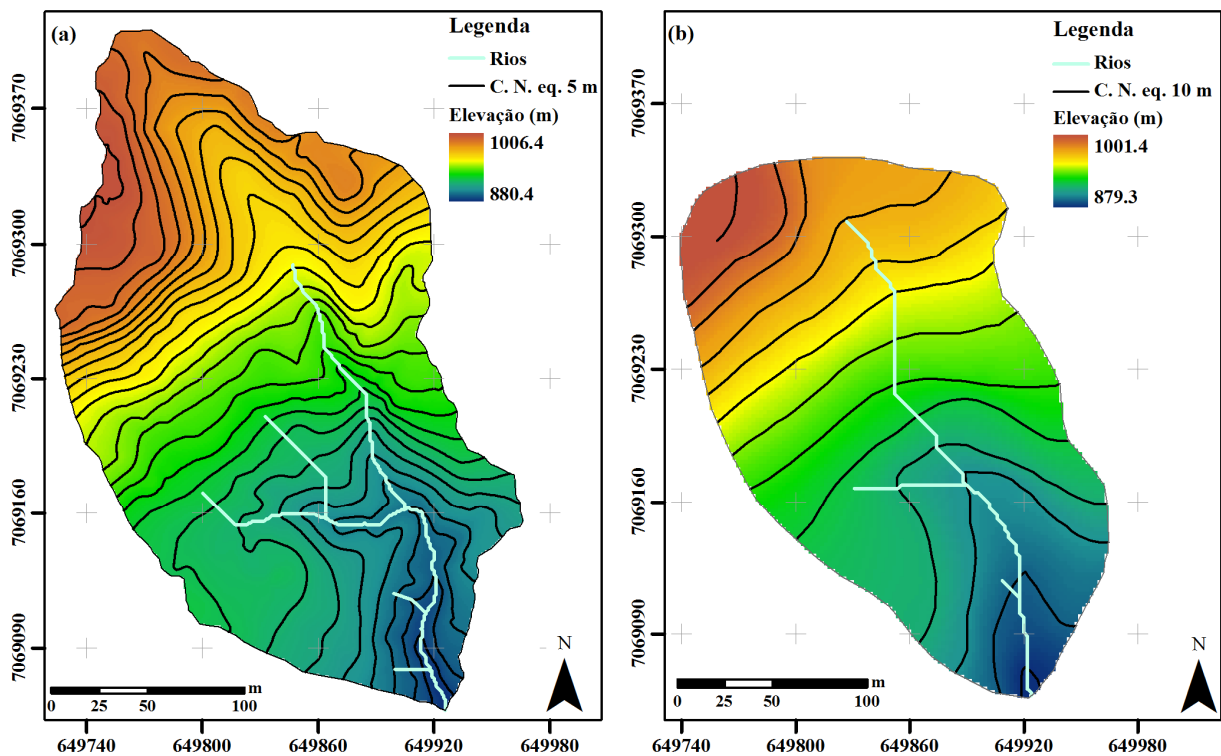


Figura 14 – Mapas de elevação da ARA. (a) Base cartográfica obtida a partir do levantamento topográfico, escala 1:5.000; e (b) Base cartográfica do levantamento aéreo da Prefeitura Municipal de Rio Negrinho, escala 1:10.000.

## 5.2 NOVA FÓRMULA DE $t_c$

As variáveis independentes estimadas com base nos hidrogramas e hietogramas apresentam alta variabilidade, assim como o  $t_c$  (Tabela 9). Os eventos n. 1, 2 e 3 ocorreram em agosto e setembro de 2011, uma época bastante chuvosa. A média de chuva destes meses foi aproximadamente o dobro do que nos meses restantes da série analisada. Estes eventos são os maiores da série, e conseqüentemente correspondem aos maiores valores de  $t_c$  observados. O restante dos eventos analisados tem  $t_c$  entre 8,75 e 0,92 horas.

A análise de correlação linear simples entre as variáveis independentes e  $t_c$  resultou na matriz de correlação linear (Tabela 10). Os coeficientes de correlação mais próximos de 1 encontrados são de  $t_c$  com  $Q_p$  e  $API_{21d}$ . Praticamente não existe correlação de  $t_c$  com  $API$  de períodos mais curtos (hora ou minuto) anteriores ao evento considerado e com  $i_{máx}$ . Isto pode acontecer, porque como a bacia é florestal, a capacidade de retenção de umidade é alta. E assim, o  $API$  considerando a chuva que ocorreu há 21 dias tem maior influência no valor de  $t_c$ . É importante ressaltar que a medida que vai sendo considerado um período maior, a multiplicação de  $P_i$  e  $b_i$  fica tão pequena que a diferença é desprezível. Por isso, foi selecionado o  $API$  de 21 dias.

Os coeficientes de correlação de  $t_c$  com  $t_d$  e  $P$ , apesar de significativos, não são os mais próximos de 1. Como a medida que se aumenta a quantidade de variáveis independentes a aplicação do modelo é dificultada, optou-se por não utilizar estas variáveis no modelo de regressão.

A respeito da correlação entre as variáveis independentes,  $Q_p$  apresenta correlação significativa com  $t_d$  e  $P$ , e não com  $i_{máx}$ . Este fato pode ser considerado mais um indício de que o armazenamento na bacia é um fator mais significativo na geração de vazão, já que  $i_{máx}$  não apresentou efeito imediato.

Assim, propõe-se que o  $t_c$  é função da  $Q_p$  e do  $API$ :  $t_c = f(Q_p, API)$ . Para a bacia de estudo, Araponga, foi encontrado como mais adequado para representar o  $t_c$ , o de 21 dias. Porém, para cada bacia, de acordo com suas características de cobertura do solo, tipo e propriedades do solo deve ser investigado o período que represente melhor o  $t_c$ .

Tabela 9 – Variáveis independentes medidas nos hidrogramas e hietogramas, bem como sua média, mediana e desvio padrão.

| Evento n.    | $t_c$ | $Q_p$ | $t_d$ | $P$   | $i_{máx}$ | API dias |        |        |        |       |       |       | API horas |       |      |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------|----------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-----------|-------|------|
|              |       |       |       |       |           | 30       | 28     | 25     | 21     | 14    | 7     | 1     | 24        | 12    | 1    |
| 1            | 17,50 | 44,47 | 5,50  | 38,10 | 4,32      | 56,00    | 55,86  | 55,79  | 54,53  | 51,95 | 37,72 | 36,83 | 4,77      | 4,62  | 0,00 |
| 2            | 16,17 | 39,15 | 10,33 | 54,61 | 3,81      | 49,48    | 46,53  | 46,53  | 43,28  | 42,25 | 32,60 | 27,94 | 5,76      | 5,67  | 0,00 |
| 3            | 26,50 | 47,02 | 11,17 | 46,99 | 2,03      | 104,28   | 103,79 | 103,79 | 103,59 | 98,54 | 88,98 | 44,45 | 5,78      | 4,99  | 0,25 |
| 4            | 1,17  | 5,25  | 1,67  | 10,41 | 2,03      | 12,26    | 12,25  | 12,25  | 11,94  | 10,51 | 8,33  | 7,87  | 1,24      | 1,24  | 0,00 |
| 5            | 8,00  | 28,00 | 4,83  | 23,62 | 2,79      | 58,51    | 58,42  | 58,25  | 58,05  | 56,84 | 55,45 | 50,29 | 13,72     | 13,60 | 1,78 |
| 6            | 7,17  | 11,60 | 9,17  | 42,42 | 2,54      | 12,32    | 12,32  | 11,74  | 11,72  | 5,95  | 5,13  | 0,25  | 0,25      | 0,25  | 0,25 |
| 7            | 8,75  | 8,99  | 2,17  | 8,89  | 1,27      | 60,36    | 60,33  | 60,22  | 59,11  | 56,66 | 56,16 | 46,74 | 7,88      | 6,43  | 1,78 |
| 8            | 1,25  | 10,66 | 1,17  | 23,62 | 8,13      | 9,54     | 8,67   | 8,00   | 7,96   | 7,44  | 1,17  | 0,51  | 0,03      | 0,02  | 0,00 |
| 9            | 1,83  | 4,09  | 0,67  | 4,06  | 1,27      | 18,51    | 18,49  | 18,20  | 15,27  | 15,05 | 11,79 | 11,43 | 5,67      | 5,67  | 0,00 |
| 10           | 3,08  | 2,21  | 1,00  | 11,43 | 6,60      | 20,22    | 20,18  | 19,32  | 17,07  | 16,87 | 13,87 | 7,87  | 0,57      | 0,32  | 0,00 |
| 11           | 1,25  | 2,26  | 0,33  | 11,43 | 4,57      | 12,53    | 10,43  | 10,06  | 9,91   | 7,59  | 7,44  | 0,25  | 0,02      | 0,02  | 0,00 |
| 12           | 2,08  | 6,19  | 2,33  | 21,49 | 5,08      | 19,51    | 18,62  | 18,10  | 18,09  | 16,01 | 22,75 | 8,79  | 0,93      | 0,70  | 0,00 |
| 13           | 2,00  | 2,36  | 1,33  | 5,72  | 3,35      | 22,20    | 22,20  | 22,15  | 20,68  | 19,64 | 15,12 | 8,56  | 1,34      | 1,30  | 0,24 |
| 14           | 3,83  | 4,30  | 2,33  | 11,16 | 2,38      | 26,20    | 26,19  | 26,15  | 24,70  | 24,79 | 20,53 | 14,76 | 1,91      | 1,46  | 0,48 |
| 15           | 2,00  | 4,19  | 2,17  | 8,30  | 2,38      | 33,68    | 33,67  | 33,64  | 32,24  | 30,69 | 23,55 | 14,75 | 1,08      | 0,52  | 0,00 |
| 16           | 1,42  | 3,56  | 0,67  | 10,74 | 4,81      | 13,89    | 12,87  | 12,76  | 12,01  | 10,65 | 7,06  | 0,95  | 0,08      | 0,04  | 0,00 |
| 17           | 1,17  | 2,75  | 3,17  | 11,15 | 2,13      | 16,93    | 16,92  | 14,90  | 13,43  | 11,43 | 7,11  | 4,77  | 1,74      | 1,74  | 1,18 |
| 18           | 1,17  | 4,81  | 0,83  | 9,82  | 5,53      | 16,16    | 14,92  | 13,75  | 12,84  | 10,94 | 3,05  | 0,00  | 0,00      | 0,00  | 0,00 |
| 19           | 1,83  | 1,47  | 2,17  | 5,68  | 0,71      | 21,34    | 20,15  | 19,90  | 18,24  | 17,28 | 9,40  | 2,85  | 2,10      | 2,10  | 1,42 |
| 20           | 2,83  | 0,43  | 1,33  | 5,68  | 1,90      | 4,14     | 3,92   | 3,47   | 3,47   | 2,85  | 1,55  | 0,48  | 0,12      | 0,12  | 0,00 |
| 21           | 1,67  | 2,60  | 0,50  | 7,71  | 5,55      | 9,36     | 9,21   | 9,21   | 9,21   | 8,09  | 7,69  | 5,45  | 1,37      | 1,34  | 0,00 |
| 22           | 3,17  | 0,44  | 1,33  | 5,20  | 0,95      | 11,64    | 11,64  | 11,64  | 11,56  | 10,59 | 10,23 | 2,14  | 0,35      | 0,24  | 0,24 |
| 23           | 1,50  | 0,84  | 1,50  | 12,19 | 4,11      | 3,66     | 3,57   | 3,30   | 2,47   | 2,17  | 2,17  | 0,00  | 0,00      | 0,00  | 0,00 |
| 24           | 2,33  | 0,32  | 0,67  | 3,78  | 1,18      | 17,18    | 16,92  | 16,40  | 15,80  | 15,77 | 15,77 | 13,63 | 1,20      | 1,20  | 0,00 |
| 25           | 0,92  | 5,30  | 0,83  | 18,75 | 5,21      | 3,77     | 3,77   | 3,77   | 3,18   | 2,05  | 1,68  | 0,00  | 0,00      | 0,00  | 0,00 |
| 26           | 1,75  | 1,17  | 0,50  | 8,77  | 2,72      | 5,49     | 5,11   | 5,08   | 4,24   | 4,05  | 3,44  | 0,48  | 0,05      | 0,05  | 0,00 |
| 27           | 6,67  | 28,27 | 10,67 | 89,54 | 4,30      | 18,06    | 18,01  | 18,01  | 17,98  | 16,61 | 15,75 | 7,20  | 1,78      | 1,76  | 0,00 |
| 28           | 8,75  | 17,64 | 4,50  | 27,71 | 3,82      | 52,31    | 52,31  | 52,29  | 52,07  | 50,49 | 49,42 | 12,65 | 3,86      | 3,86  | 1,44 |
| 29           | 4,17  | 19,99 | 1,83  | 14,85 | 5,86      | 63,88    | 60,52  | 59,02  | 58,68  | 58,46 | 56,60 | 56,00 | 11,01     | 10,80 | 1,92 |
| 30           | 2,67  | 13,97 | 2,67  | 17,08 | 2,61      | 42,76    | 42,76  | 42,56  | 42,13  | 37,95 | 35,98 | 18,11 | 3,43      | 3,42  | 0,00 |
| Média        | 4,82  | 10,81 | 2,98  | 19,03 | 3,47      | 27,21    | 26,69  | 26,34  | 25,52  | 24,01 | 20,92 | 13,53 | 2,60      | 2,45  | 0,37 |
| Mediana      | 2,21  | 4,55  | 1,75  | 11,30 | 3,07      | 18,29    | 18,25  | 18,05  | 16,44  | 15,89 | 12,83 | 7,87  | 1,29      | 1,27  | 0,00 |
| Desv. padrão | 5,86  | 13,46 | 3,21  | 18,77 | 1,85      | 23,55    | 23,38  | 23,43  | 23,39  | 22,83 | 21,60 | 16,71 | 3,42      | 3,32  | 0,64 |

Tabela 9 – Continuação.

| Evento n.    | API 30 minutos |      |      | API 20 minutos |      |      |      | API 10 minutos |      |      |      |
|--------------|----------------|------|------|----------------|------|------|------|----------------|------|------|------|
|              | 24             | 12   | 1    | 36             | 24   | 12   | 1    | 36             | 24   | 12   | 1    |
| 1            | 2,40           | 0,80 | 0,00 | 1,62           | 1,22 | 0,03 | 0,00 | 0,28           | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| 2            | 3,02           | 2,76 | 0,00 | 2,05           | 1,88 | 1,08 | 0,00 | 0,96           | 0,56 | 0,10 | 0,00 |
| 3            | 2,63           | 1,17 | 0,00 | 1,81           | 1,23 | 0,76 | 0,00 | 0,42           | 0,39 | 0,08 | 0,00 |
| 4            | 0,70           | 0,35 | 0,00 | 0,47           | 0,24 | 0,24 | 0,00 | 0,12           | 0,12 | 0,11 | 0,00 |
| 5            | 7,33           | 6,65 | 0,00 | 5,09           | 4,98 | 3,60 | 0,00 | 2,40           | 1,88 | 1,09 | 0,00 |
| 6            | 0,25           | 0,25 | 0,25 | 0,13           | 0,13 | 0,13 | 0,00 | 0,08           | 0,08 | 0,08 | 0,00 |
| 7            | 3,72           | 3,42 | 0,51 | 2,59           | 2,51 | 1,82 | 0,25 | 1,25           | 0,97 | 0,80 | 0,00 |
| 8            | 0,01           | 0,00 | 0,00 | 0,01           | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 9            | 3,04           | 3,04 | 0,00 | 2,22           | 2,22 | 2,22 | 0,00 | 1,14           | 1,14 | 1,12 | 0,00 |
| 10           | 0,16           | 0,05 | 0,00 | 0,11           | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,02           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 11           | 0,01           | 0,00 | 0,00 | 0,01           | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 12           | 0,36           | 0,36 | 0,00 | 0,25           | 0,25 | 0,07 | 0,00 | 0,13           | 0,03 | 0,00 | 0,00 |
| 13           | 0,70           | 0,41 | 0,00 | 0,47           | 0,30 | 0,19 | 0,00 | 0,15           | 0,10 | 0,10 | 0,00 |
| 14           | 0,76           | 0,35 | 0,00 | 0,55           | 0,54 | 0,20 | 0,00 | 0,14           | 0,11 | 0,11 | 0,00 |
| 15           | 0,29           | 0,22 | 0,00 | 0,20           | 0,17 | 0,14 | 0,00 | 0,08           | 0,07 | 0,02 | 0,00 |
| 16           | 0,02           | 0,02 | 0,00 | 0,01           | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 17           | 1,00           | 0,85 | 0,24 | 0,83           | 0,81 | 0,69 | 0,24 | 0,37           | 0,34 | 0,32 | 0,00 |
| 18           | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 19           | 1,15           | 1,15 | 0,00 | 0,79           | 0,79 | 0,79 | 0,00 | 0,44           | 0,44 | 0,42 | 0,00 |
| 20           | 0,06           | 0,06 | 0,00 | 0,04           | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,02           | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| 21           | 0,74           | 0,71 | 0,00 | 0,50           | 0,48 | 0,48 | 0,00 | 0,25           | 0,25 | 0,03 | 0,00 |
| 22           | 0,12           | 0,12 | 0,00 | 0,12           | 0,12 | 0,12 | 0,00 | 0,06           | 0,06 | 0,06 | 0,00 |
| 23           | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 24           | 0,61           | 0,00 | 0,00 | 0,41           | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 25           | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 26           | 0,03           | 0,00 | 0,00 | 0,02           | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 27           | 0,95           | 0,95 | 0,00 | 0,65           | 0,65 | 0,46 | 0,00 | 0,33           | 0,23 | 0,05 | 0,00 |
| 28           | 2,25           | 2,16 | 0,48 | 1,64           | 1,64 | 1,23 | 0,24 | 0,83           | 0,66 | 0,42 | 0,00 |
| 29           | 6,25           | 4,67 | 1,20 | 4,43           | 4,03 | 2,56 | 0,72 | 1,88           | 1,47 | 0,83 | 0,24 |
| 30           | 1,77           | 1,30 | 0,00 | 1,20           | 1,08 | 0,50 | 0,00 | 0,45           | 0,26 | 0,04 | 0,00 |
| Média        | 1,35           | 1,06 | 0,09 | 0,94           | 0,85 | 0,58 | 0,05 | 0,39           | 0,31 | 0,19 | 0,01 |
| Mediana      | 0,70           | 0,35 | 0,00 | 0,47           | 0,27 | 0,16 | 0,00 | 0,14           | 0,09 | 0,05 | 0,00 |
| Desv. padrão | 1,83           | 1,59 | 0,25 | 1,28           | 1,23 | 0,89 | 0,15 | 0,59           | 0,47 | 0,33 | 0,04 |

Tabela 10 – Matriz de correlação linear simples (r-Pearson).

| (1)  | (2)  | (3)         | (4)         | (5)         | (6)   | (7)         | (8)         | (9)         | (10)        |             |             |             |             | (11)        |             |             | (12)        |       |             | (13)  |       |             | (14)  |       |       | (15)  |        |       | (16)  |        |    | (17) |        |    | (18) |    |   | (19) |    |    | (20) |  |  | (21) |  |  | (22) |  |  | (23) |  |  | (24) |  |  | (25) |  |  | (26) |  |  | (27) |  |  | (28) |  |  | (29) |  |  |
|------|------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|----|------|--------|----|------|----|---|------|----|----|------|--|--|------|--|--|------|--|--|------|--|--|------|--|--|------|--|--|------|--|--|------|--|--|------|--|--|------|--|--|
|      |      |             |             |             |       |             |             |             | dias        |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             |       | horas |       |       | 30 min |       |       | 20 min |    |      | 10 min |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
|      |      |             |             |             |       |             |             |             | $t_c$       | $Q_p$       | $t_d$       | $P$         | $i_{máx}$   | 30          | 21          | 14          | 7           | 6     | 5           | 4     | 3     | 2           | 1     | 24    | 12    | 1     | 24     | 12    | 1     | 36     | 24 | 12   | 1      | 36 | 24   | 12 | 1 | 36   | 24 | 12 | 1    |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (1)  | 1,00 | <b>0,90</b> | <b>0,79</b> | <b>0,61</b> | -0,13 | <b>0,82</b> | <b>0,82</b> | <b>0,81</b> | <b>0,76</b> | <b>0,78</b> | <b>0,78</b> | <b>0,77</b> | <b>0,77</b> | <b>0,74</b> | <b>0,64</b> | <b>0,47</b> | <b>0,45</b> | 0,12  | <b>0,43</b> | 0,31  | 0,07  | <b>0,42</b> | 0,36  | 0,24  | 0,02  | 0,29  | 0,23   | 0,07  | -0,02 |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (2)  |      | 1,00        | 0,81        | 0,76        | 0,09  | 0,78        | 0,78        | 0,77        | 0,72        | 0,73        | 0,73        | 0,71        | 0,72        | 0,71        | 0,68        | 0,58        | 0,58        | 0,13  | 0,56        | 0,45  | 0,12  | 0,55        | 0,50  | 0,35  | 0,10  | 0,43  | 0,34   | 0,14  | 0,13  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (3)  |      |             | 1,00        | 0,89        | -0,11 | 0,54        | 0,55        | 0,53        | 0,49        | 0,51        | 0,51        | 0,49        | 0,49        | 0,46        | 0,37        | 0,31        | 0,30        | 0,06  | 0,29        | 0,24  | 0,02  | 0,28        | 0,25  | 0,18  | -0,05 | 0,22  | 0,17   | 0,00  | -0,07 |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (4)  |      |             |             | 1,00        | 0,19  | 0,34        | 0,34        | 0,33        | 0,31        | 0,33        | 0,33        | 0,31        | 0,31        | 0,29        | 0,22        | 0,18        | 0,18        | -0,09 | 0,17        | 0,14  | -0,01 | 0,16        | 0,14  | 0,06  | -0,07 | 0,12  | 0,05   | -0,12 | -0,04 |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (5)  |      |             |             |             | 1,00  | -0,13       | -0,15       | -0,14       | -0,15       | -0,13       | -0,13       | -0,13       | -0,13       | -0,14       | -0,11       | -0,14       | -0,12       | -0,21 | -0,12       | -0,13 | 0,10  | -0,12       | -0,11 | -0,18 | 0,12  | -0,12 | -0,17  | -0,28 | 0,25  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (6)  |      |             |             |             |       | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 0,98        | 0,97        | 0,97        | 0,97        | 0,97        | 0,93        | 0,89        | 0,76        | 0,73        | 0,48  | 0,73        | 0,61  | 0,39  | 0,72        | 0,67  | 0,55  | 0,38  | 0,61  | 0,56   | 0,40  | 0,29  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (7)  |      |             |             |             |       |             | 1,00        | 1,00        | 0,98        | 0,97        | 0,97        | 0,97        | 0,97        | 0,93        | 0,88        | 0,75        | 0,72        | 0,47  | 0,71        | 0,60  | 0,37  | 0,71        | 0,65  | 0,54  | 0,36  | 0,59  | 0,54   | 0,39  | 0,27  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (8)  |      |             |             |             |       |             |             | 1,00        | 0,99        | 0,98        | 0,97        | 0,97        | 0,97        | 0,94        | 0,89        | 0,77        | 0,73        | 0,49  | 0,73        | 0,61  | 0,38  | 0,72        | 0,67  | 0,56  | 0,37  | 0,61  | 0,56   | 0,40  | 0,28  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (9)  |      |             |             |             |       |             |             |             | 1,00        | 0,99        | 0,99        | 0,99        | 0,99        | 0,94        | 0,90        | 0,78        | 0,75        | 0,52  | 0,75        | 0,65  | 0,43  | 0,74        | 0,70  | 0,60  | 0,41  | 0,64  | 0,60   | 0,44  | 0,31  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (10) |      |             |             |             |       |             |             |             |             | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 0,95        | 0,90        | 0,79        | 0,75        | 0,54  | 0,75        | 0,65  | 0,44  | 0,75        | 0,70  | 0,61  | 0,43  | 0,65  | 0,61   | 0,46  | 0,32  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (11) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             | 1,00        | 1,00        | 1,00        | 0,95        | 0,89        | 0,79        | 0,75        | 0,54  | 0,75        | 0,65  | 0,45  | 0,75        | 0,70  | 0,61  | 0,43  | 0,65  | 0,62   | 0,46  | 0,32  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (12) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             | 1,00        | 1,00        | 0,95        | 0,89        | 0,77        | 0,74        | 0,53  | 0,74        | 0,64  | 0,45  | 0,73        | 0,69  | 0,59  | 0,44  | 0,64  | 0,60   | 0,45  | 0,32  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (13) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             | 1,00        | 0,96        | 0,90        | 0,78        | 0,74        | 0,53  | 0,74        | 0,64  | 0,44  | 0,74        | 0,69  | 0,60  | 0,43  | 0,64  | 0,60   | 0,45  | 0,33  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (14) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             | 1,00        | 0,95        | 0,81        | 0,78        | 0,49  | 0,77        | 0,66  | 0,41  | 0,77        | 0,72  | 0,61  | 0,41  | 0,66  | 0,61   | 0,46  | 0,38  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (15) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 1,00        | 0,91        | 0,89        | 0,58  | 0,89        | 0,79  | 0,51  | 0,88        | 0,84  | 0,72  | 0,51  | 0,79  | 0,73   | 0,58  | 0,48  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (16) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 1,00        | 1,00        | 0,70  | 1,00        | 0,96  | 0,51  | 0,99        | 0,98  | 0,93  | 0,51  | 0,96  | 0,93   | 0,81  | 0,46  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (17) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 1,00        | 0,69  | 1,00        | 0,97  | 0,50  | 1,00        | 0,99  | 0,94  | 0,51  | 0,97  | 0,94   | 0,81  | 0,47  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (18) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | 1,00  | 0,71        | 0,73  | 0,70  | 0,72        | 0,74  | 0,74  | 0,71  | 0,75  | 0,76   | 0,74  | 0,46  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (19) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       | 1,00        | 0,97  | 0,54  | 1,00        | 0,99  | 0,94  | 0,55  | 0,97  | 0,94   | 0,82  | 0,51  |        |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (20) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       | 1,00  | 0,50        | 0,97  | 0,99  | 0,98  | 0,50  | 1,00   | 0,98  | 0,88  | 0,43   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (21) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       | 1,00        | 0,55  | 0,55  | 0,50  | 0,97  | 0,55   | 0,54  | 0,49  | 0,84   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (22) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             | 1,00  | 0,99  | 0,95  | 0,56  | 0,98   | 0,95  | 0,83  | 0,51   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (23) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             |       | 1,00  | 0,97  | 0,55  | 0,99   | 0,97  | 0,86  | 0,49   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (24) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             |       |       | 1,00  | 0,51  | 0,98   | 1,00  | 0,94  | 0,42   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (25) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             |       |       |       | 1,00  | 0,55   | 0,54  | 0,49  | 0,86   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (26) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             |       |       |       |       | 1,00   | 0,99  | 0,89  | 0,47   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (27) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             |       |       |       |       |        | 1,00  | 0,94  | 0,46   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (28) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             |       |       |       |       |        |       | 1,00  | 0,36   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |
| (29) |      |             |             |             |       |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |       |             |       |       |             |       |       |       |       |        |       |       | 1,00   |    |      |        |    |      |    |   |      |    |    |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |      |  |  |

\*nota-se que os valores destacados são aqueles significativos a ( $p < 0,05$ ) das variáveis independentes em relação a  $t_c$ .

Com base na matriz (Tabela 10) foram escolhidas  $API_{21d}$  e  $Q_p$  como variáveis independentes do modelo de regressão linear multivariada, isto é:

$$t_c = 0,29 \cdot Q_p + 0,08 \cdot API_{21d} - 0,24 \quad (44)$$

onde  $t_c$  é o tempo de concentração, em (h);  $Q_p$  é a vazão máxima registrada no evento, em (L/s), e  $API_{21d}$  é  $API$  calculado segundo a Equação (39) para o período de 21 dias, em (mm).

O modelo apresentou alto coeficiente de determinação ajustado ( $R^2 = 0,83$ , com p-level  $< 0,000$ ). Os coeficientes do modelo são significativos, sendo que  $Q_p$  explica 66% da variável dependente, e  $API_{21d}$  33%. Os residuais têm distribuição normal, e não se correlacionam com as variáveis independentes e dependente tanto calculada como observada (Figura 15). Assim, o modelo de regressão pode ser considerado válido (Figura 15 e Tabela 11).

Tabela 11 – Estatísticas do modelo de regressão.

|                   | $\beta$ | eqm ( $\beta$ ) | B      | eqm (B) | p-level |
|-------------------|---------|-----------------|--------|---------|---------|
| <b>intercepto</b> |         |                 | -0,244 | 0,653   | 0,712   |
| $Q_p$             | 0,662   | 0,121           | 0,288  | 0,052   | 0,000   |
| $API_{21d}$       | 0,305   | 0,121           | 0,076  | 0,030   | 0,018   |

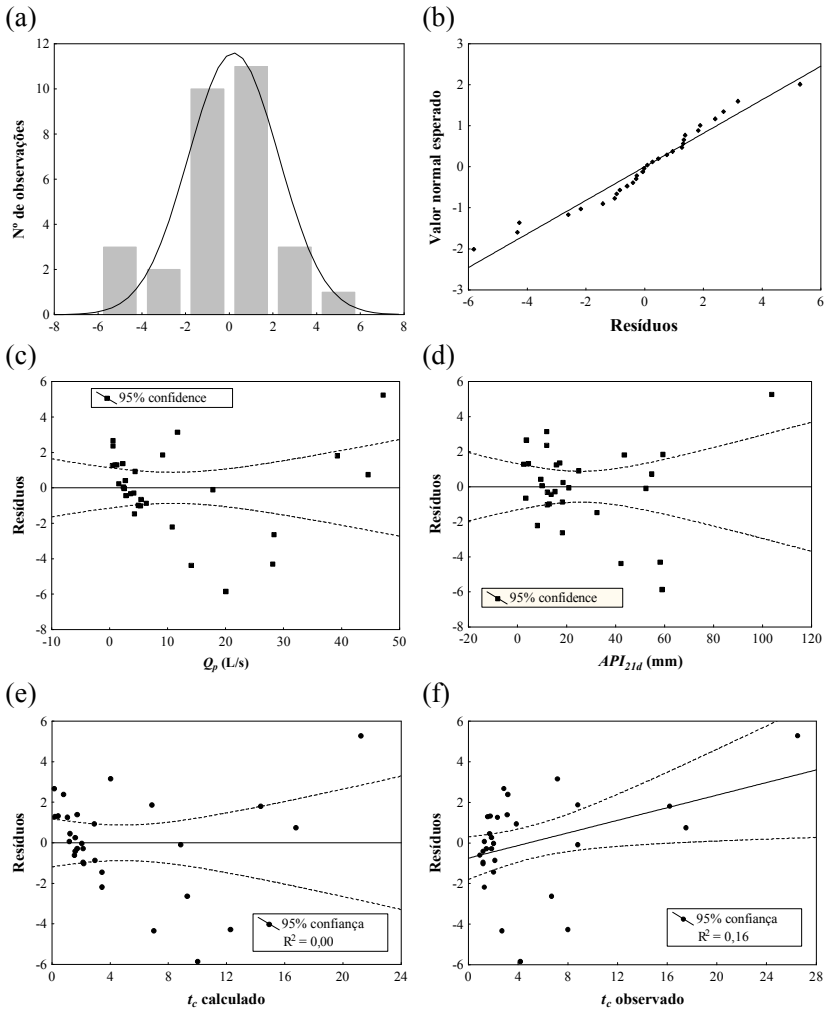


Figura 15 – Estatística do modelo de regressão. (a) Histograma dos resíduos; (b) Normal plot dos resíduos; e (c), (d), (e) e (f) são gráficos dos resíduos com  $Q_p$ ,  $API_{21d}$ ,  $t_c$  calculado e observado, respectivamente.

Uma reflexão sobre o mecanismo de geração de vazão indica uma explicação física para  $Q_p$  ter sido selecionada como uma das variáveis independentes do modelo. Como se pode perceber,  $t_c$  é diretamente proporcional a  $Q_p$ , isso indica que quanto maior a vazão alcançada em



um evento, mais tempo a bacia leva para retornar a condição anterior ao evento.

O coeficiente de correlação positivo entre  $t_c$  e  $Q_p$  indica que a principal componente do escoamento não acontece pelo canal. Isso porque como já mostraram outros trabalhos em bacias onde a principal maneira de escoamento é pelo canal, mantendo constante o comprimento do percurso (canal) da nascente até a exutória, quanto maior a vazão de pico, a velocidade aumenta, e consequentemente o  $t_c$  tem que diminuir (neste caso, tempo de trânsito).

Além disso, a utilização de *API* de 21 dias para descrever o comportamento do  $t_c$  em bacias florestais é uma alternativa interessante, pois possibilita a inclusão da condição de umidade antecedente da bacia. Este fator é muito relevante em bacias florestais.

Segundo os resultados de McCuen et al. (1984) a intensidade da chuva efetiva tem alta correlação com  $t_c$ . Porém, no presente trabalho não se encontrou correlação alta entre parâmetros característicos da precipitação do evento com  $t_c$ . Isso pode ocorrer porque o processo de interceptação em bacias florestais influencia significativamente no balanço hídrico.

A grande diferença entre a nova fórmula e as existentes é que a nova aplica *API*. Especialmente em bacias rurais e/ou florestais, a influência hidrológica do solo do solo é significativa, especialmente espessura do solo. Então *API* pode ser interpretado como uma função de chuva e solo.

O *API* descreve a distribuição da chuva e do armazenamento de água no solo da bacia no período anterior ao evento. Estes fatores são muito relevantes para o estudo de bacias hidrográficas florestais. Pelo uso do valor de  $Q_p$ , e não qualquer outra característica da chuva é possível computar a capacidade de geração de vazão da bacia já descontando as perdas, como por exemplo, por interceptação e infiltração.

### 5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DE $t_c$

Os erros de estimativa de  $t_c$  entre as bases cartográficas variaram entre 0,6 e 20%. Isso já era esperado haja vista as diferenças encontradas entre os parâmetros morfométricos apresentados na seção 5.1 (Tabela 8).

Em geral, o que pode-se perceber, é que as fórmulas subestimaram muito o valor de  $t_c$  (Tabela 12). Erros de 90% também

foram obtidos por Loukas & Quick (1996) em análise comparativa realizada para 2 bacias montanhosas.

A fórmula que mais se aproximou do  $t_c$  medido foi a de Izzard (1946). Isso pode ter acontecido, pois o resultado desta fórmula é mais sensível ao coeficiente de retardo, os parâmetros morfométricos não influenciam tanto no resultado, como nas outras fórmulas. Além disso, a intensidade da chuva tem influência significativa no resultado. McCuen et al. (1984) também concluíram, com análise de sensibilidade, que a intensidade da chuva é o parâmetro mais importante nas fórmulas de  $t_c$ .

A estimativa utilizando a fórmula de Kirpich é a mais subestimada, isso concorda com os resultados obtidos por McCuen et al. (1984).

Apesar de a fórmula de Loukas & Quick (1996) ter sido desenvolvida para bacias de montanha, esta fórmula demanda muitos parâmetros de difícil obtenção, e considera muitas informações do canal. Estes fatores podem ter influenciado no resultado subestimado de  $t_c$ , aproximadamente igual ao das outras fórmulas.

É evidente que o  $t_c$  calculado com a fórmula proposta pelo presente trabalho (Equação 44) teria bom resultado, porém, é importante ressaltar que os parâmetros utilizados na aplicação desta fórmula se justificam fisicamente.

O bom desempenho da fórmula de Izzard implica que a fórmula que possui fatores associados à chuva e ao uso do solo pode obter bom desempenho. Assim, o uso de *API* pode ser uma alternativa, pois *API* traduz uma função de solo e chuva.

Tabela 12 – Cálculo de  $t_c$  utilizando as 2 bases cartográficas e respectivos erros percentuais entre as bases e entre as fórmulas e a média de  $t_c$  medido.

| (1)                        | (2)     | (3)       | (4)     | (5)      | (6)    |
|----------------------------|---------|-----------|---------|----------|--------|
| Fórmula                    | Equação | $t_c$ (h) |         | Erro (%) |        |
|                            |         | 1:10.000  | 1:5.000 | Base*    | Fórm.▪ |
| Kirpich (1940)             | (6)     | 0,038     | 0,048   | -20,7    | -99,2  |
| Pasini (1914)              | (7)     | 0,045     | 0,055   | -18,6    | -99,1  |
| Giandotti (1940)           | (8)     | 0,214     | 0,236   | -9,5     | -95,6  |
| Izzard (1946)              | (9)     | 3,146     | 3,530   | -10,9    | -34,7  |
| Johnstone (1949)           | (10)    | 0,339     | 0,392   | -13,5    | -93,0  |
| Dooge (1956)               | (11)    | 0,121     | 0,135   | -10,2    | -97,5  |
| Kerby-Hathaway (1959)      | (15)    | 0,409     | 0,468   | -12,7    | -91,5  |
| Chow (1962)                | (17)    | 0,108     | 0,130   | -16,9    | -97,8  |
| Morgali & Linsley (1965)   | (18)    | 0,629     | 0,754   | -16,6    | -86,9  |
| Woolhiser & Liggett (1967) | (19)    | 0,590     | 0,702   | -16,0    | -87,8  |
| SCS lag (1975)             | (22)    | 0,577     | 0,629   | -8,2     | -88,0  |
| McCuen et al. (1984)       | (23)    | 0,652     | 0,760   | -14,2    | -86,5  |
| Papadakis & Kazan (1987)   | (24)    | 0,254     | 0,295   | -14,1    | -94,7  |
| Aron et al. (1991)         | (25)    | 0,196     | 0,235   | -16,7    | -95,9  |
| Loukas & Quick (1996)      | (29)    | 0,249     | 0,222   | 12,1     | -94,8  |
| Simas-Hawkins (1996)       | (36)    | 0,416     | 0,419   | -0,6     | -91,4  |
| Presente trabalho          | (44)    | -         | -       | -        | 2,4    |

\* comparação dos resultados de  $t_c$  utilizando as 2 bases cartográficas.

▪ comparação entre a média de  $t_c$  medido e  $t_c$  coluna (4)



## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O reconhecimento e levantamento detalhado das características fisiográficas são fundamentais no estudo de pequenas bacias. Apesar de pequenas bacias tenderem a ser mais homogêneas, uma pequena heterogeneidade pode ter um efeito maior do que teria se a bacia fosse maior, pois essa alteração poderia ser filtrada e se constataria um comportamento médio.

No intuito de obter uma base cartográfica mais detalhada da ARA, o levantamento topográfico foi realizado. Esta atividade se mostrou muito importante para o estudo hidrológico de pequenas bacias. Isso porque foram constatadas diferenças significativas na estimativa de parâmetros morfométricos da bacia. O parâmetro relativo ao comprimento da rede de drenagem foi o que apresentou maior erro, sendo 27,9% menor na base com menos detalhe do que na base mais detalhada. Inclusive a delimitação da bacia se alterou significativamente.

A estimativa hidrológica do  $t_c$  comprovou sua alta variabilidade. Então é importante compreender que quando se atribui um único valor de  $t_c$  à determinada bacia hidrográfica, está se considerando um valor médio. Assim, as fórmulas existentes para estimativa de  $t_c$  resultam neste valor médio.

Como esperado, o cálculo de  $t_c$  para as duas bases cartográficas também apresentou erros significativos, entre 0,6 e 20%, variando de acordo com a fórmula. Sendo que a fórmula de Kirpich (1940) foi a que apresentou maior erro, provavelmente porque é bastante sensível ao valor da área, que foi um dos parâmetros mais diferentes entre as bases cartográficas.

A partir da matriz de correlação foram definidas as variáveis independentes que mais se correlacionam com  $t_c$  ( $API_{21d}$  e  $Q_p$ ). Os coeficientes de correlação linear encontrados são altos, de 0,90 e 0,82, para  $Q_p$  e  $API_{21d}$ , respectivamente. Isto significa que a resposta na ARA, uma bacia florestal, está principalmente condicionada à redistribuição da água da chuva e armazenamento de água no solo, processos estes que são representados pelo  $API$ . A não correlação de  $i_{máx}$  com  $t_c$  reforça a idéia de que a chuva total e imediata não pode ser relacionada aos mecanismos de resposta da bacia.

No mesmo sentido, o fato de  $t_c$  apresentar correlação com  $Q_p$  pode estar associado ao fato de que o tempo que a bacia leva para reestabelecer o estado de umidade do início do evento é proporcional ao grau de umidade atingido por ela, representado pela  $Q_p$ . E ainda, que  $Q_p$

já passou pelos processos de perda da bacia, como por exemplo, interceptação.

Portanto, a proposta é que o  $t_c$  seja encarado como um parâmetro que é função da  $Q_p$  e do  $API$ :  $t_c = f(Q_p, API)$ . Para a bacia do rio Araponga foi encontrado como mais adequado para representar o  $t_c$ , o  $API$  de 21 dias. Porém, para cada bacia, de acordo com suas características de cobertura do solo, tipo e propriedades do solo deve ser investigado o período que represente melhor o  $t_c$ .

A nova fórmula é uma proposta de estimativa de um  $t_c$  médio da bacia a partir de dados de chuva e vazão. Ela apresentou alto coeficiente de determinação, e da análise de resíduos a fórmula pode ser considerada válida. Além disso, a fórmula proposta apresenta explicações fisicamente coerentes apresentadas anteriormente.

Em geral, as fórmulas disponíveis para estimativa do  $t_c$  são com base em dados morfométricos, e às vezes de precipitação. A fórmula proposta neste trabalho, por sua vez, não requer nenhum parâmetro morfométrico, mas sim são necessários dados de precipitação e vazão. A dificuldade de obtenção de dados hidrológicos é maior do que a de informações morfométricas, porém ainda é menos oneroso utilizar a nova fórmula do que encontrar o ponto de inflexão em diversos eventos até se obter uma média confiável.

A necessidade de dados medidos de chuva e vazão, e que a fórmula proposta foi baseada em eventos de uma única bacia pode ser considerada uma desvantagem desta fórmula. Isso pode restringir o intervalo de bacias em que a fórmula seria útil. Então é recomendada a realização de testes da aplicabilidade da fórmula proposta. Inicialmente acredita-se que estes testes devem ser realizados principalmente em bacias com características semelhantes a da bacia Araponga, ou seja, pequenas, florestais e declivosas.

Por fim pode-se concluir que pela análise de  $t_c$  é possível realizar reflexões sobre os mecanismos de geração de vazão em determinada bacia.

## REFERÊNCIAS

- AMERMAN, C.R. The use of unit-source watershed data for runoff prediction. **Water Resour. Res.**, v.1, n.4, p. 499-508, 1965.
- ARON, G.; BALL, J.E.; SMITH, T.A. Fractal concept used in time of concentration estimates. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.117, n.5, p. 635-641, 1991.
- BARNES, B.S. Discussion of “Analysis of runoff characteristics”. **Trans. ASCE**, v.105, p. 106, 1940.
- BAZEMORE, D.E.; ESHLEMAN, K.N.; HOLLENBECK, K.J. The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence. **J. Hydrol.**, v.162, p. 47-75, 1994.
- BERTI, M.; GENEVOIS, R.; SIMONI, A.; TECCA, P.R. Field observations of a debris flow event in the Dolomites. **Geomorphol.**, v.29, n.3-4, p. 265-274, 1999.
- BERTOLI, L. & MOISELLO, U. A regional model for estimating the probability distribution of routed peak discharges. **J. Hydrol.**, v.153, n.1-4, p. 103-138, 1994.
- BETSON, R.P. What is watershed runoff? **J. Geophys. Res.**, Washington, v.69, n.8, p. 1541-1552, 1964.
- BLÖSCHL, G. & SIVAPALAN, M. scale issues in hydrological modelling: a review. **Hydrol. Process.**, v.9, n.3-4, p. 251-290, 1995.
- BRAKENSIEK, D.L.; HEATH, A.L.; COMER, G.H. **Numerical techniques for small watershed flood routing**. USDA, ARS p. 41-113, 1966.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Cria um Grupo de Trabalho para elaborar estudo e apresentar propostas de preservação dos remanescentes e de recuperação de áreas degradadas com o objetivo de promover a conservação do ecossistema da Floresta Ombrófila Mista no estado de Santa Catarina. Portaria n. 49, de 06 de fevereiro de 2002. **Diário Oficial da União**, n.27, p. 63, 2002.
- BRASIL. Lei n. 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, n.246, p. 1, 2006.
- BRUTSAERT, W. **Hydrology: an introduction**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 605 p.
- BUTLER, S.S. Overland-flow travel time versus Reynolds number. **J. Hydrol.**, v.32, n.1-2, p. 175-182, 1977.

- CHEN, C-N. & WONG, T.S.W. Critical rainfall duration for maximum discharge from overland plane. **J. Hydraul. Eng.**, v.119, n.9, p. 1040-1045, 1993.
- CHOW, V.T. **Open channel hydraulics**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1959. 680p.
- CHOW, V.T. **Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins**. Engineering Experiment Station Bulletin n.462. Urbana, Ill.: University of Illinois College of Engineering, 1962. 104 p.
- CHRISTOPHERSEN, N.; NEAL, C.; HOOPER, R.P.; VOGT, R.D.; ANDERSEN, S. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members - a step towards second-generation acidification models. **J. Hydrol.**, v.116, n.1-4, p. 307-320, 1990.
- DESSENA, M.A.; DETTORI, B.; GREPPI, M.; PORCHEDDU, A. Analisi e simulazione della trasformazione afflussi-deflussi del fiume Temo a Reinamare. Studi sassaresi: organo ufficiale della Società sassarese di Scienze mediche e naturali. Sez. 3: **Annali** della Facoltà di Agraria dell'Università di Sassari, 1991. v.34 (1988-1992), p. 65-85.
- DEWALLE, D.R.; SWISTOCK, B.R.; SHARPE, W.E. Three-component tracer model for stormflow on a small Appalachian forested catchment. **J. Hydrol.**, v.104, n.1-4, p. 301-310, 1988.
- DINCER, T.; PAYNE, B.R.; FLORKOWSKI, T.; MARTINEC, J.; TONGIORGI, E. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. **Water Resour. Res.**, v.6, n.1, p. 110-124, 1970.
- DINGMAN, S.L. **Physical Hydrology**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 646p.
- DOOGE, J.C.I. **Synthetic unit hydrographs based on triangular inflow**. 1956. 103 f. M.S. Thesis, Iowa State University, 1956.
- DOOGE, J.C.I., **The linear theory of hydrologic systems**. USDA, Tech. Bull. n. 1468, U.S. Gov. Print. Off, Washington, D.C, 327p, 1973.
- DUNNE, T. & BLACK, R.D. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. **Water Resour. Res.**, v.6, n.2, p.478-490, 1970a.
- DUNNE, T. & BLACK, R.D. Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. **Water Resour. Res.**, Washington, v.6, n.5, p.1296-1311, 1970b.
- DYKES, A.P. & THORNES, J.B. Hillslope hydrology in tropical rainforest steepplands in Brunei. **Hydrol. Process.**, v.14, n.2, p.215-235, 2000.



- FARRELL, D. Experimental watersheds: A historical perspective. **J. Soil Water Conserv.**, v.50, n.5, p. 432-437, 1995.
- FOLMAR, N.D.; MILLER, A.C.; WOODWARD, D.E. History and development of the NRCS lag time equation. **J. Amer. Water Resour. Assoc.**, v.43, n.3, p. 829-838, 2007.
- FREEZE, R.A. Streamflow generation, **Rev. Geophys.**, v.12, n.4, p. 627-647, 1974.
- GERGOV, G. Determination of the time of travel along the river network. **J. Hydrol.**, v.14, n.3-4, p. 293-306, 1971.
- GREPPI, M. **Idrologia**. 4. reimpress. Milano: Ed. Ulrico Hoepli, 2005. 371p.
- GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; SERINALDI, F. Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: continuous simulation method versus event-based approach. **Hydrol. Process.**, v.26, n.20, p. 3124-3134, 2012.
- HACK, J.T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, 294-B, 1957.
- HATHAWAY, G.A. Design of drainage facilities. **ASCE transactions**. v.110, p. 697-730, 1945.
- HENDERSON, F.M. & WOODING, R.A. Overland flow and groundwater flow from a steady rainfall of finite duration, **J. Geophys. Res.**, v.69, n.8, p. 1531-1540, 1964.
- HEWLETT, J.D. Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds. USDA - Forest Service. **Station Paper**, n.132, p.1-11, 1961a.
- HEWLETT, J.D. Watershed management. USDA - Forest Service **Relatório**. Southern Forest Experiment Station, Asheville, p.61-66, 1961b.
- HEWLETT, J.D. & HIBBERT, A.R. Increases in water yield after several types of forest cutting. **Quart. Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.**, v.6, n.3, p. 5-17, 1961.
- HEWLETT, J.D. & HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. **In:** W.E. Sopper & H.W. Lull (eds), International Symposium on Forest Hydrology. New York: Pergamon, 1967. p. 275-290.
- HEWLETT, J.D.; LULL, H.W.; REINHART, K.G. In defense of experimental watersheds. **Water Resour. Res.**, v.5, n.1, p. 306-316, 1969.

- HOOPER, R.P.; CHRISTOPHERSEN, N.; PETERS, N.E. Modelling streamwater chemistry as a mixture of soilwater end-members - an application to the Panola Mountain catchment, Georgia, U.S.A. **J. Hydrol.**, v.116, n.1-4, p. 321-343, 1990.
- HORTON, R.E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Trans. Am. Geophys. Union**, v.14, p. 446-460, 1933.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Manuais Técnicos em Geociências no. 1. Rio de Janeiro: RJ, 92 p. 1992.
- JOHNSTONE, D. & CROSS, W.P. **Elements of applied hydrology**. New York: The Ronald Press Company, 1949. 276 p.
- JONES, J.A. & SWANSON, F.J. Hydrologic inferences from comparisons among small basin experiments. **Hydrol. Process.**, v.15, n.12, p. 2363-2366, 2001.
- KENNEDY, V.C.; KENDALL, C.; ZELLWEGER, G.W.; WYERMAN, T.A.; AVANZINO, R.J. Determination of the components of stormflow using water chemistry and environmental isotopes, Mattole River basin, California. **J. Hydrol.**, v.84, n.1-2, p. 107-140, 1986.
- KENT, K.M. **A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds**. SCS-TP-149, USDA, Soil Conservation Service, Washington: D.C., 1973, 21 p.
- KERBY, W.S. Time of concentration for overland flow. **Engineers notebook**. v.174, p. 60, 1959.
- KIBLER, D.F. Desk-top methods for urban stormwater calculation, In: KIBLER, D.F. (ed.), **Urban stormwater hydrology**. American Geophysical Union, Washington DC, 1982, v.3, p. 87-135.
- KIRPICH, T.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. **J. of Civ. Eng.**, v.10, n.6, p. 362, 1940.
- KLEIN, R.M. **Mapa Fitogeográfico do Estado de Santa Catarina**. Flora Ilustrada Catarinense. V Parte. Itajaí: P. Raulino Reitz, 1978, 24 p.
- KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; LINO, J.F.; SILVA, R.V. Estimativa morfométrica e hidrológica do tempo de concentração na bacia do campus da UFSC, Florianópolis - SC. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba: UFPR, 2006, p. 1-11.
- KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; CORSEUIL, C.W. **Recursos hídricos e saneamento**. 1. ed. Curitiba: Organic Trading, 2008, 160p.
- KULANDAISWAMY, V.C & SEETHARAMAN, S. A note on Barnes' method of hydrograph separation. **J. Hydrol.**, v.9, n.2, p. 222-229, 1969.

- LINSLEY, R.K. & ACKERMANN, W.C. Method of predicting the runoff from rainfall. **Trans. ASCE.**, v.107, n.1, p. 825-846, 1942.
- LINSLEY, R.K. & KOHLER, M.A. **Predicting the runoff from storm rainfall.** U.S. Weather Bureau, Research Paper 34, 1951, 10 p.
- LÓPEZ, Y.R.; LEÓN, N.M.; URRUTIA, L.G. Modelo lluvia-escurrimiento para La cuenca Del rio Reno Rainfall-runoff model for Reno's river basin. **Rev. Cien. Téc. Agropec.**, v.19, n.2, p. 31-37, 2010.
- LOUKAS, A. & QUICK, M.C. Physically-based estimation of lag time for forested mountainous watersheds. **Hydrol. Sci. J.**, v.41, n.1, p.1-19, 1996.
- LUINO, F.; CIRIO, C.G.; BIDDOCCU, M.; AGANGI, A.; GIULIETTO, W.; GODONE, F.; NIGRELLI, G. Application of a model to the evaluation of flood damage. **Geoinformatica**, v.13, n.3, p. 339-353, 2009.
- McCUEN, R.H.; WONG, S.L.; RAWLS, W.J. Estimating urban time of concentration. **J. Hydraul. Eng.**, v.110, n.7, p. 887-904, 1984.
- McDONNELL, J.J. Classics in Physical Geography Revisited: Hewlett JD, Hibbert AR. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. **Prog. in Phys. Geogr.**, v.33, n.2, p. 288-293, 2009.
- McGLYNN, B.L.; McDONNELL J.J.; BRAMMER, D. A review of the evolving perceptual model of hillslope flowpaths at the Maimai Catchments, NZ. **J. Hydrol.**, v.257, n.1, p 1-26, 2002.
- MORGALI, J.R. & LINSLEY, R.K. Computer analysis of overland flow. **J. Hydraul. Div.**, v.91, n.3, p. 81-100, 1965.
- MULVANY, T.J. On the use of self-registering rain and flood gauges, in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment. **Proc. Inst. Civ. Eng. (Irel.)**, v.4, pt.2, p. 18-33, 1850.
- NAPOLITANO, G.; SEE, L.; CALVO, B.; SAVI, F.; HEPPENSTALL, A. A conceptual and neural network model for real-time flood forecasting of the Tiber River in Rome. **Phys. Chem. Earth**, v.35, n.3-5, p. 187-194, 2010.
- OGUNKOYA, O.O.; JENKINS, A. Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. **J. Hydrol.**, v.142, n1-4, p. 71-88, 1993.
- O'KELLY, J.J. The employment of unit-hydrographs to determine the flows of Irish arterial drainage channels. **Proc. Inst. Civ. Eng. (Irel.)**, v.4, n.4, p. 365-412, 1955.

- OVERTON, D.E. & MEADOWS, M.E. **Stormwater Modeling**. New York: Academic Press, 1976. 358 p.
- PAIVA, J.B.D. & PAIVA, E.M.C.D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: Editora ABRH, 2001. 628 p.
- PASINI, F. **Relazione sul progetto della bonifica renana**, Bologna, Italy, 1914.
- PONCE, V.M. **Engineering hydrology, principles and practices**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989. 640 p.
- PRETI, F.; FORZIERI, G.; CHIRICO, G. B. Forest cover influence on regional flood frequency assessment in Mediterranean catchments. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v.15, n.10, p. 3077-3090, 2011.
- RADICE, A.; GIORGETTI, E.; BRAMBILLA, D.; LONGONI, L.; PAPINI, M. On Integrated Sediment Transport Modelling for Flash Events in Mountain Environments. **Acta Geophys.**, v.60, n.1, p. 191-213, 2012.
- RAGAN, R.M. An experimental investigation of partial area contributions, Int. Ass. Sci. Hydrol. **In: Proc. Berne Symposium**, 1967. p. 241-251.
- RAMSER, C.E. Runoff from small agricultural areas. **J. Agric. Res.**, v.34, n.9, 1927
- ROBSON, A. & NEAL, C. Hydrograph separation using chemical techniques: an application to catchments in Mid-Wales. **J. Hydrol.**, v.116, n.1-4, p. 345-363, 1990.
- ROCHA, J.S.M. & KURTZ, S.M.J.M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. 4. ed. Santa Maria: Edições UFSM CCR/UFSM, 2001. 302 p.
- ROSSI, F. Criteri di similitudine idrologica per la stima della portata al colmo di piena corrispondente ad un assegnato periodo di ritorno (em italiano), **In Anais do XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche**, v.2, Univ. de Napoles, Napoles, Itália, 1974, p. 235–261.
- ROTHACHER, J. Increases in water yield following clear-cut logging in the Pacific Northwest. **Water Resour. Res.**, v.6, n.2, p. 653-658, 1970.
- SABOL, G. Discussão de “Fractal Concept Used in Time-of-Concentration Estimates” por Gert Aron, James E. Ball, and Thomas A. Smith (1991, v.117, n.5).” **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.118, n.6, p. 1004-1006, 1992.
- SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. **Atlas de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173 p.

- SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. Florianópolis: UFSC/CFH/GCN, 2009. 167f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria aplicada**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento: Curitiba, 2001. 372p.
- SCARIOT, E.C. **Caracterização ambiental de uma fazenda produtora de madeira em Rio Negrinho, SC: subsídios para a restauração ambiental**. Florianópolis: UFSC/CCA, 2008. 102f. Dissertação (Mestrado em ciências) - Programa De Pós-Graduação Em Recursos Genéticos Vegetais, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SCS-USDA. **Urban hydrology for small watersheds**. TR-55. 1986. 164 p.
- SICK, H. **Ornitologia brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997. 912 p.
- SILVA, R.V.; GRISON, F.; KOBAYAMA, M. Conceptual investigation of time of concentration: Case study of the Pequeno River watershed, São José dos Pinhais, PR, Brazil. **In:** TANIGUCHI, M.; BURNETT, W.C.; FUKUSHIMA, Y. HAIGH, M.; UMEZAWA, Y. (eds.) *From headwaters to the ocean: hydrological changes and watershed management*, London: Taylor & Francis Group, 2009. p. 271-275.
- SILVEIRA, A.L.L. Desempenho de formulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Rev. Bras. Recur. Híd.**, v.10, n.1, p.5-23, 2005.
- SIMAS, M.J. & HAWKINS, R.H. Lag time characteristics for small watersheds in the U.S. p. 1-7, 1996.
- SINGH, V.P. Derivation of time of concentration. **J. Hydrol.**, v.30, n.1-2, p. 147-165, 1976.
- SINGH, V.P. **Elementary Hydrology**. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1991. 973 p.
- SKLASH, M.G. Environmental isotope studies of storm and snowmelt runoff generation. In: M.G. Anderson and T.P. Burt, (eds), **Process studies in hillslope hydrology**. Chichester: Wiley, 1990, p. 401-435.
- SKLASH, M.G. & FARVOLDEN, R.N., The role of groundwater in storm runoff. In: W. Back & D.A. Stephenson (Guest-Editors), *Contemporary Hydrogeology – The George Burke Maxey Memorial Volume*. **J. Hydrol.**, v.43, p 45-65, 1979.

- TOEBES, C. & OURYVAEV, V. **Representative and experimental basins, an international guide for research and practice**. Paris: UNESCO, 1970. 348 p.
- TRES, D.R. **Abordagem sistêmica para restauração da paisagem**. Florianópolis: UFSC/CCA, 2010. 297f. Tese (Doutorado em ciências) - Programa De Pós-Graduação Em Recursos Genéticos Vegetais, Universidade Federal de Santa Catarina.
- TRIMBLE. **5700 GPS Receiver: User Guide**. Sunnyvale, CA. 2001. 168 p.
- TSUKAMOTO, Y. Storm discharge from an experimental watershed. **J. Jap. Soc. Forestry**, v.45, p.186-190, 1963.
- USDA. NRCS, **National Engineering Handbook**. Part 630 Hydrology. Cap. 15: Time of Concentration, Washington, DC. 2010. 29 p.
- WHITEHEAD, P.G. & ROBINSON, M. Experimental basin studies - an international and historical perspective of forest impacts. **J. Hydrol.**, v.145, n.3-4, p. 217-230, 1993.
- WONG, T. Assessment of Time of Concentration Formulas for Overland Flow. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.131, n.4, p. 383-387, 2005.
- WOOLHISER, D.A. & LIGGETT, J.A. Unsteady, One-Dimensional Flow over a Plane the Rising Hydrograph. **Water Resour. Res.**, v.3, n.3, p. 753-771, 1967.
- ZEKTSER, I.S. Role of artesian water in feeding large rivers exemplified by the middle and lower reaches of the Neman River. **Sov. Hydrol.**, v.1, p. 94. 1963.

# APÊNDICE A – Fórmula de Kirpich (1940) para o cálculo de tempo de concentração

O trabalho de apenas uma página publicado por Kirpich em 1940 na revista Civil Engineering é apresentado abaixo.

## ENGINEERS' NOTEBOOK

*Ingenious Suggestions and Practical Data Useful in the Solution of a Variety of Engineering Problems*

### Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds

By Z. P. KIRPICH, JUN. AM. SOC. C.E.

ASSISTANT HYDRAULIC ENGINEER, U.S. ENGINEER OFFICE, BALTIMORE DISTRICT, BALTIMORE, MD.

THE "time of concentration" of a watershed is the time required for a particle of water from the most remote part of the watershed to reach the outlet. Attempts have been made to correlate time of concentration

Thus  $K_1 = L / \sqrt{S_1}$  and  $K_2 = L / \sqrt{S_2}$ . For a given watershed the slope should be measured in both ways and the concentration time read from each curve. An average value may then be used, although it will generally be found that the two values are rather close.

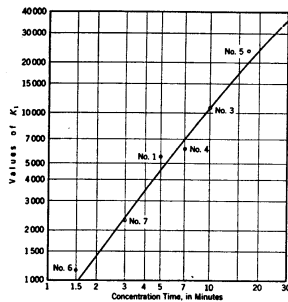


FIG. 1. CONCENTRATION TIME OF SMALL AGRICULTURAL WATERSHEDS, BASED ON  $K_1$  AS DEFINED IN TEXT

and watershed area; however, two factors probably of greater importance are (1) length of travel, and (2) slope. Slope can be evaluated in two ways: (1) If  $H_1$  is the difference in elevation in feet between the most remote point and the outlet, and  $L$  is the length of travel in feet, then the slope  $S_1$  is  $H_1/L$ . (2) If  $H_2$  is the average height of the watershed above the outlet in feet, and  $A$  is the area of the watershed in square miles, then  $S_2 = H_2/A$  (in feet per square miles). A topographic map of the watershed is necessary in order to determine  $H_2$ .

In the two curves shown (Figs. 1 and 2) it is assumed that the time of concentration for any watershed depends on a factor,  $K_1$ , which varies directly with the length of travel and inversely with the square root of the slope.

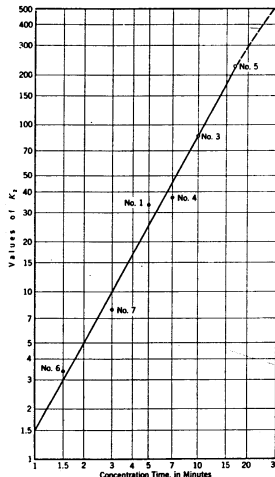


FIG. 2. CONCENTRATION TIME OF SMALL AGRICULTURAL WATERSHEDS, BASED ON  $K_2$  AS DEFINED IN TEXT

The points on the curves are numbered to correspond to the watersheds upon which the studies were made, data for which are given in the table. Data in Cols. 1 to 6 are from the publication cited; data in the remaining columns were determined by the writer from a topographic map in the same publication. Despite the apparent differences in slope and percentage of timber, the curves show that a consistent relation does appear to exist between concentration time and the factors  $K_1$  and  $K_2$ ; hence it is believed that the curves are applicable to the average small agricultural area ranging in size from 1 to 200 acres.

TABLE I. CONCENTRATION DATA FROM SEVEN SMALL WATERSHEDS

| (1)           | (2)                              | (3)           | (4)                  | (5)  | (6)     | (7)                                      | (8)   | (9)                  | (10)                 |
|---------------|----------------------------------|---------------|----------------------|--|---------|--|---|----------------------|----------------------|
| WATERSHED NO. | TIME OF CONCENTRATION IN MINUTES | AREA IN ACRES | PERCENTAGE IN TIMBER | DISTANCE FROM FARTHEST POINT TO GAGING STATION |         | AVERAGE HEIGHT OF WATERSHED ABOVE OUTLET | AVERAGE SLOPE OF WATERSHED $S_1 = H_1/L$ Ft per Sq Mile | $K_1 = L/\sqrt{S_1}$ | $K_2 = L/\sqrt{S_2}$ |
|               |                                  |               |                      | IN FEET  | IN FEET |  |   |                      |                      |
| 1             | 5                                | 20.7          | 14.0                 | 1,220  | 0.0489  | 43                                       | 1,330   | 5,520                | 33.5                 |
| 2             | 10                               | 49.2          | 24.7                 | 2,152  | 0.0399  | 48                                       | 927   | 10,900               | 86                   |
| 4             | 7                                | 15.7          | 28.9                 | 1,418  | 0.0544  | 36                                       | 1,468   | 6,080                | 37                   |
| 5             | 17                               | 112.0         | 23.9                 | 3,933  | 0.0274  | 54                                       | 308   | 23,900               | 225                  |
| 6             | 1 1/4                            | 1.25          | 0.0                  | 359  | 0.0976  | 17.6                                     | 11,300  | 1,150                | 3.4                  |
| 7             | 3                                | 2.79          | 55.5                 | 672  | 0.0853  | 32                                       | 7,340   | 2,300                | 7.9                  |

Neste artigo é possível perceber que Kirpich não publicou sua tão conhecida fórmula de maneira explícita. Mas sim, o autor apresentou apenas os dados e figuras que mostram o bom ajuste de  $t_c$  com dois parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ , indicando ainda que poderiam ser desenvolvidas 2 fórmulas com parâmetros de entrada um pouco distintos.

A fórmula de Kirpich amplamente utilizada na comunidade técnica e científica (Equação A1) se aproxima muito do resultado do melhor ajuste entre  $t_c$  e  $K_1$ . Apesar de o ajuste com  $K_2$  também resultar em  $R^2$  alto, essa fórmula não se difundiu (Figura A1(c) e (d)).

$$t_c = 0,0078 \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,77} \quad (A1)$$

onde  $t_c$  é em min,  $L$  é em pé e  $S$  é em pé/pé.

Adaptando a Equação A1 para o SI, obtém-se a Equação A2:

$$t_c = 0,0663 \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,77} \quad (A2)$$

onde  $t_c$  é em min,  $L$  é em km e  $S$  é em km/km.

Entretanto, na análise dos dados originais é possível obter equações de ajuste diferentes das conhecidas. Os dados foram organizados na Tabela A1, pode-se tanto utilizar  $K_1$  e  $K_2$  fornecidos, como também é possível calcular esses valores com maior exatidão e obter  $K_{1cal}$  e  $K_{2cal}$ . Ambos foram calculados segundo o trabalho de Kirpich (1940): o primeiro utilizando as colunas 5 e 6 da Tabela A1; e o segundo, primeiramente foi calculado  $S_{2cal}$  (coluna 12) com base nas colunas 7 e 11 da mesma tabela, e em seguida utilizando as colunas 5 e 12.

Assim, são obtidos os 4 gráficos apresentados na Figura A1. Pode-se notar que existe uma pequena diferença nas equações geradas a partir dos valores fornecidos de  $K_1$  e  $K_2$ , e aquelas ajustadas com  $K_{1cal}$  e  $K_{2cal}$ . Porém, considera-se que os melhores ajustes possíveis para os dados primários são apresentados nas Figuras A1 (b) e (d).



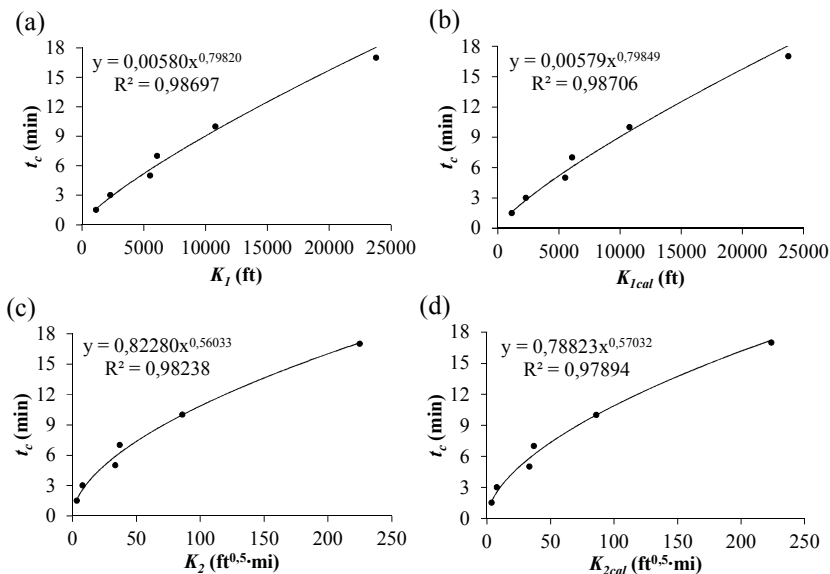


Figura A1 – Fórmulas ajustadas com os dados de Kirpich (1940). (a) Condição de  $K_j$ ; (b) Condição de  $K_{1cal}$ ; (c) Condição de  $K_2$ ; e (d) Condição de  $K_{2cal}$ .

Apesar de a equação da Figura A1 (b) (Equação A3) se assemelhar muito a Equação A1, não é exatamente igual.

$$t_c = 0,0058 \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,80} \quad (\text{A3})$$

onde  $t_c$  é em min,  $L$  é em pé e  $S$  é em pé/pé.

Adaptando a Equação A3 para o SI, obtém-se a Equação A4:

$$t_c = 3,7180 \cdot \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,80} \quad (\text{A4})$$

onde  $t_c$  é em min,  $L$  é em km e  $S$  é em km/km.

Portanto, esta breve avaliação do trabalho de Kirpich (1940) demonstra a importância de uma leitura mais detalhada dos trabalhos antigos quando se tratam de fórmulas.

Tabela A1 – Nas colunas de 2 a 10 são dados das bacias utilizados por Kirpich (1940), e nas demais são cálculos realizados com base nos dados primários.

| (1)   | (2)            | (3)            | (4)           | (5)         | (6)                             | (7)           | (8)                             | (9)           | (10)                             | (11)                      | (12)                                 | (13)               | (14)                                  |
|-------|----------------|----------------|---------------|-------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Bacia | $t_c$<br>(min) | $A$<br>(acres) | % de floresta | $L$<br>(ft) | $S_1$<br>(ft·ft <sup>-1</sup> ) | $H_2$<br>(ft) | $S_2$<br>(ft·mi <sup>-2</sup> ) | $K_1$<br>(ft) | $K_2$<br>(ft <sup>0,5</sup> ·mi) | $A$<br>(mi <sup>2</sup> ) | $S_{2cal}$<br>(ft·mi <sup>-2</sup> ) | $K_{1cal}$<br>(ft) | $K_{2cal}$<br>(ft <sup>0,5</sup> ·mi) |
| 1     | 5,0            | 20,70          | 14,0          | 1220        | 0,0489                          | 43,0          | 1330                            | 5520          | 33,5                             | 0,0324                    | 1329                                 | 5517               | 33,5                                  |
| 3     | 10,0           | 49,20          | 24,7          | 2152        | 0,0399                          | 48,0          | 627                             | 10800         | 86,0                             | 0,0769                    | 624                                  | 10773              | 86,1                                  |
| 4     | 7,0            | 15,70          | 38,9          | 1418        | 0,0544                          | 36,0          | 1468                            | 6080          | 37,0                             | 0,0245                    | 1467                                 | 6080               | 37,0                                  |
| 5     | 17,0           | 112,00         | 23,9          | 3933        | 0,0274                          | 54,0          | 308                             | 23800         | 225,0                            | 0,1751                    | 308                                  | 23760              | 223,9                                 |
| 6     | 1,5            | 1,25           | 0,0           | 359         | 0,0978                          | 17,6          | 11300                           | 1150          | 3,4                              | 0,0020                    | 9007                                 | 1148               | 3,8                                   |
| 7     | 3,0            | 2,79           | 55,5          | 672         | 0,0853                          | 32,0          | 7340                            | 2300          | 7,9                              | 0,0044                    | 7337                                 | 2301               | 7,8                                   |

Tabela A2 – Nas colunas de 2 a 7 são os dados primários da Tabela A1 convertidos para as unidades do SI. As colunas 8 e 9 foram calculados utilizando as colunas de 2 a 5 desta tabela.

| (1)   | (2)                       | (3)         | (4)           | (5)                             | (6)           | (7)                              | (8)             | (9)                                |
|-------|---------------------------|-------------|---------------|---------------------------------|---------------|----------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Bacia | $A$<br>(km <sup>2</sup> ) | $L$<br>(km) | $H_2$<br>(km) | $S_2$<br>(km·km <sup>-2</sup> ) | $K_1$<br>(km) | $K_2$<br>(km <sup>0,5</sup> ·km) | $K_1^*$<br>(km) | $K_2^*$<br>(km <sup>0,5</sup> ·km) |
| 1     | 0,0838                    | 0,37        | 0,0131        | 0,16                            | 1,68          | 0,94                             | 1,68            | 0,94                               |
| 3     | 0,1991                    | 0,66        | 0,0146        | 0,07                            | 3,29          | 2,42                             | 3,28            | 2,42                               |
| 4     | 0,0635                    | 0,43        | 0,0110        | 0,17                            | 1,85          | 1,04                             | 1,85            | 1,04                               |
| 5     | 0,4533                    | 1,20        | 0,0165        | 0,04                            | 7,25          | 6,32                             | 7,24            | 6,29                               |
| 6     | 0,0051                    | 0,11        | 0,0054        | 1,06                            | 0,35          | 0,10                             | 0,35            | 0,11                               |
| 7     | 0,0113                    | 0,20        | 0,0098        | 0,86                            | 0,70          | 0,22                             | 0,70            | 0,22                               |

## **APÊNDICE B – Eventos hidrológicos utilizados na análise**

Neste apêndice são apresentados os eventos de chuva-vazão utilizados na análise hidrológica do tempo de concentração neste trabalho. Além disso, são apresentados os hidrogramas em escala logarítmica para identificação do ponto de inflexão, e quando existe, de dois pontos de inflexão: um referente ao início do escoamento subsuperficial (I-subp), e outro ao início do escoamento subterrâneo (I-subt) (Figuras de B1 a B30).

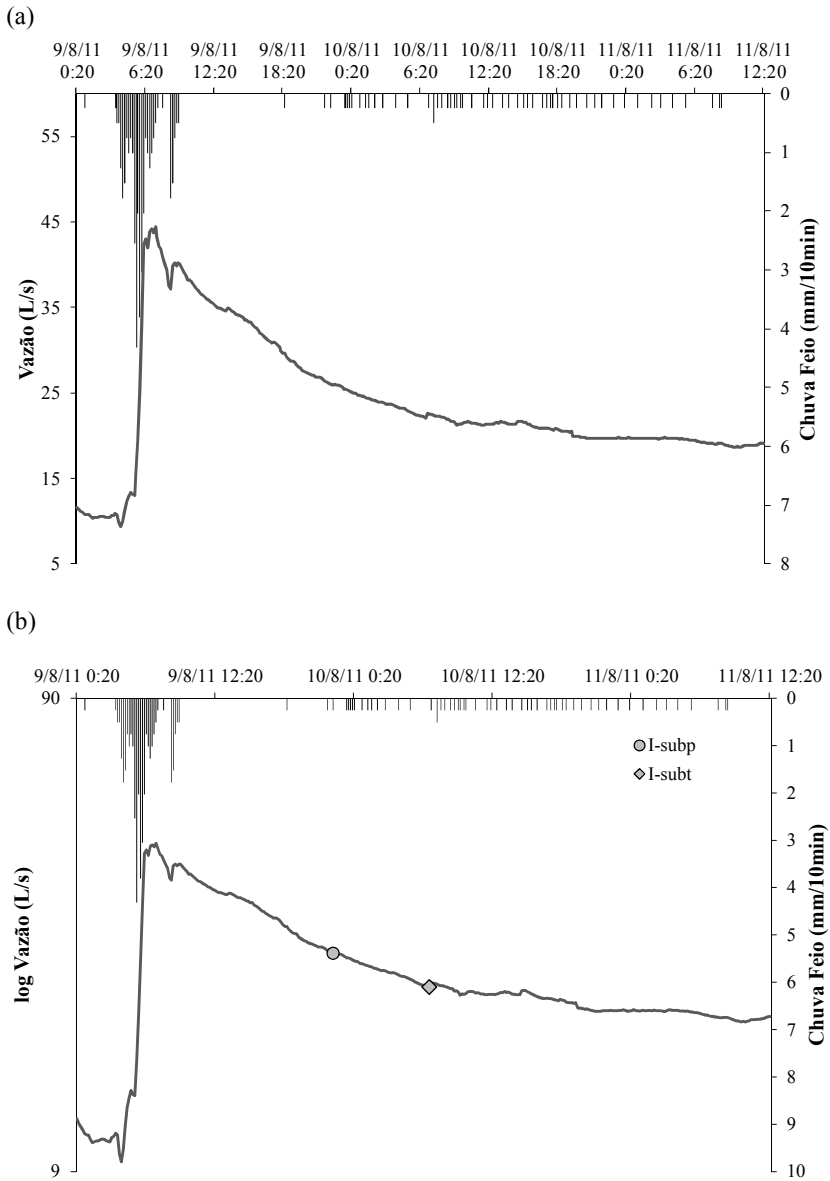


Figura B1 – Eventos hidrológicos n. 01. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

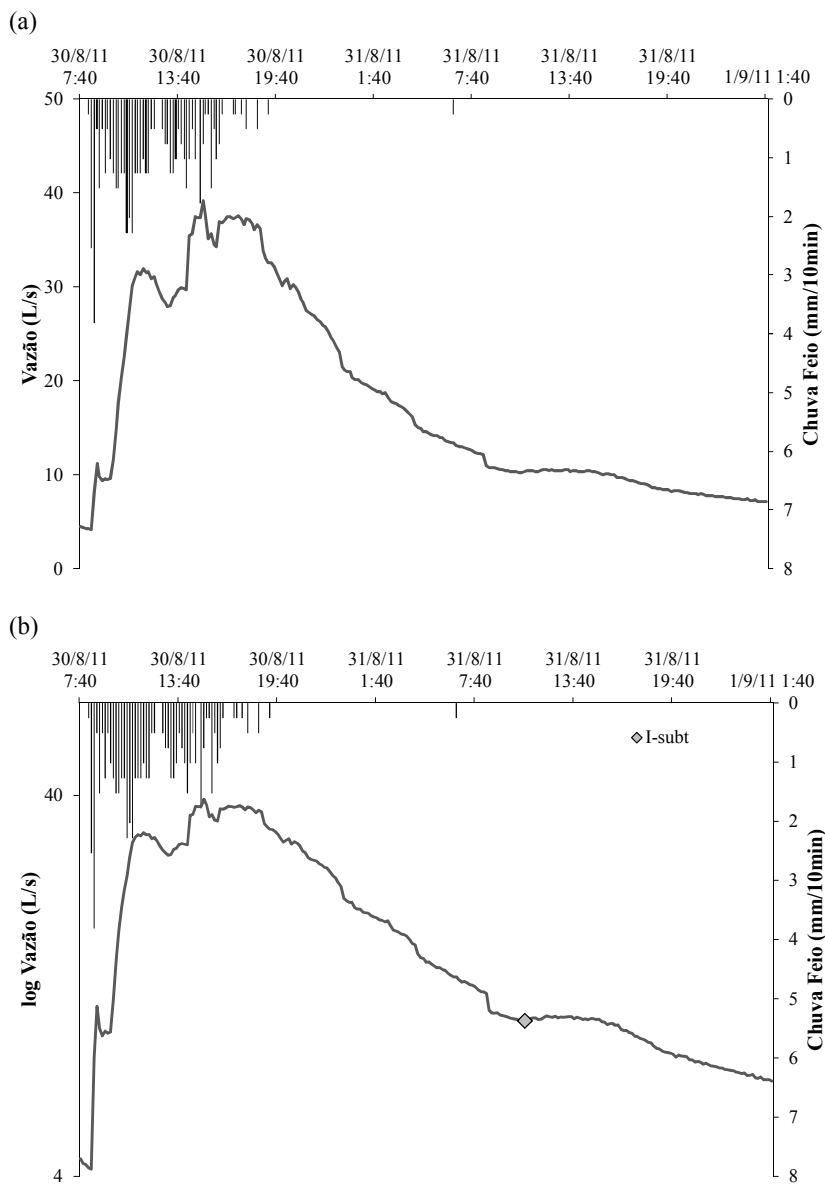
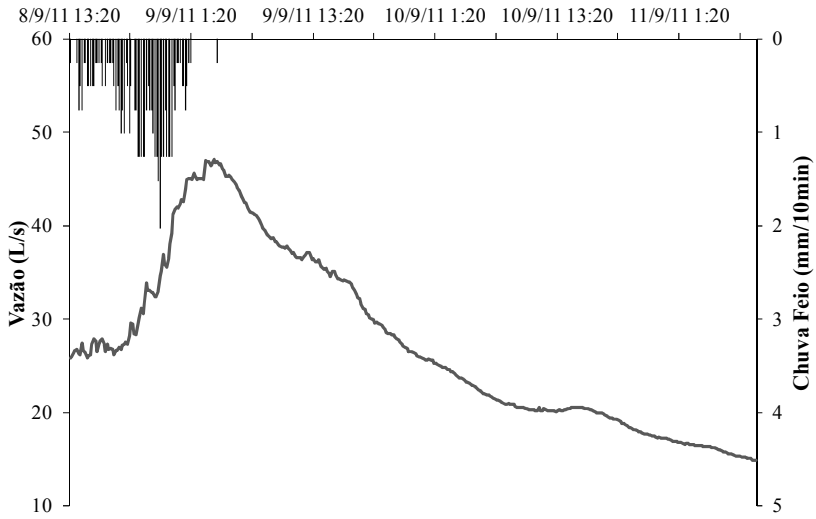


Figura B2 – Eventos hidrológicos n. 02. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

(a)



(b)

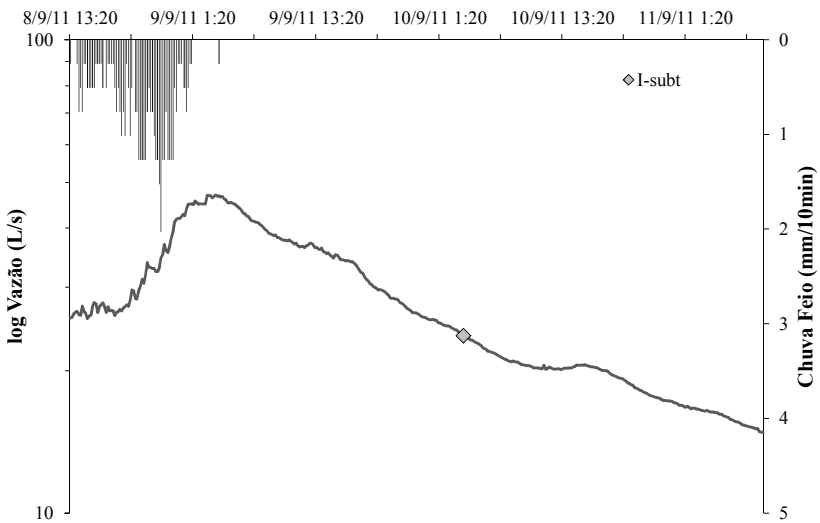
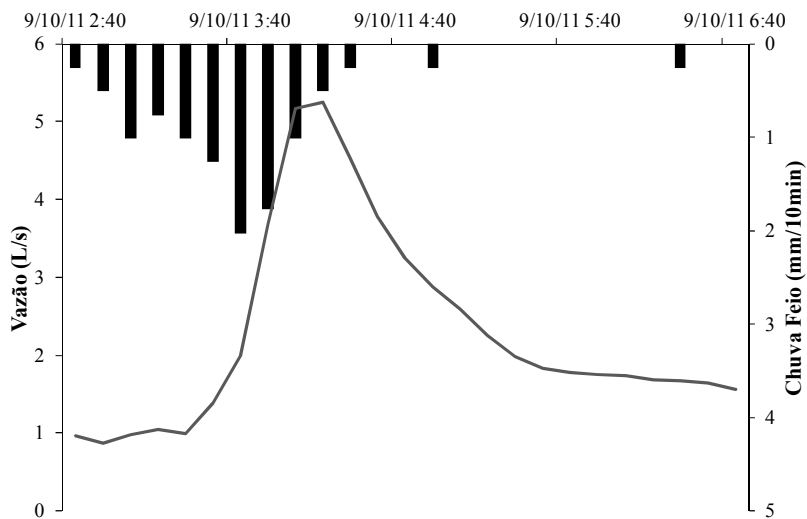


Figura B3 – Eventos hidrológicos n. 03. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

(a)



(b)

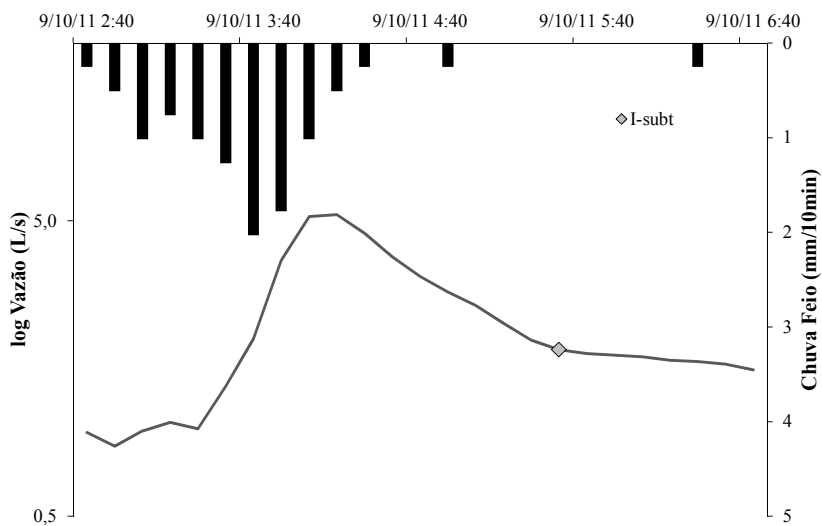


Figura B4 – Eventos hidrológicos n. 04. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

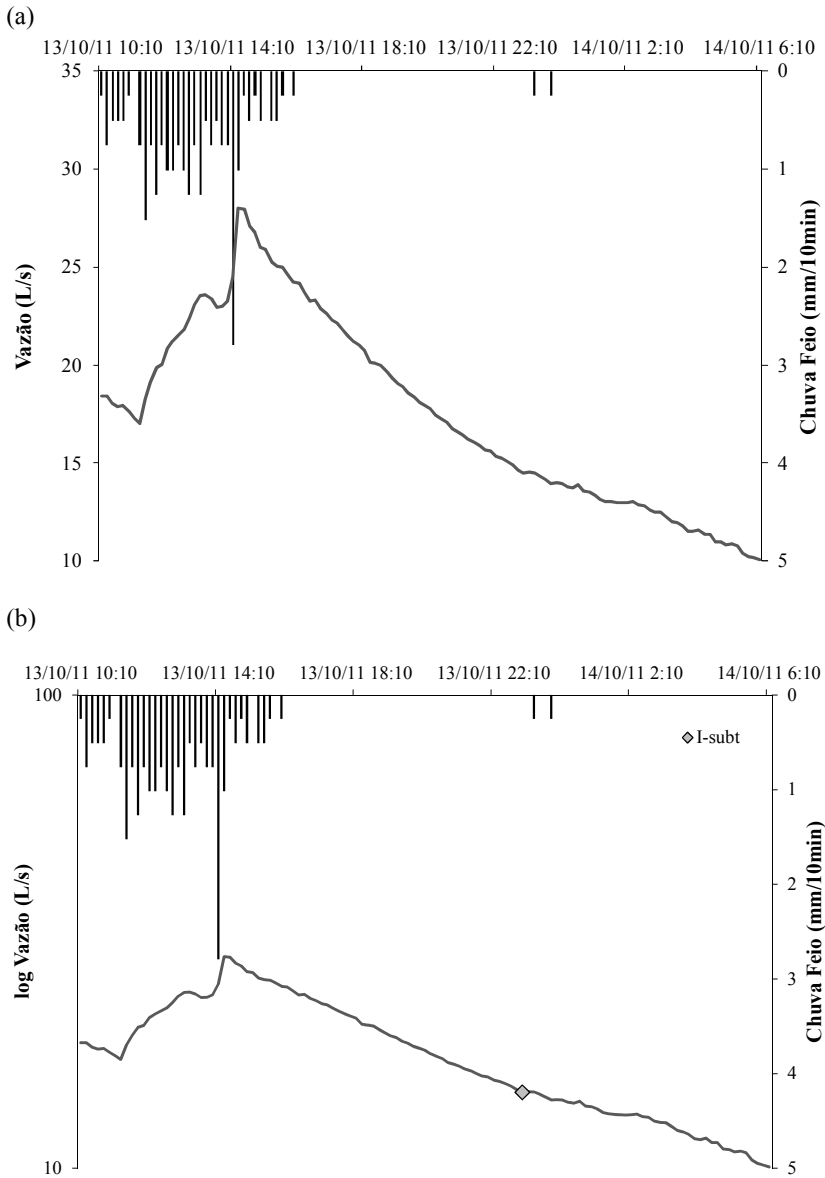
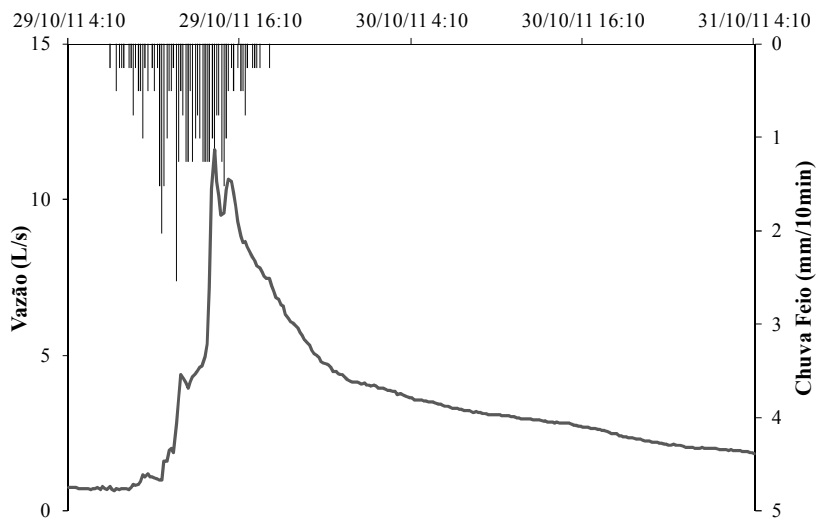


Figura B5 – Eventos hidrológicos n. 05. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.



(a)



(b)

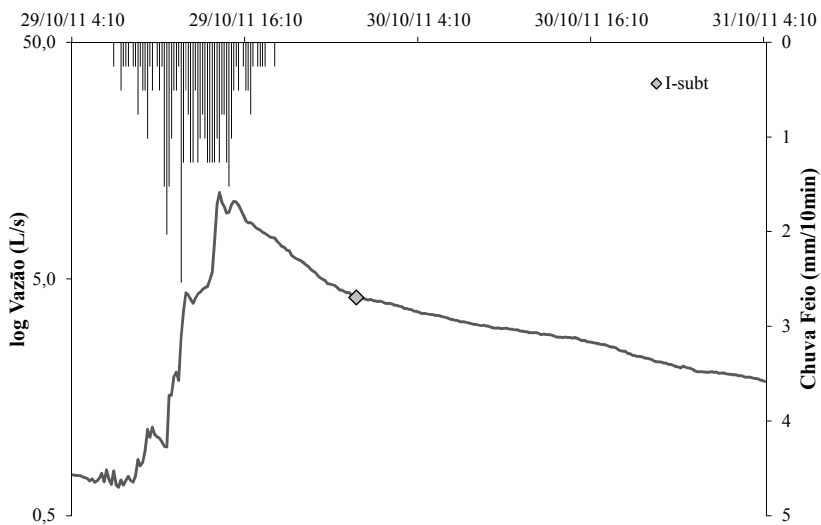


Figura B6 – Eventos hidrológicos n. 06. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

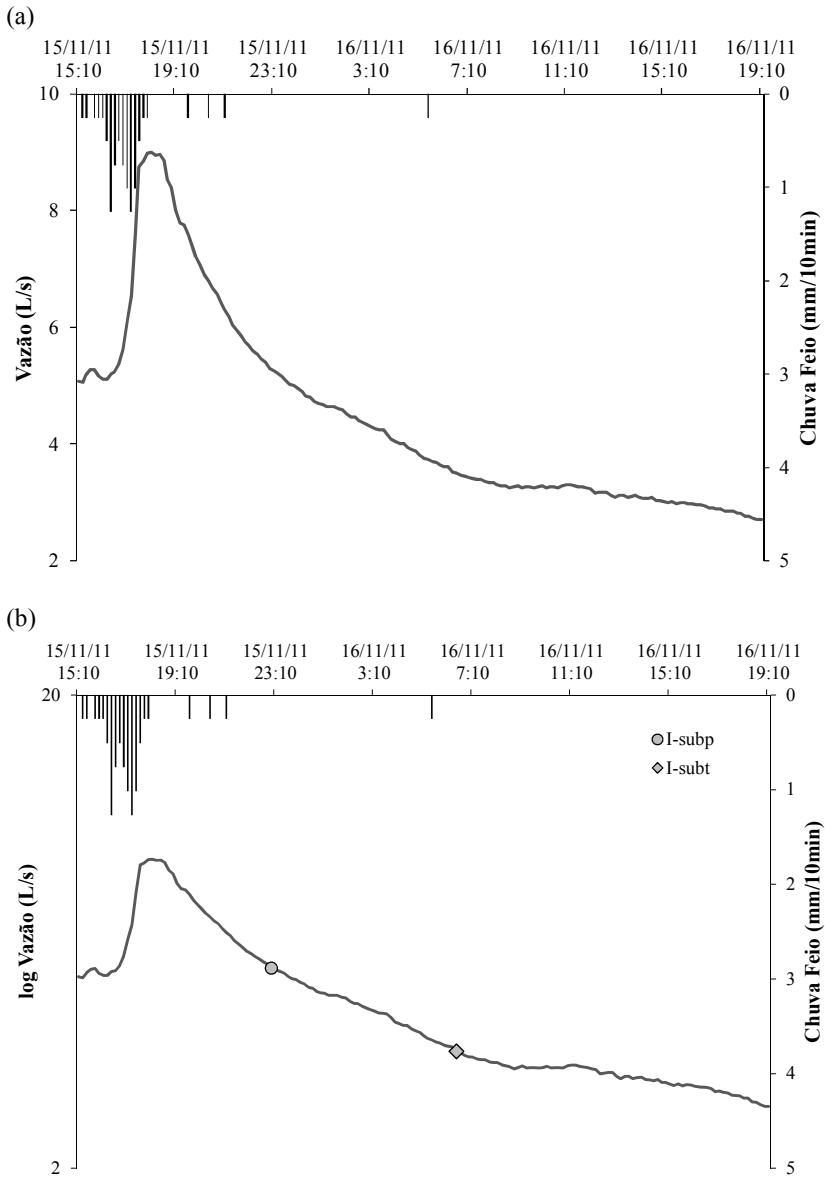


Figura B7 – Eventos hidrológicos n. 07. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

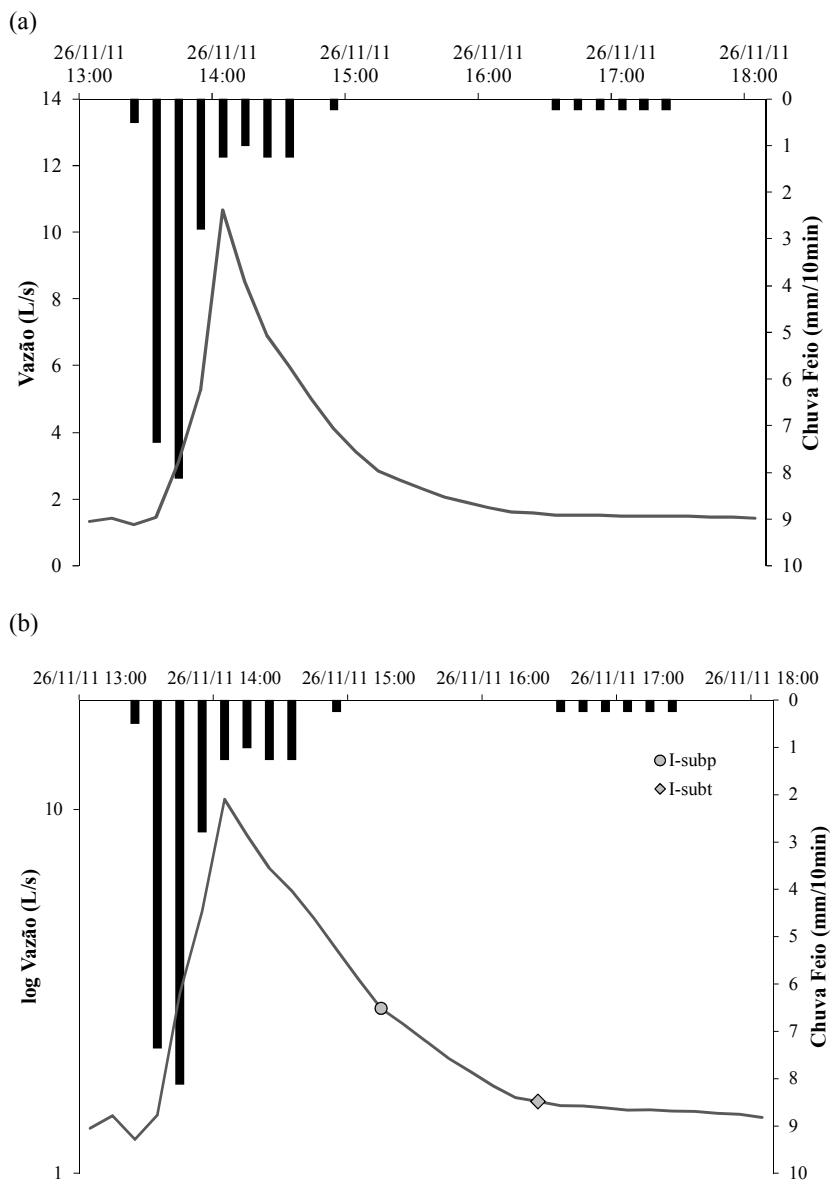


Figura B8 – Eventos hidrológicos n. 08. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

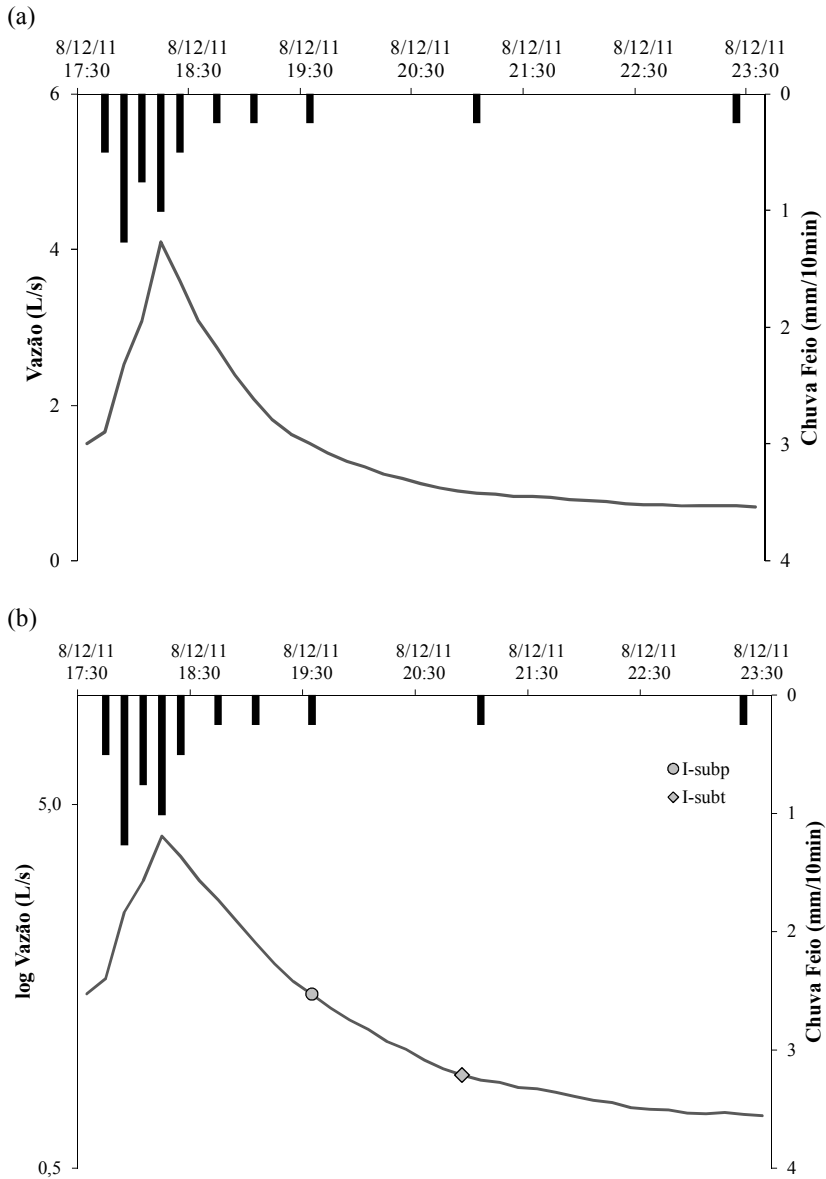
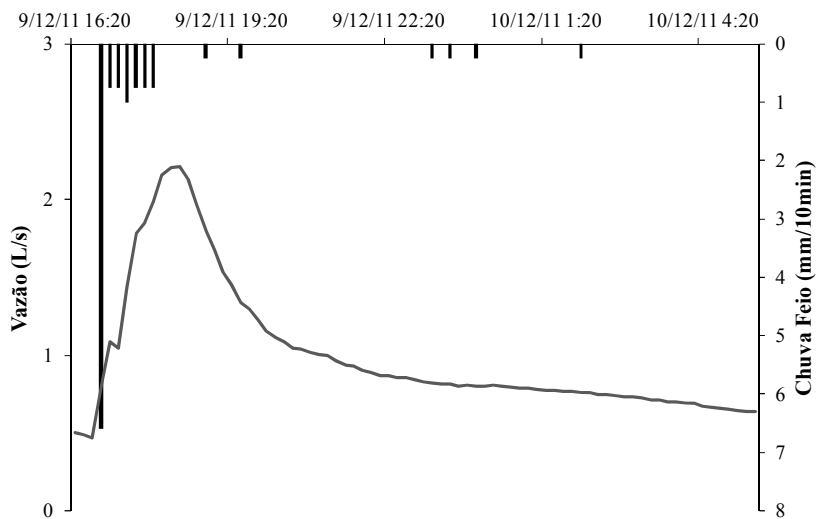


Figura B9 – Eventos hidrológicos n. 09. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

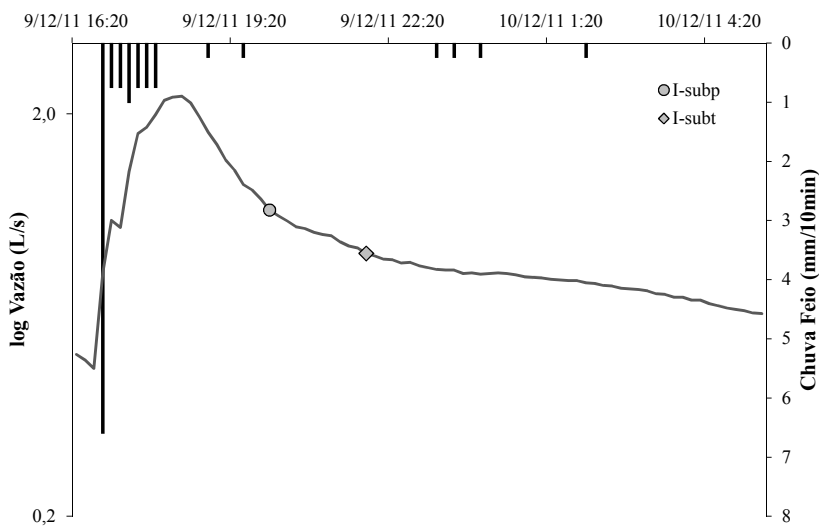
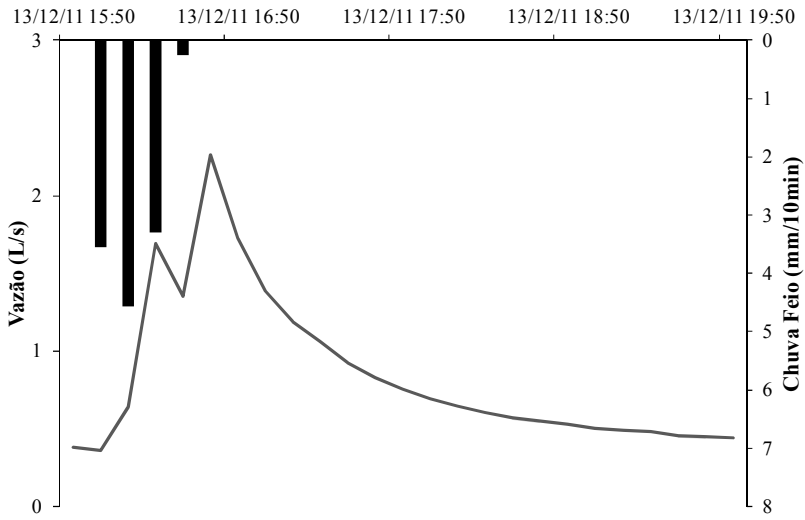


Figura B10 – Eventos hidrológicos n. 010. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

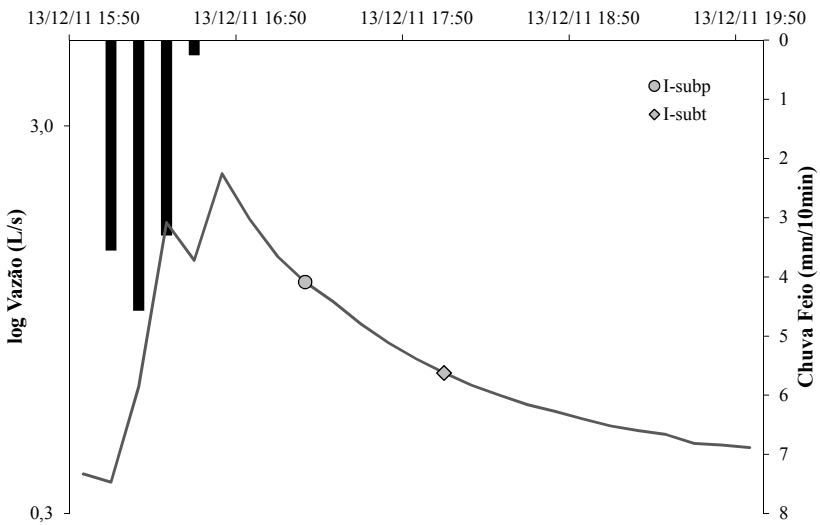


Figura B11 – Eventos hidrológicos n. 11. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

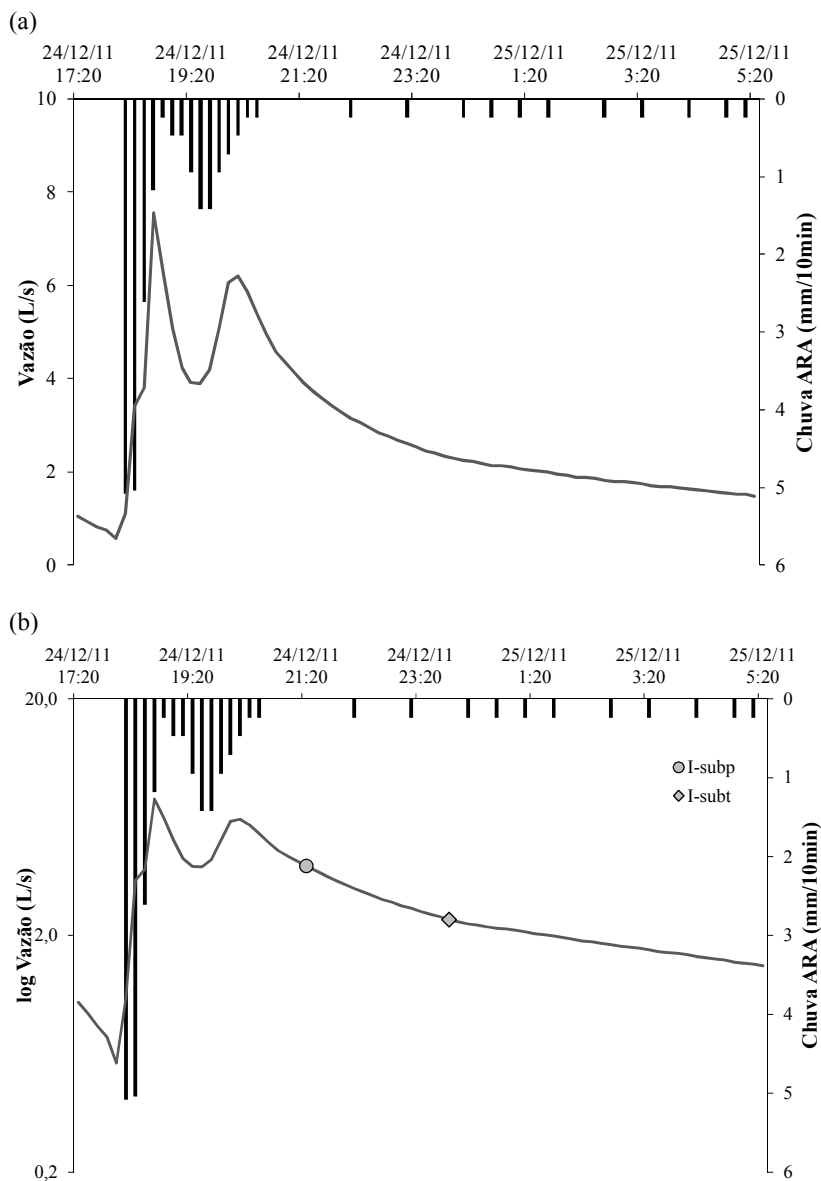
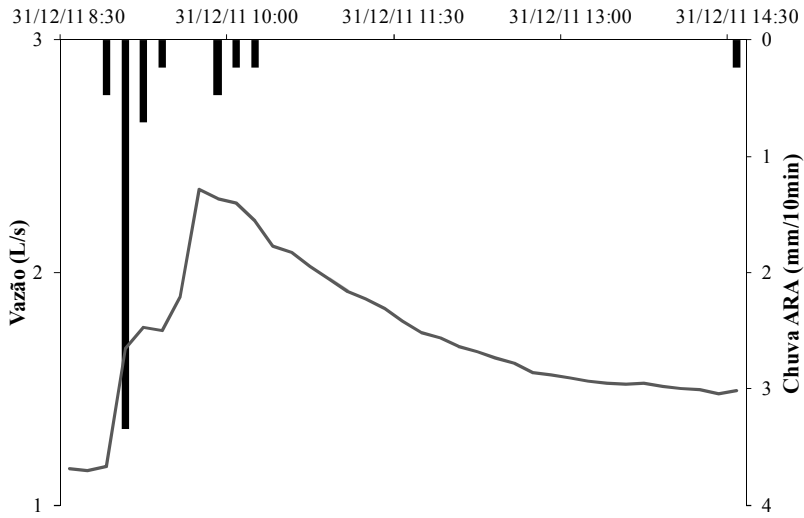


Figura B12 – Eventos hidrológicos n. 12. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

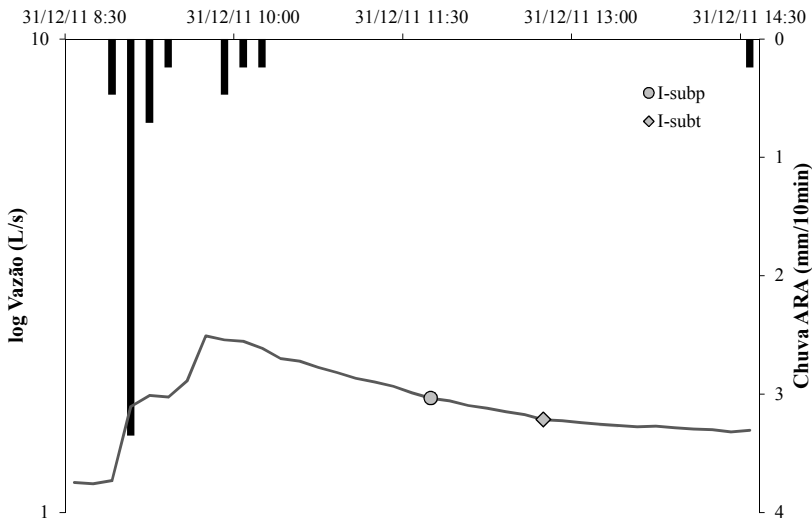


Figura B13 – Eventos hidrológicos n. 13. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.



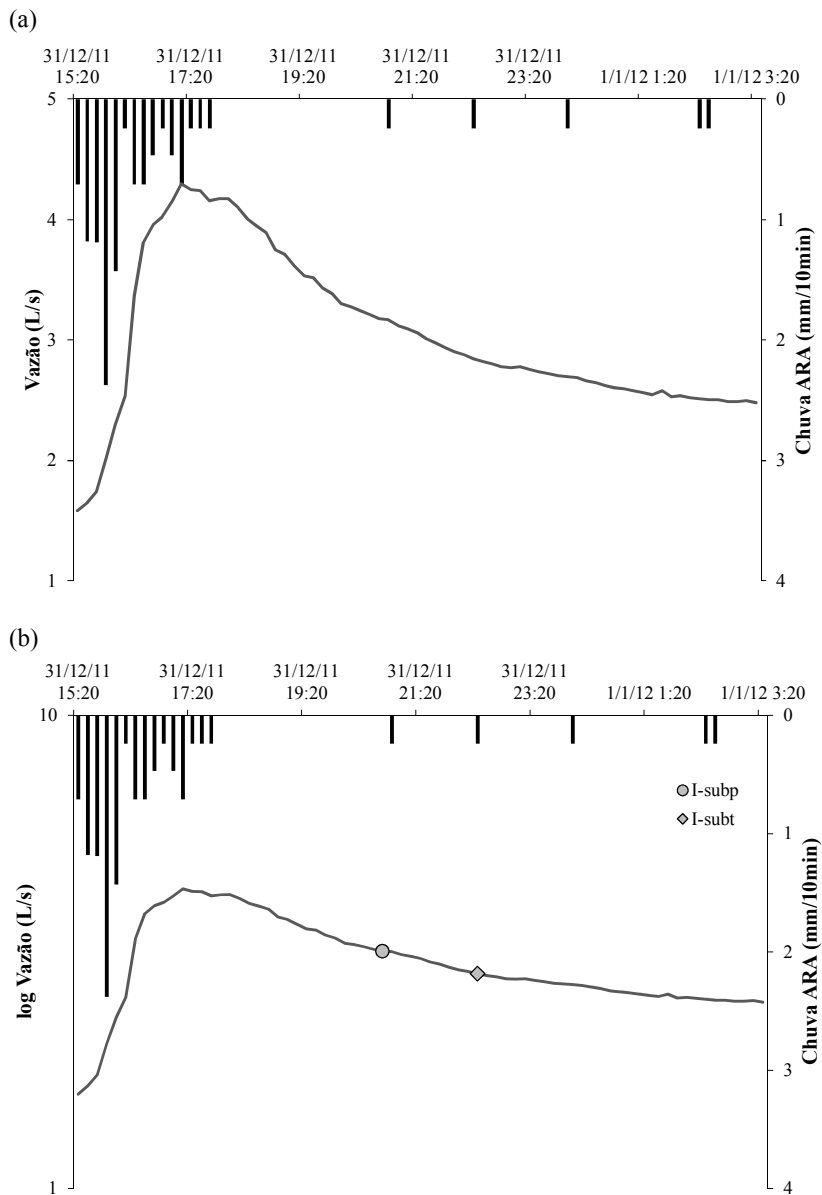


Figura B14 – Eventos hidrológicos n. 14. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

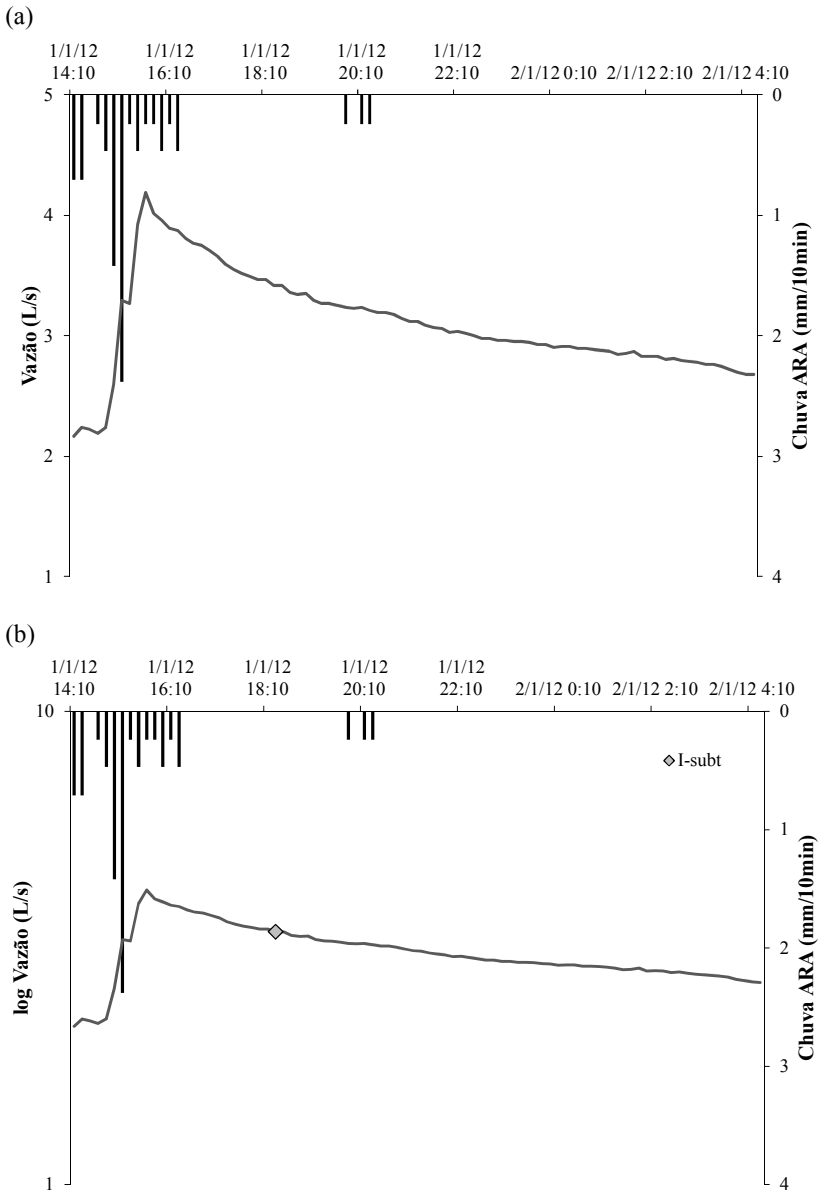
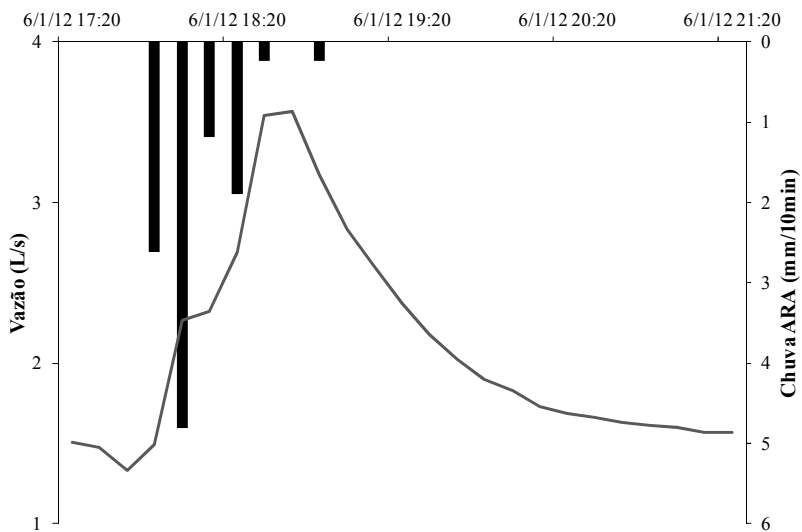


Figura B15 – Eventos hidrológicos n. 15. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

(a)



(b)

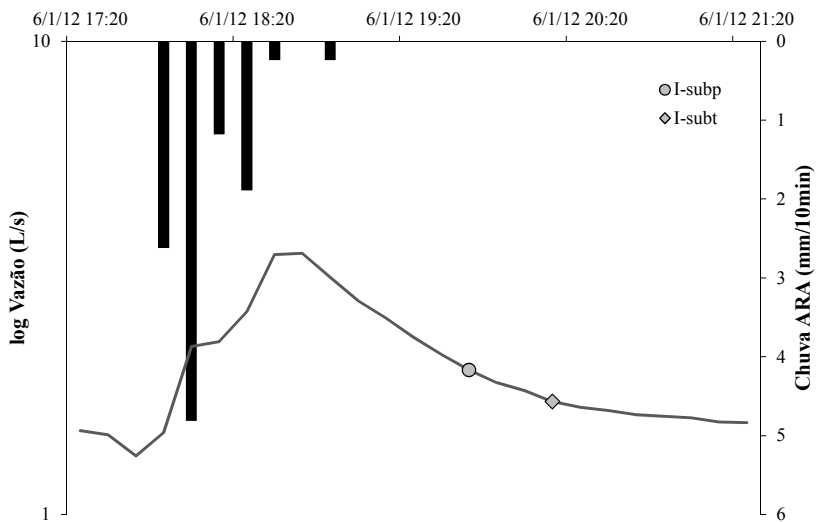
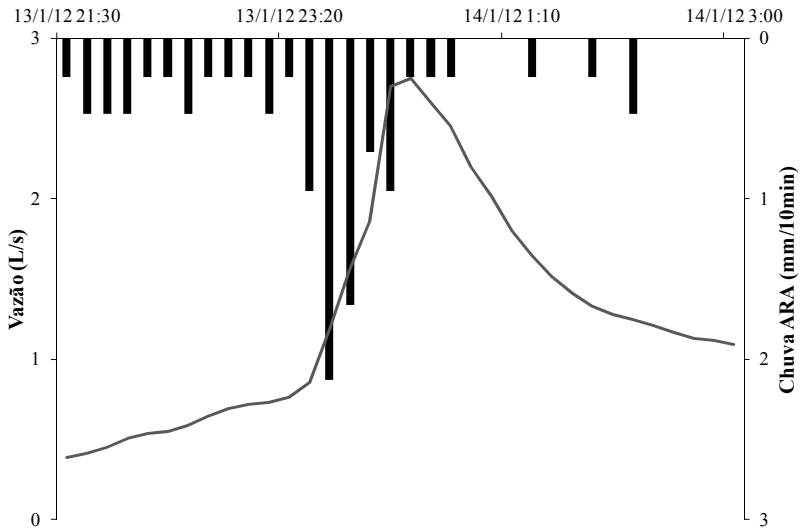


Figura B16 – Eventos hidrológicos n. 16. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

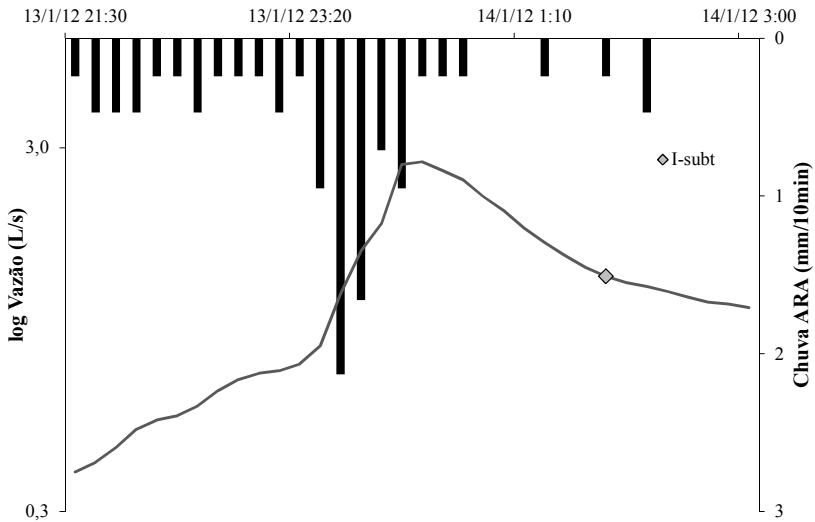
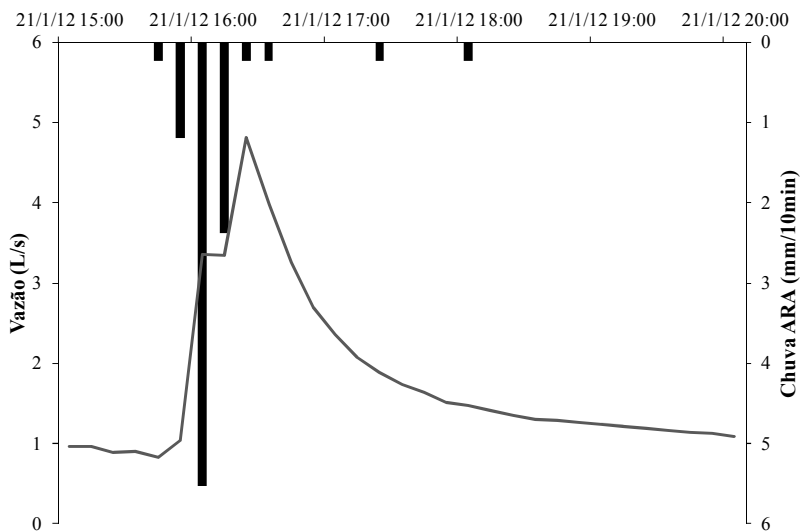


Figura B17 – Eventos hidrológicos n. 17. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

(a)



(b)

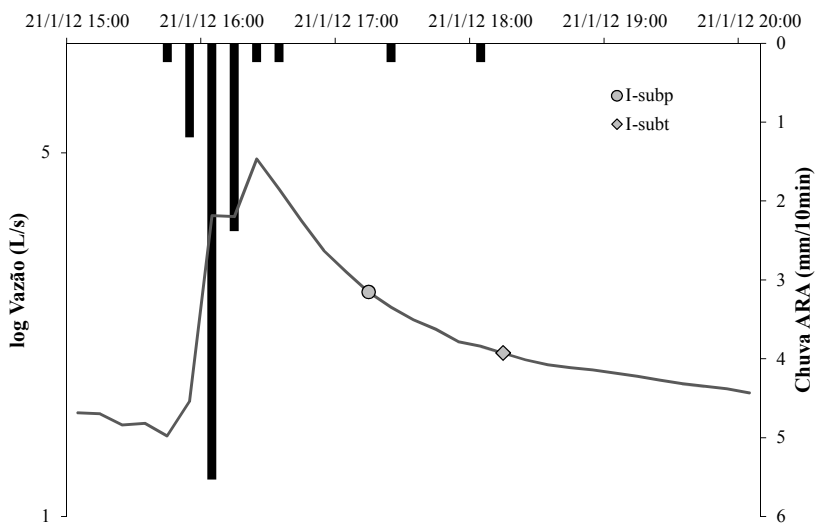
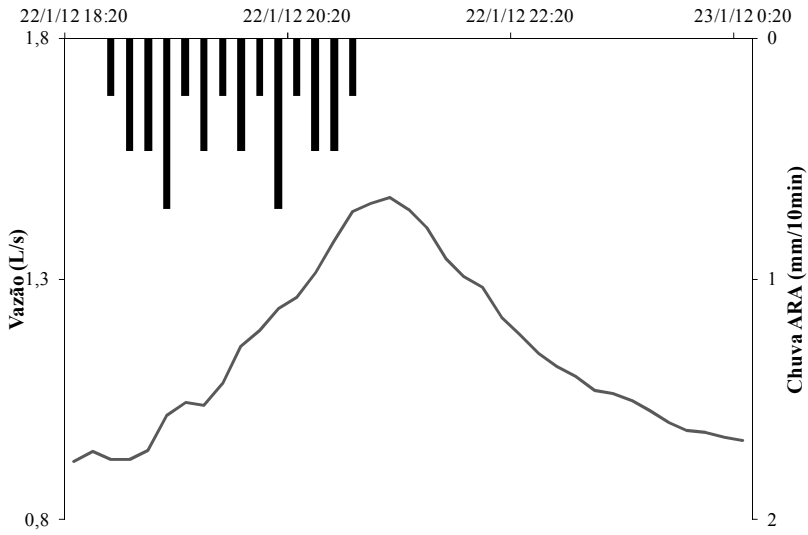


Figura B18 – Eventos hidrológicos n. 18. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

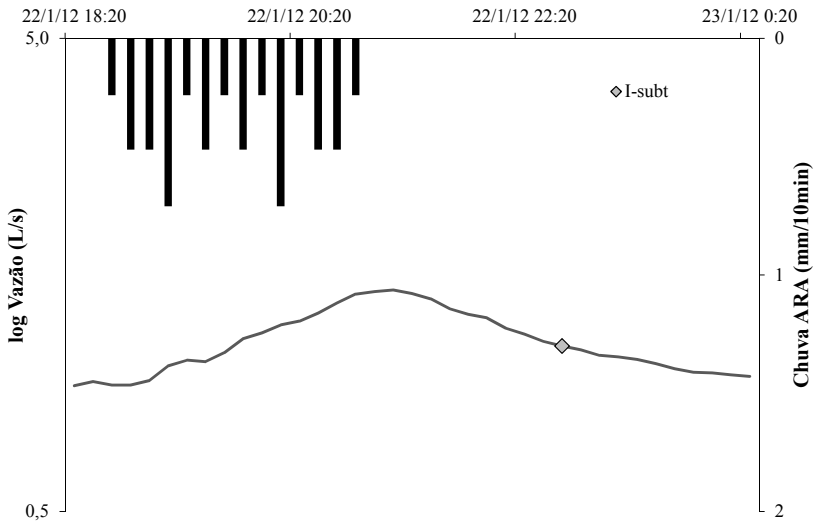


Figura B19 – Eventos hidrológicos n. 19. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

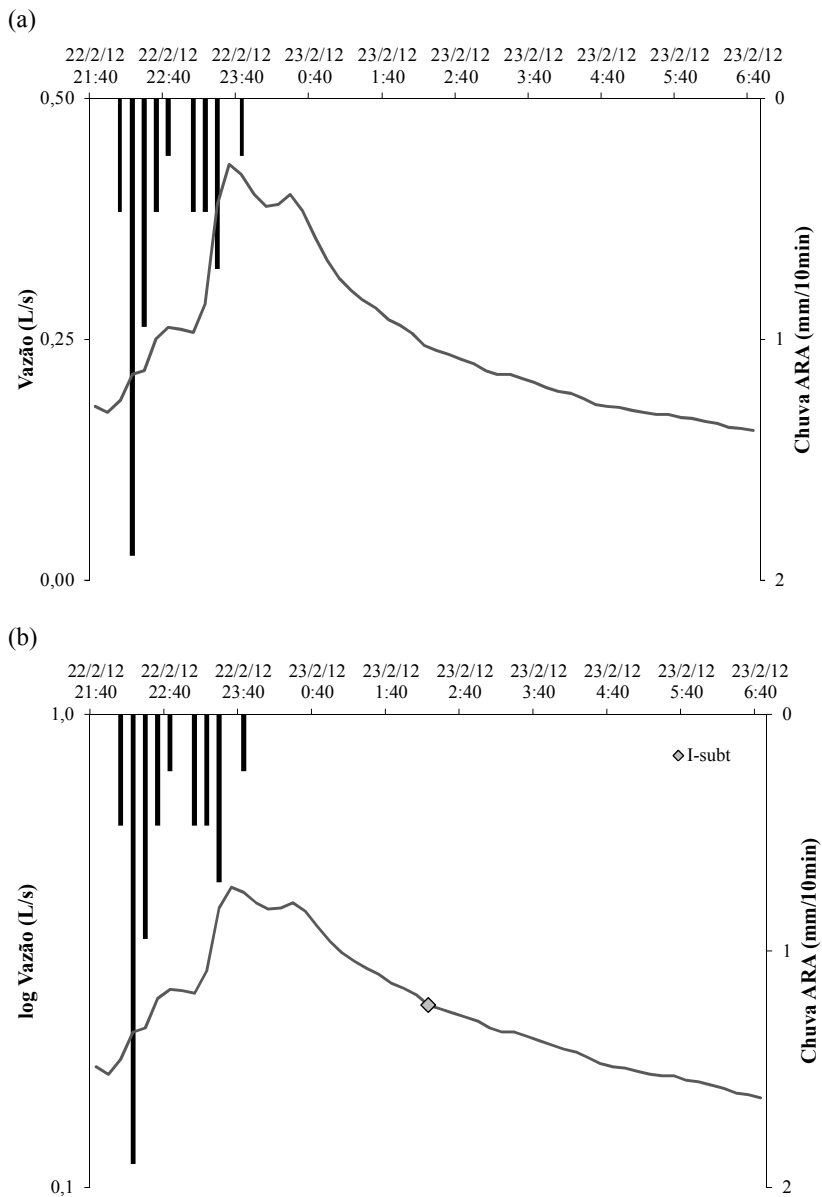
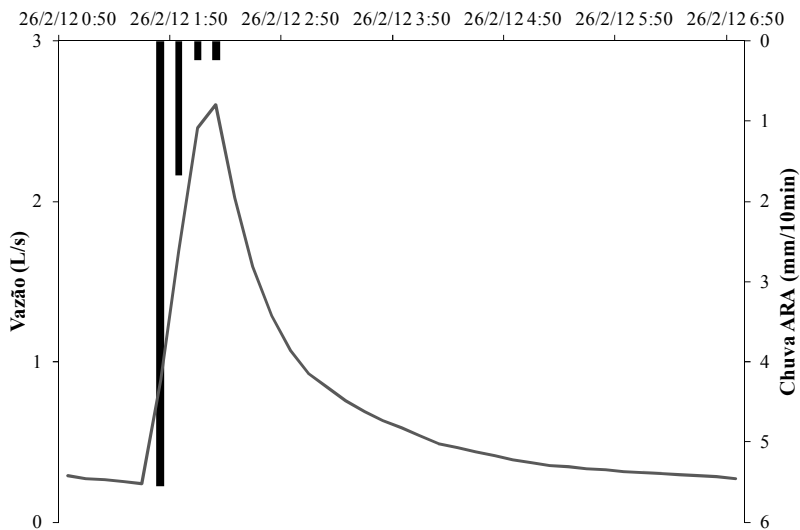


Figura B20 – Eventos hidrológicos n. 20. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

(a)



(b)

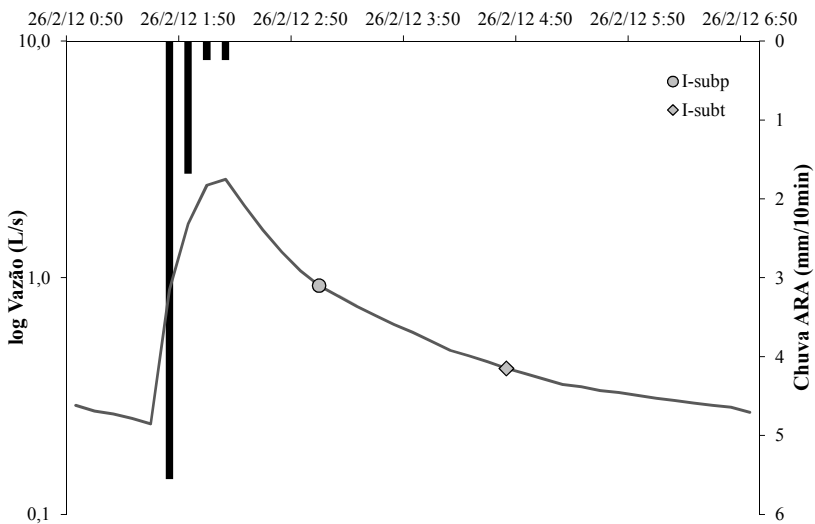


Figura B21 – Eventos hidrológicos n. 21. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.



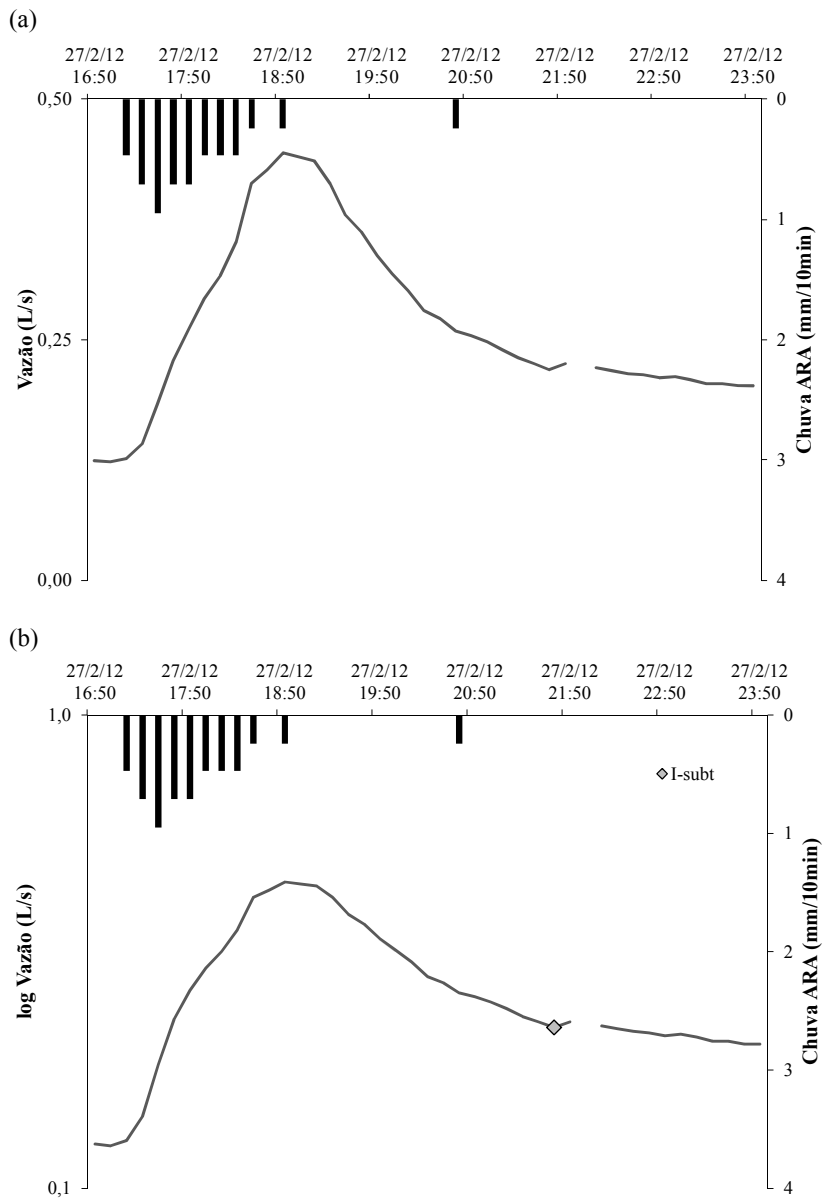
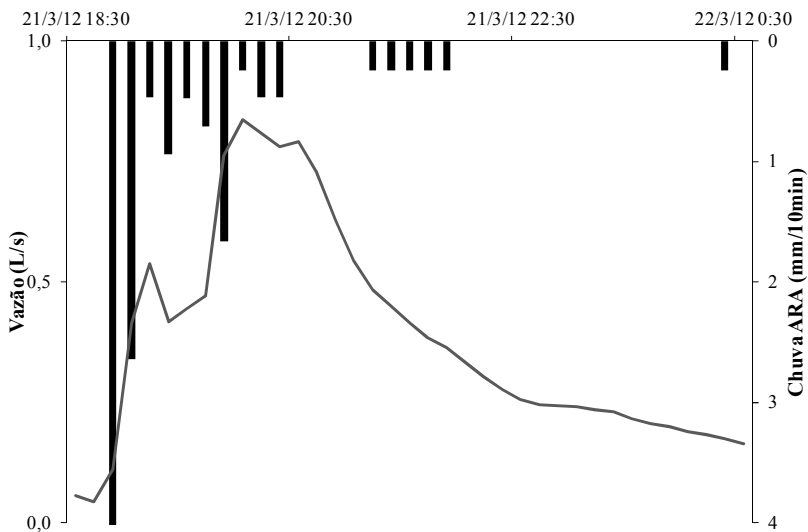


Figura B22 – Eventos hidrológicos n. 22. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

(a)



(b)

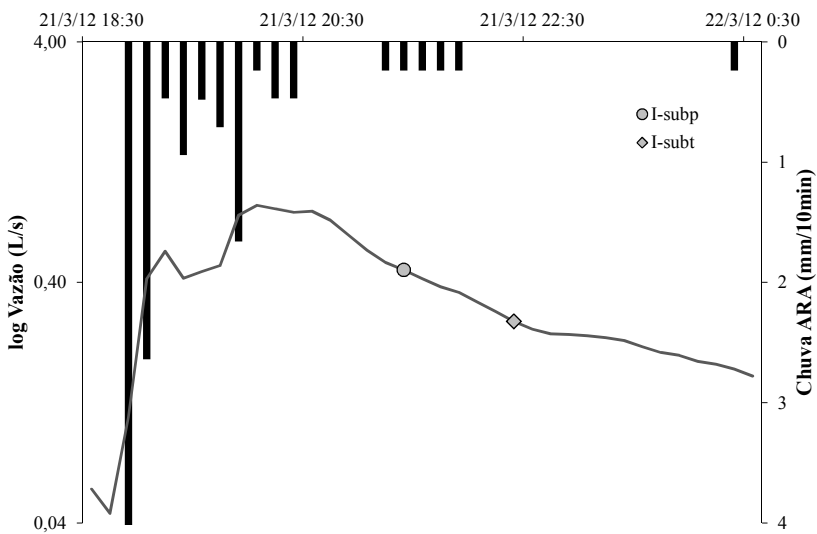
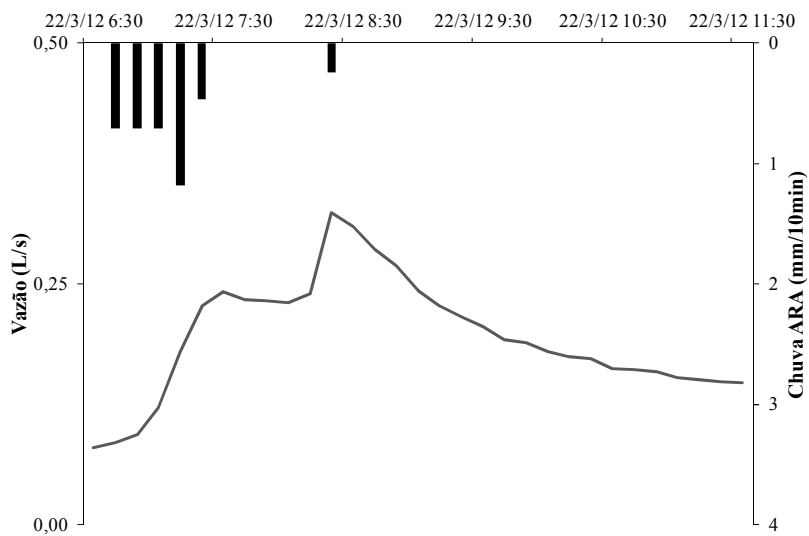


Figura B23 – Eventos hidrológicos n. 23. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

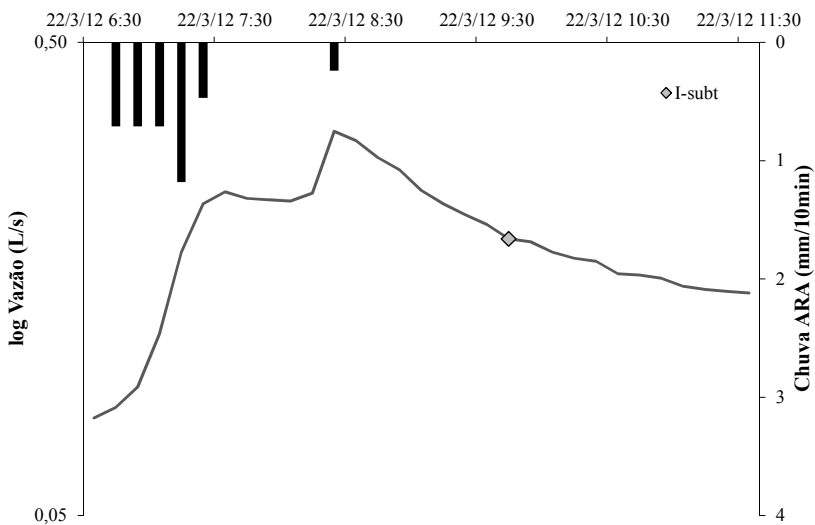
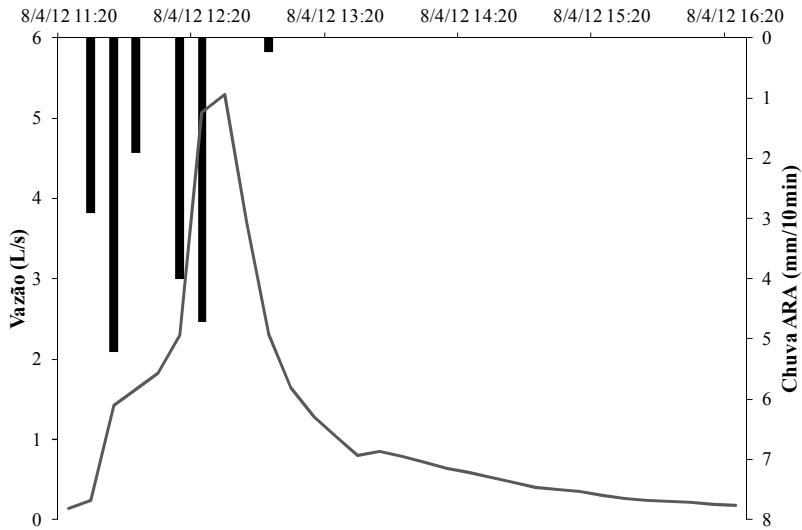


Figura B24 – Eventos hidrológicos n. 24. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

(a)



(b)

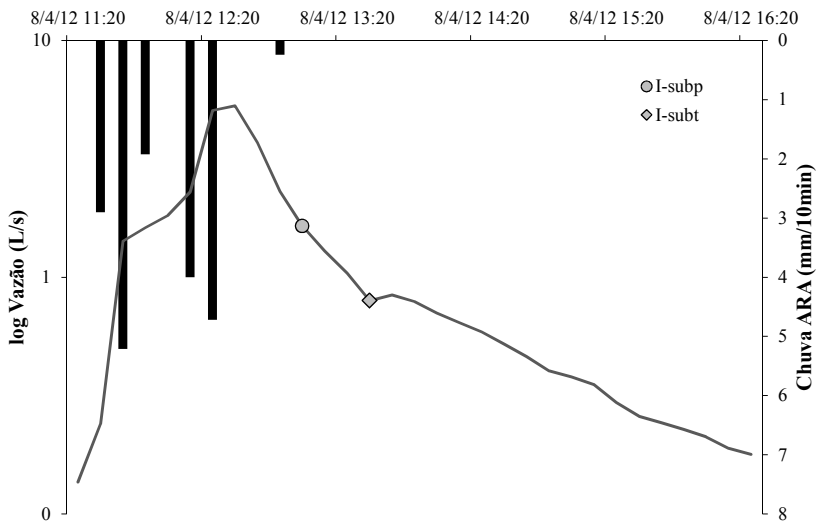
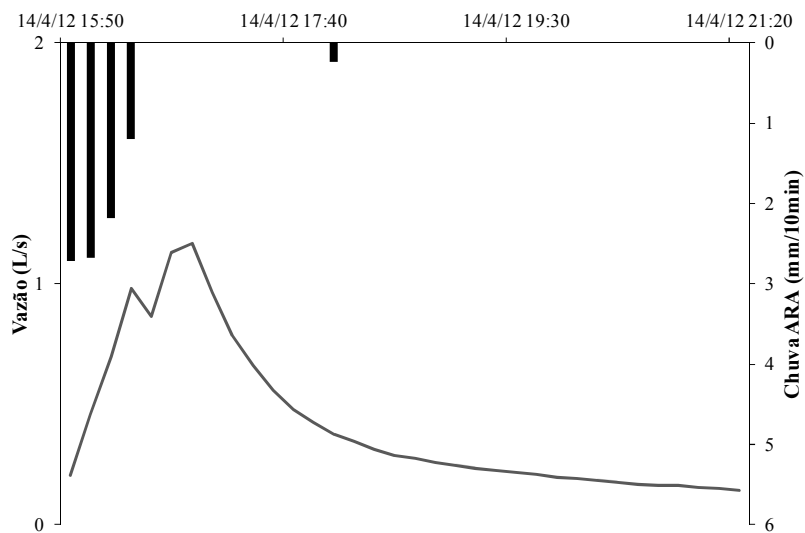


Figura B25 – Eventos hidrológicos n. 25. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

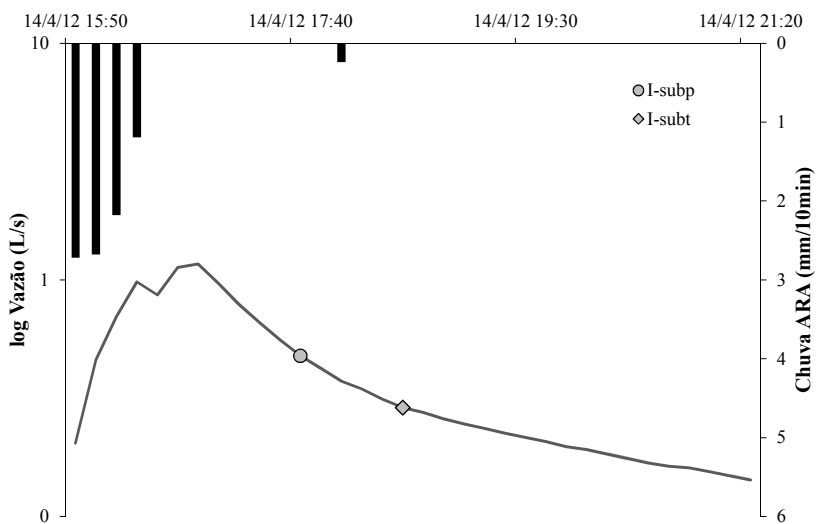
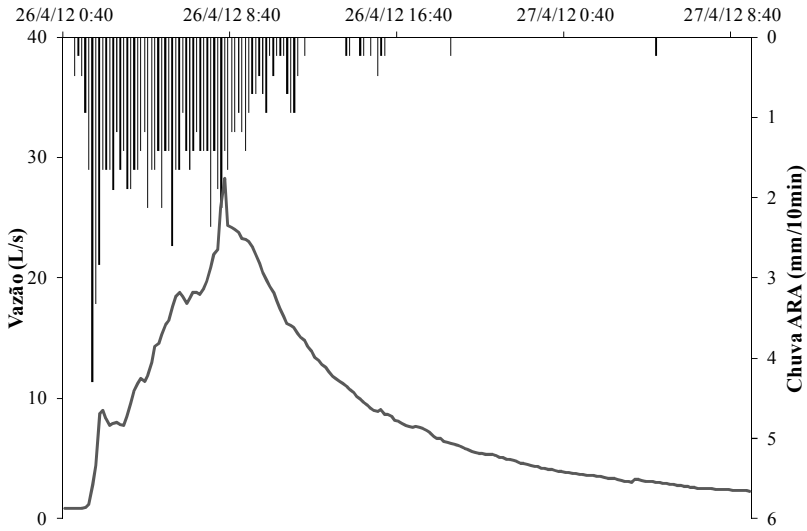


Figura B26 – Eventos hidrológicos n. 26. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

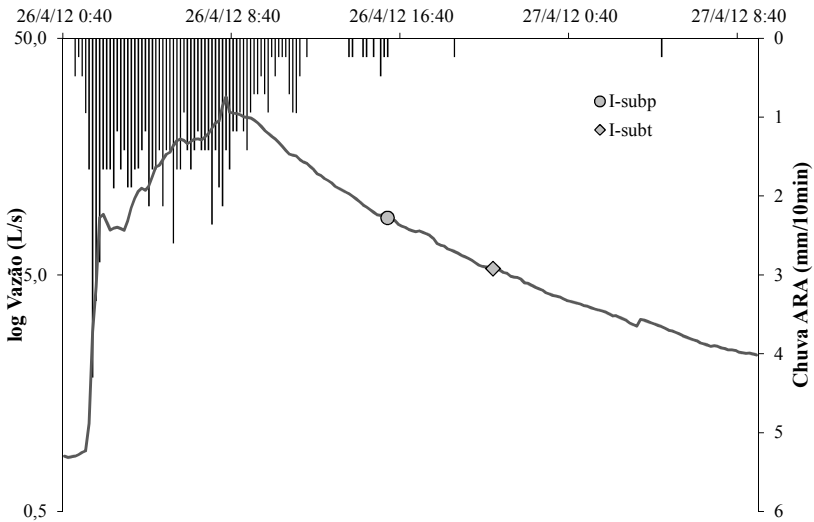
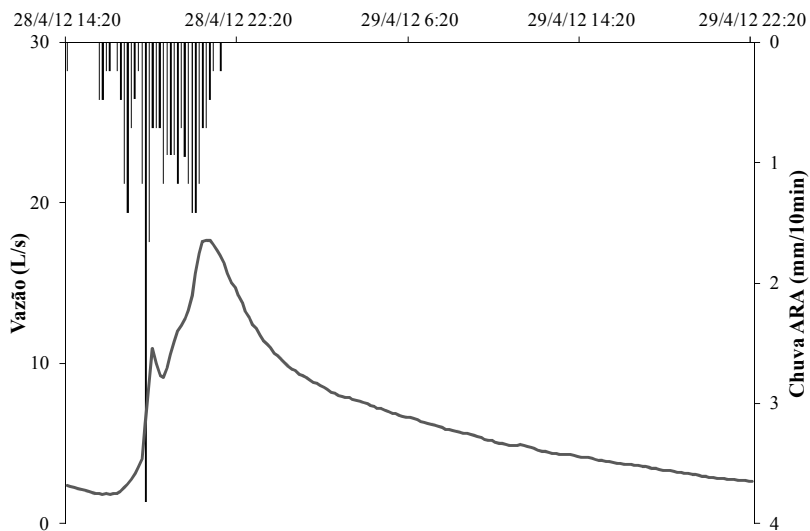


Figura B27 – Eventos hidrológicos n. 27. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

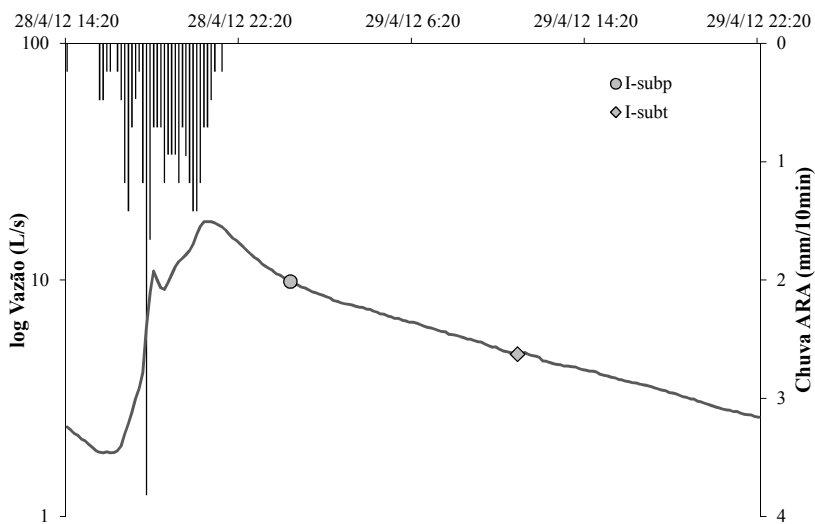
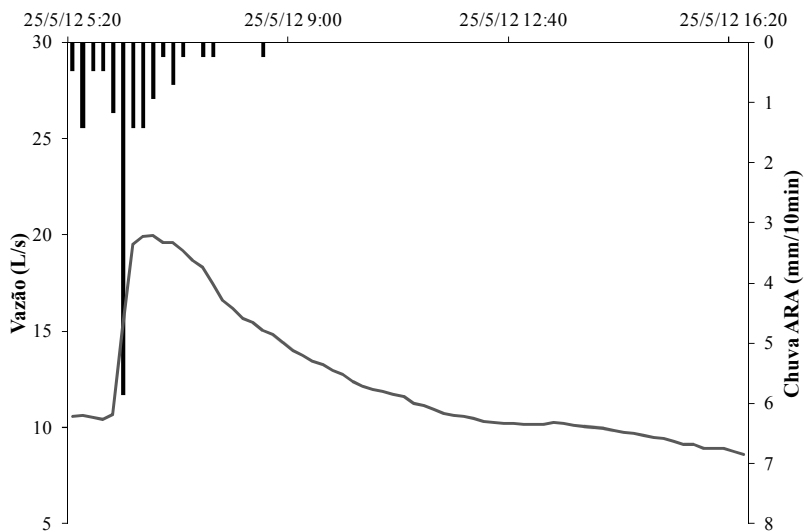


Figura B28 – Eventos hidrológicos n. 28. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização dos pontos de inflexão.

(a)



(b)

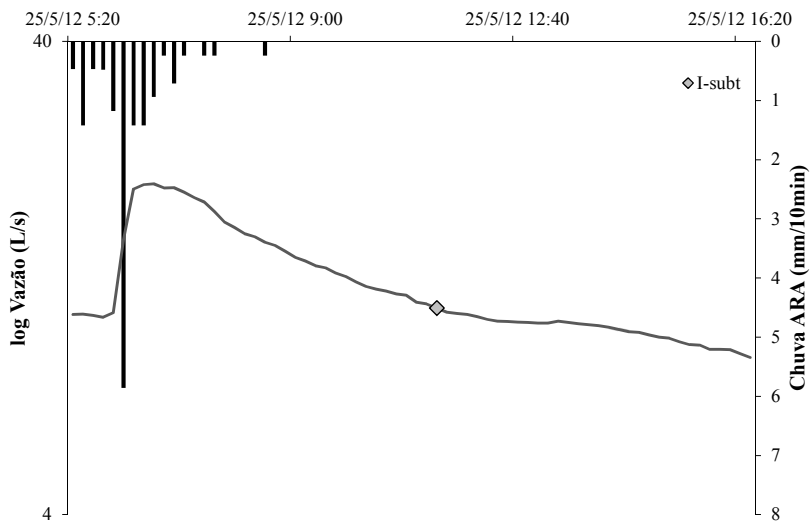
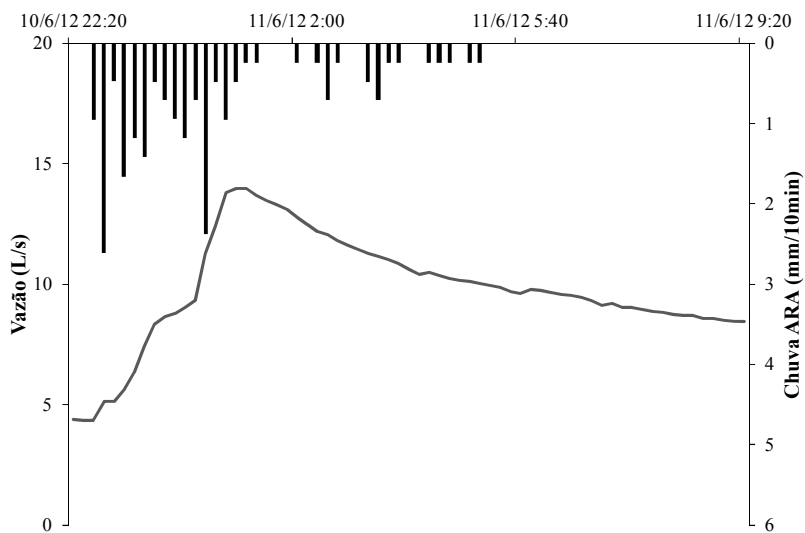


Figura B29 – Eventos hidrológicos n. 29. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.



(a)



(b)

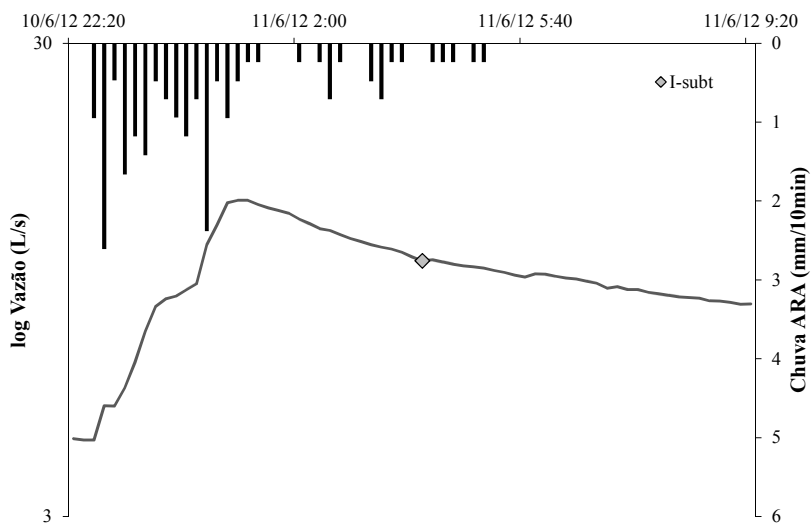
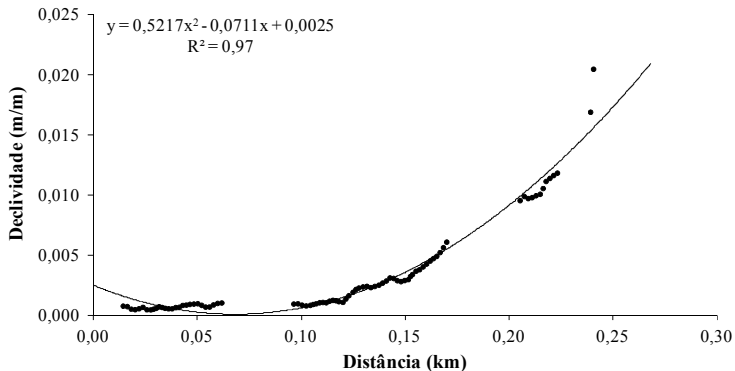


Figura B30 – Eventos hidrológicos n.30. (a) com hidrograma em escala linear; e (b) escala logarítmica e localização do ponto de inflexão.

### APÊNDICE C – Parâmetros medidos e adotados utilizados na aplicação das fórmulas de $t_c$

(a)



(b)

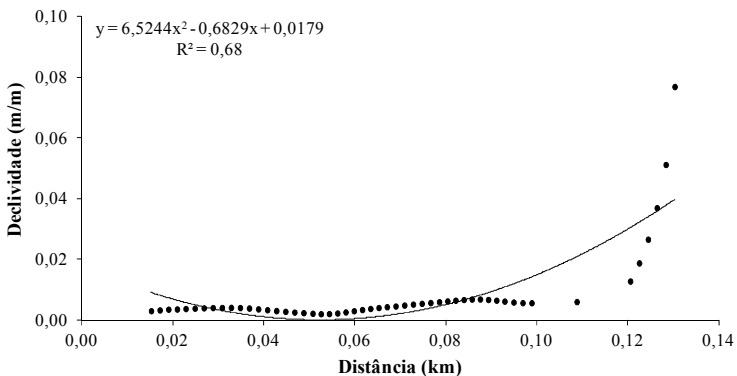


Figura C1 – Perfil longitudinal do rio Araponga, a partir da exutória. (a) Base cartográfica obtida a partir do levantamento topográfico, escala 1:5.000; e (b) Base cartográfica do levantamento aéreo da Prefeitura Municipal de Rio Negrinho, escala 1:10.000

Tabela C1 – Valores adotados e estimados dos parâmetros necessários para a estimativa morfométrica de tempo de concentração, ou seja, aplicação das fórmulas.

| <b>Parâmetro</b>      | <b>Unidade</b>        | <b>1:10.000</b>        | <b>1:5.000</b>         |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| <i>L</i>              | (km)                  | 0,31                   | 0,39                   |
| <i>L<sub>c</sub></i>  | (m)                   | 270,0                  | 242,5                  |
| <i>H</i>              | (km)                  | 0,10                   | 0,11                   |
| <i>S</i>              | (m/m)                 | 0,32                   | 0,29                   |
| <i>A</i>              | (km <sup>2</sup> )    | 0,04                   | 0,05                   |
| <i>H<sub>m</sub></i>  | (m)                   | 56,30                  | 62,89                  |
| <i>Ciz</i>            | -                     | 0,08                   | 0,08                   |
| <i>i</i>              | (mm/h)                | 3,12                   | 3,12                   |
| <i>N</i>              | -                     | 0,80                   | 0,80                   |
| <i>n</i>              | (s/m <sup>1/3</sup> ) | 0,06                   | 0,06                   |
| <i>Sscs</i>           | (mm)                  | 56,67                  | 56,67                  |
| <i>S<sub>m</sub></i>  | -                     | 0,43                   | 0,53                   |
| <i>CN</i>             | -                     | 15                     | 15                     |
| <i>k</i>              | (1/km) <sup>0,6</sup> | 3,27                   | 3,31                   |
| <i>cf</i>             | -                     | 0,29                   | 0,29                   |
| <i>B</i>              | -                     | 3,89                   | 5,46                   |
| <i>B<sub>1</sub></i>  | -                     | 3,90                   | 5,46                   |
| <i>B<sub>2</sub></i>  | -                     | -1,93·10 <sup>-3</sup> | -2,66·10 <sup>-4</sup> |
| <i>B<sub>3</sub></i>  | -                     | 1,70·10 <sup>-6</sup>  | 1,61·10 <sup>-7</sup>  |
| <i>K<sub>av</sub></i> | (mm/h)                | 60                     | 60                     |
| <i>S<sub>H</sub></i>  | -                     | 0,46                   | 0,46                   |
| <i>B<sub>k</sub></i>  | -                     | 9,32                   | 7,60                   |
| <i>a</i>              | -                     | 1,79·10 <sup>-2</sup>  | 2,49·10 <sup>-3</sup>  |
| <i>b</i>              | -                     | -6,83·10 <sup>-4</sup> | -7,11·10 <sup>-5</sup> |
| <i>c</i>              | -                     | 6,52·10 <sup>-6</sup>  | 5,22·10 <sup>-7</sup>  |
| <i>p</i>              | -                     | 5,60·10 <sup>-2</sup>  | 3,58·10 <sup>-2</sup>  |
| <i>q</i>              | -                     | -8,91·10 <sup>-4</sup> | -9,27·10 <sup>-5</sup> |
| <i>m</i>              | -                     | 8,51·10 <sup>-6</sup>  | 6,80·10 <sup>-7</sup>  |