

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**JOSÉ VIDAL DE FIGUEIREDO**

**INÍCIO DA GERAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA  
BACIA SEMIÁRIDA EM CAATINGA PRESERVADA**

**FORTALEZA-CE  
2011**

JOSÉ VIDAL DE FIGUEIREDO

**INÍCIO DA GERAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA BACIA  
SEMIÁRIDA EM CAATINGA PRESERVADA**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas no semiárido.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo

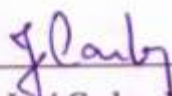
JOSÉ VIDAL DE FIGUEIREDO

INÍCIO DA GERAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA BACIA  
SEMIÁRIDA EM CAATINGA PRESERVADA


Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 31 de 01 de 2011.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Co-orientador)  
Instituto Federal do Ceará - IFCE



Prof. Dr. Julien Daniel Pierre Burte (Conselheiro)  
Universidade Federal - UFC

*Assinado em 31 de Janeiro de 2011 por José Vidal de Figueiredo, pelo motivo de ciência.*

F491i Figueiredo, José Vidal

Início da geração do escoamento superficial em uma bacia  
semiárida em caatinga preservada..- Fortaleza, 2011.

Área de concentração: Manejo de bacias hidrográficas.  
Dissertação (Mestrado) em Engenharia Agrícola, Centro de  
Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará.

1.Escoamento superficial. 2.Infiltração. 3. Geologia.  
4. Conectividade. I. Título.

*Aos meus Pais,  
José Luiz de Figueiredo e M<sup>a</sup> Elizete Vidal de  
Figueiredo, pelo modelo de valores.*

## AGRADECIMENTOS

Neste momento tão importante, é necessário agradecer a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Primeiramente, DEUS por todas as obras realizadas em minha vida.

Aos meus pais, pelo apoio, confiança em mim sempre depositado.

Ao professor José Carlos de Araújo pela disponibilidade, confiança, conselhos, amizade, ensinamentos e pela orientação. Pela honra de poder partilhar da sua vasta experiência.

O co-orientador Pedro Henrique Augusto Medeiros pela disponibilidade, conselhos sensatos, orientação e amizade.

Ao professor Julien Daniel Pierre Burte pela disponibilidade para participação na banca examinadora.

Os amigos do Grupo de pesquisa HIDROSED, Iran Neto, Alexandre Cunha, Alexandre Gomes, Cicero Lima, George Mamede, Yuri Castro, Cristian Epifânio, Deborah Mithya, Francisco Wellington, Everton, José Wellington, George Mamede, Marcos Meireles, José Teixeira, Leonardo, Marcelo Aguiar, Laldiane, Mário Wiegand, Marcela, Paulo Belo, Diego, Keivia, Eliakim, Monique, pela colaboração nas viagens a campo e incentivos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, especialmente aos que tive a oportunidade de trabalhar: Claudivan Feitosa de Lacerda, Luiz Alberto, Eunice Maia, Marcus Bezerra, Renildo Mion, Adunias Texeira, Luis Camboim.

A Sr Antonio Francisco da Silva (Seu Tico), Cícero e Hosana Oliveira, moradores de Aiuaba, pela incansável disposição nas coletas de campo.

Aos amigos e cúmplices de sempre Adriana Oliveira e Junior, Maria Jorgiana, Adriana Fernandes, Helba Araújo, Jomávia Lacerda, Eliomar e Valdênia, Jordânia, Rosângela, pela ajuda, paciência, incentivos, compreensão, por todos os momentos vividos, conquistas e alegrias compartilhadas.

Aos colegas de curso Hernandes, Luis Clenio, Dirceu Duarte, Lobato, Adrissa, Viviane, Fernando, Clayton Moura, Rochelle, Firmino, Kelly Nascimento, Sávio Fontenele, Ana Paula, Joseilson, Eveline, Leila, Antonio Henrique, Mário, pelos bons momentos de convivência.

Aos amigos(as) Gildete, Lucineide, Irlânia, Aline Alves, Aline Silva, Wilson Angelim, Robstânia, Cleudivan, Cirlanio, Willames, pelo companheirismo.

Ao amigo e professor Vicente Fechine Sobrinho pelos conselhos e questionamentos.

A Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFC (DENA).

Ao Instituto Federal do Ceará (IFCE), pelo apoio.

Ao Instituto Centro de Ensino Tecnológico (CENTEC), Unidade Juazeiro do Norte-CE, pelo apoio.

Ao Instituto Chico Mendes e aos funcionários da Estação Ecológica de Aiuaba, pelo apoio.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, apoiaram e colaboraram para que este trabalho alcançasse seus objetivos.

A Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa (FUNCAP), pela concessão da bolsa de fomento à pesquisa.

**MUITO OBRIGADO!**

*“Para compreender as pessoas devo tentar escutar o que elas não estão dizendo, o que elas talvez nunca venham a dizer”*

*Jonh Powell*



## RESUMO

FIGUEIREDO, José Vidal. Universidade Federal do Ceará, Janeiro 2011. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em caatinga preservada.** Orientador: José Carlos de Araújo. Examinadores: Pedro Henrique Augusto Medeiros, Julien Daniel Pierre Burte.

O objetivo principal desse trabalho foi avaliar as condições de início do escoamento superficial em uma pequena bacia semiárida preservada. A pesquisa foi desenvolvida na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA, 12 km<sup>2</sup>) localizada na Estação Ecológica de Aiuaba, em município homônimo, Ceará. Foram usados dados coletados de chuva e vazão em campo do período de oito anos (2003 a 2010). No entanto, após análises e seleção optou-se por um recorte de seis anos de interesse (2005 a 2010), cuja precipitação superou 10mm. Concluindo que: A maior intensidade em cinco minutos ( $I_5$ ) observada neste período foi de 170,70 mm/h, com duração de 2 horas e 50 minutos, total precipitado de 82,77 mm, foi também aquele que apresentou a maior lâmina escoada: 2,16 mm do total precipitado na bacia; o coeficiente de runoff (CR) médio da BEA é baixo, da ordem de 0,77%, com valor máximo de 2,61%. Com base apenas na precipitação total, não é possível avaliar se ocorrerá ou não escoamento. No intuito de avaliar a resposta hidrológica na bacia, foi analisada a relação entre a precipitação, o escoamento superficial, a umidade do solo e a intensidade da precipitação. Para a relação umidade *versus* intensidade, o melhor desempenho encontrado foi com intensidade de 60 minutos, cuja eficiência foi de apenas 40%. Este valor aproxima-se do tempo de concentração da BEA, que é de aproximadamente 65 minutos. Analisando a umidade *versus* a distribuição temporal da precipitação, a intensidade  $I_{60}$ , foi aquela que separou mais eficientemente os eventos com e sem escoamento (51%). As condições em que nunca é gerado escoamento na BEA são: a precipitação EP1 menor que 12,20 mm ou a intensidade da chuva ( $I_{60}$ ) igual ou menor 11,5 mm/h. Portanto, a intensidade crítica (11,5 mm/h), situa-se entre a mediana (9 mm/h) e a média (25 mm/h) da Ksat da BEA. Para ter início do escoamento superficial na BEA é necessário um evento de precipitação EP1 superior a 47,50 milímetros, independente de sua intensidade. Isto explicou 75% da lâmina escoada na BEA para o período observado. Entretanto, não foi possível separar todos os eventos com e sem escoamento, havendo uma região em que ocorrem os dois tipos de eventos. Nesta região encontra-se 25% do escoamento da BEA ocorrido no período estudado. Foram escolhidos dois casos com escoamento e dois sem escoamento para análises. Eventos com respostas hidrológicas semelhantes, ao serem representados numa escala relativa de precipitação *versus* tempo, mostraram comportamento semelhante. A função entropia conseguiu explicar a geração de escoamento para os quatro eventos selecionados. Mostrando que a distribuição temporal da precipitação é importante para entender a ocorrência do escoamento, e pode ser explicado pela função densidade de probabilidade. As medidas de vazão realizadas na EF1 e EF2 apontam para grande diferença no escoamento entre as duas bacias BEA1 e BEA2. Os resultados encontrados fornecem elementos importantes sobre o início do escoamento superficial em microbacias semiáridas de escoamento efêmero.

**Palavras Chaves:** Escoamento superficial, infiltração, geologia, conectividade.

## ABSTRACT

FIGUEIREDO, José Vidal. Federal University of Ceará, January 2011. **Starting surface runoff in a preserved semi arid caatinga basin.** Advisor: José Carlos de Araújo. Committee: Pedro Henrique Augusto Medeiros, Julien Daniel Pierre Burte.

The main objective of this study was to evaluate the conditions of starting surface runoff in a small preserved semiarid basin. The research was conducted at the Bacia Experimental de Aiuaba (*Aiuaba Experimental Basin* (BEA) 12 km<sup>2</sup>) located in the Estação Ecológica de Aiuaba (*Aiuaba Ecological Station*) in the city of Aiuaba, Ceará. This research used data collected from rainfall and runoff in eight years (2003-2010). However, after analysis and selection we opted for an interval of six years (2005-2010), where the rainfall exceeded 10mm. From that data, we observed that:

- a) The highest intensity in five minutes ( $I_5$ ) observed in this period was 170.70 mm/h, in a precipitation event lasting 2 hours and 50 minutes, total precipitation of 82.77 mm, which was also when was observed the highest runoff depth (2.16 mm) of the total precipitated in the basin.
- b) The average runoff coefficient (CR) of the BEA is low, about 0.77%, with a maximum of 2.61%.

Based solely on rainfall, it is not possible to assess whether or not runoff will occur. In order to assess the hydrological response in the basin, we analyzed the relationship between precipitation, runoff, soil moisture and precipitation intensity. For the moisture ratio versus intensity, the best performance was found with an intensity of 60 minutes, whose efficiency was only 40%. This value is close to the time of concentration of BEA, which is approximately 65 minutes. Analyzing the moisture versus the temporal distribution of rainfall, the  $I_{60}$  intensity was the one which separated more efficiently the events with and without runoff (51%). The conditions under which superficial flow is never generated in the BEA are: Less EP1 precipitation than 12.20 mm and the ( $I_{60}$ ) rainfall intensity equal to, or less than 11.5 mm/h. Therefore, the critical intensity (11.5 mm/h), is located between the median (9 mm/h) and the average (25mm/h) of the  $K_{sat}$  of the BEA. The generation of runoff in the BEA requires an EP1 precipitation event exceeding 47.50 mm, regardless of its intensity. This explained 75% of the runoff depth at BEA for the observed period. However, it was not possible to separate all the events with and without flow, existing a region in which the two types of events are observed. This region is 25% of the surface runoff in BEA occurring during the studied interval. We selected two cases without flow and two cases with flow for analysis. Events with similar hydrological responses, to be represented on a scale of precipitation versus time, showed similar behavior. The entropy function could explain the generation of runoff for the four selected events, showing that the temporal distribution of rainfall is important to understand the occurrence of the flow, and can be explained by the probability density function. The readings taken in the flow in EF1 and in EF2 point to the large difference in flow characteristics between the basins BEA1 and BEA2. The results provide insights on the initial generation of surface flow in semiarid ephemeral drainage basins.

**Keywords:** Surface runoff, infiltration, geology, connectivity

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) em relação ao Estado do Ceará e ao município de Aiuaba. Fonte: Farias (2008).....	29
Figura 2 – Foto da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), porção sudoeste, mostrando a topografia da área.....	31
Figura 3 – Mapa de geologia da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Farias (2008) adaptado de Araújo, L. (2005).....	32
Figura 4 - Mapa se solos da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Farias (2008) adaptado de Creutzfeldt (2006).....	33
Figura 5 – Exemplos de Clareiras na BEA .....	35
Figura 6 – Estação Fluviométrica 1 (EF1), mostrando a calha Parshall e a coleta de dados para notebook.....	38
Figura 7 – Tela do programa Linígrafo Flex, com dados medidos. ....	38
Figura 8 – Estação Fluviométrica 2 (EF2), mostrando a sonda instalada a montante do vertedouro.....	39
Figura 9 – Relação entre o nível d’água e o volume de acumulação no açude Boqueirão, fonte: ARAÚJO, J. et al., 2004.....	40
Figura 10 – Açude Boqueirão, exutório da BEA, mostrando localização das régua linimétricas e Linígrafo. Data: 11/4/2010 .....	41
Figura 11 - Classes texturais de solos da BEA. Na figura, ARG= Argissolo, LUV= Luvisolo, LAT= Latossolo.....	45
Figura 12 – Nível máximo e mínimo no reservatório Boqueirão e precipitação média anual na BEA.....	46
Figura 13 – Nível da água no reservatório Boqueirão e precipitação média na bacia do período 1/1/2005 a 31/12/2007. Observe que o nível mínimo da régua é 1,60m (1670m <sup>3</sup> ), abaixo do qual não é possível medir. ....	47
Figura 14 – Nível da água no reservatório Boqueirão e precipitação média na bacia do período 1/1/2008 a 30/4/2010. Observe que o nível mínimo da régua é 1,60m (1670m <sup>3</sup> ), abaixo do qual não é possível medir. ....	47
Figura 15 – Relação entre escoamento e precipitação na BEA para os eventos selecionados, sem a separação do evento de 7/4/2009, chamado de “caso especial”. ....	50
Figura 16 – Distribuição temporal do evento “caso especial”. ....	51

Figura 17 – Valores de precipitação para sete postos pluviométricos vizinhos a EP1, para cinco dias anteriores e cinco dias posteriores ao evento “caso especial”. .....	51
Figura 18 – Relação entre escoamento e precipitação na BEA, para os 83 eventos selecionados.....	52
Figura 19 – Relação entre precipitação EP1 e umidade média na BEA, para os 83 eventos selecionados. Na caixa, indica-se o número de eventos (e seu respectivo percentual) pertencente a uma região do ábaco .....	54
Figura 20 – Comparativo das variáveis medidas para os eventos de precipitação com escoamento (25/1/2010) e sem escoamento (3/4/2009). Na figura, P EP1= precipitação na estação EP1; PM= precipitação média; UM= umidade volumétrica média; D= duração; IM= intensidade média; I <sub>5</sub> = intensidade máxima para cinco minutos (e correspondentes); PA 2= precipitação antecedente para dois dias (e correspondentes). .....	55
Figura 21 – Análise da distribuição temporal para os eventos de precipitação com escoamento (25/1/2010) e sem escoamento (3/4/2009). .....	56
Figura 22 – Relação entre precipitação média diária na BEA (nos dias dos 83 eventos selecionados) e umidade média do solo na BEA. Os números nas caixas representam a quantidade de eventos da respectiva região do ábaco. Observe que a caixa hachureada corresponde aos eventos não explicados pelo(s) critério(s) estabelecido(s). .....	56
Figura 23 – Relação entre umidade média na BEA e intensidade média da precipitação, para os 83 eventos selecionados.....	57
Figura 24 – Relação entre e umidade média do solo na BEA e intensidades específicas da precipitação, para os 83 eventos selecionados. Observe que $\eta$ representa a eficiência da respectiva intensidade específica em separar eventos com e sem geração de escoamento. O valor de $\eta$ é a razão entre o número de eventos explicados e o número total de eventos (83). Os números nas caixas representam a quantidade de eventos da respectiva região do ábaco. A caixa hachureada corresponde aos eventos não explicados pelo(s) critério(s) estabelecido(s). .....	58
Figura 25 – Relação entre precipitação na EP1 e intensidade média na BEA, para os 83 eventos selecionados.....	59
Figura 26 – Relação entre precipitação e intensidades específicas na BEA, para os 83 eventos selecionados.....	60
Figura 27 – Análise da influência da precipitação e intensidade da precipitação na geração de escoamento superficial. ....	61

Figura 28 – Comparativo das variáveis medidas para os eventos de precipitação com escoamento (19/4/2007) e sem escoamento (5/2/2006). Na figura, P EP1= precipitação na estação EP1; PM= precipitação média; UM= umidade volumétrica média do solo; D= duração; IM= intensidade média da precipitação; I <sub>5</sub> = intensidade máxima para cinco minutos (e correspondentes); PA 2= precipitação antecedente para dois dias (e correspondentes). .....	62
Figura 29 – Análise da distribuição temporal para os eventos de precipitação com escoamento (19/4/2007) e sem escoamento (5/2/2006). .....	62
Figura 30 – Análise da distribuição espacial para os eventos de precipitação: com escoamento (19/4/2007) e do dia anterior (18/04/2007); e sem escoamento (5/2/2006) e do dia posterior (6/2/2005). .....	64
Figura 31 – Comparação de quatro eventos observados na BEA, localizados na região R-2. 65	
Figura 32 – Comparação dos quatro eventos de chuva observados, aplicando a função densidade de probabilidade. ....	66
Figura 33 – Envoltória inferior referente a faixa de umidade média para precipitação na EP1 .....	66
Figura 34 – Comportamento dos riachos, quatro horas após o encerramento da precipitação, no dia 11/4/2010. ....	68
Figura 35 – Precipitação da EP1 a cada 5 min e hidrograma da EF2 a cada 15 min do evento chuva-deflúvio de 27/2/2008.....	69
Figura 36 – Precipitação da EP1 a cada 5 min e hidrograma da EF2 a cada 15 min do evento chuva-deflúvio de 01/4/2008.....	70
Figura 37 – Precipitação da EP1 a cada 5 min e hidrograma da EF1 a cada 5 min do evento chuva-deflúvio de 25/1/2010.....	70
Figura 38 – Precipitação da EP1 (a cada 5 min) e hidrograma da EF1 (a cada 5 min) e EF2 (a cada 15 min) do evento chuva-deflúvio de 21/3/2010.....	71
Figura 39 – Precipitação da EP1 (intervalo de 5 min) e hidrograma da EF1 (intervalo de 5 min) e EF2 (intervalo de 15 min) do evento chuva-deflúvio de 11/4/2010.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das intensidades de chuva.....	22
Tabela 2 - Valores médios do parâmetro número de curva (CN) para bacias hidrográficas rurais (Tucci, 2000).....	27
Tabela 3 – Parâmetros fisiográficos da BEA1 e BEA2 .....	30
Tabela 4 – Dados dos 83 eventos chuvosos selecionados para estudo na BEA. (P – Precipitação em mm; ESC – Escoamento em mm; CR – Coeficiente de Runoff).....	48
Tabela 5 – Evento anterior ao dia 19/4/2007 (com escoamento) e posterior ao dia 5/2/2006 (sem escoamento). Na tabela, P= precipitação. ....	63
Tabela 6 – Valores dos parâmetros abstração inicial (Ia), armazenamento (S) e classe de umidade da BEA. ....	67
Tabela 7 – Medidas de escoamento na bacia principal EF1 e secundária EF2 e estimativa do volume de entrada na barragem, usando o balanço hídrico proposto por Costa (2007). ....	69

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

BEA – Bacia Experimental de Aiuaba

EP1 – Estação pluviométrica número 1, localizada na BEA

EP2 – Estação pluviométrica número 2, localizada na BEA

EP3 – Estação pluviométrica número 3, localizada na BEA

EF1 – Estação fluviométrica número 1, localizada na BEA

EF2 – Estação fluviométrica número 2, localizada na BEA

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

IA – índice de aridez

Dt – densidade de drenagem

Lt – comprimento total dos canais

A – área da bacia

CN – número da curva

SCS – serviço de conservação do solo (EUA)

HU – hidrograma unitário

P – precipitação

Ia – abstração inicial

S – capacidade de armazenamento

Q – lâmina escoada

HUS – hidrograma sintético unitário

i – intensidade da chuva

f – capacidade de infiltração

ESEC – estação ecológica

$Q_{CP}$  – vazão da calha Parshall

$W_{CP}$  – largura do estrangulamento da calha Parshall

$H_A$  – altura da coluna d'água no ponto a montante do estrangulamento

LAT – latossolo

LUV – luvisolo

ARG – argissolo

$K_{sat}$  – condutividade hidráulica saturada

ESC – Escoamento

CR – coeficiente de escoamento superficial

$I_{Médio}$  – intensidade média

$I_5$  – Intensidade máxima em 5 minutos

$I_{15}$  – Intensidade máxima em 15 minutos

$I_{30}$  – Intensidade máxima em 30 minutos

$I_{45}$  – Intensidade máxima em 45 minutos

$I_{60}$  – Intensidade máxima em 60 minutos

$I_{120}$  – Intensidade máxima em 120 minutos

$D$  – Duração da chuva

$\theta_{Umido}$  – umidade alta do solo a 15 cm de profundidade, uma hora anterior ao evento

$\theta_{Seco}$  – umidade baixa do solo a 15 cm de profundidade, uma hora anterior ao evento

$\bar{\theta}$  – umidade média do solo a 15 cm de profundidade, uma hora anterior ao evento



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1.	Problema, questão científica e hipótese .....	17
1.2.	Objetivo .....	18
1.3.	Justificativa .....	18
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
2.1.	Hidrologia / Ciclo hidrológico / Escoamento superficial .....	20
2.2.	Hidrologia de regiões semiáridas .....	24
2.3.	Modelagem hidrológica .....	26
2.4.	Processos que interferem no início do escoamento .....	27
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA .....</b>	<b>29</b>
3.1.	Localização .....	29
3.2.	Clima e Hidrologia .....	31
3.3.	Topografia.....	31
3.4.	Geologia.....	32
3.5.	Pedologia .....	33
3.6.	Vegetação .....	34
<b>4.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
4.1.	Hidrometria da Bacia Experimental .....	36
4.2.	Separação de eventos.....	41
4.3.	Análise do início do escoamento em função das variáveis hidrológicas .....	42
	Efeito da precipitação total sobre o início do escoamento .....	43
	Efeito da umidade sobre o início do escoamento superficial .....	43
	Efeito da distribuição temporal da precipitação sobre o início do escoamento .....	43
4.4.	Avaliação das abstrações iniciais .....	44
4.5.	Hidrogramas comparativos das duas microbacias hidrográficas na BEA .....	44
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>
5.1.	Parâmetros hidrológicos da Bacia Experimental.....	45
5.2.	Efeito da precipitação total sobre o início do escoamento superficial.....	47
5.3.	Efeito da umidade antecedente do solo sobre o início do escoamento superficial.....	53
5.4.	Efeito da distribuição temporal da precipitação sobre o início do escoamento.....	59
5.5.	Análise dos eventos da região R-2 .....	64
5.6.	Avaliação das abstrações iniciais e do parâmetro CN .....	66
5.7.	Hidrogramas comparativos das duas micro bacias hidrográficas na BEA .....	68
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>81</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

O Ceará tem cerca de 93% do seu território encravado na região semiárida do Nordeste. Apenas a zona litorânea e alguns microclimas circunscritos às serras úmidas não se configuram como tal.

O semiárido se caracteriza pela relação entre a precipitação anual e evapotranspiração potencial anual, índice de aridez (IA), compreendido entre 0,21 e 0,50; pela concentração do período chuvoso em apenas dois ou três meses e, principalmente, pelo descompasso das precipitações. As chuvas costumam ser irregulares, tanto no espaço quanto no tempo. Os solos do Ceará são, na grande maioria, originários de rochas cristalinas, apresentando-se impróprios para explorações intensivas, pois são rasos, pouco férteis, com substrato impermeável e pedregoso. Sendo assim, o armazenamento de água no solo é restrito. O regime de chuvas rápidas e fortes também dificulta a penetração de água no subsolo.

O crescimento demográfico e a irregularidade na distribuição espacial das concentrações populacionais podem ser considerados agravantes para o gerenciamento dos recursos hídricos, no que diz respeito ao atendimento aos volumes demandados; assim como a redução da capacidade dos reservatórios causada pelo assoreamento e, conseqüentemente, de sua disponibilidade hídrica. Os locais das concentrações populacionais, onde geralmente se constata maiores demandas em relação às ofertas, nem sempre coincidem com os locais das disponibilidades hídricas. Assim, o conhecimento da disponibilidade de oferta hídrica local é imprescindível para garantir a gestão da demanda de água para as necessidades atuais e futuras.

Neste contexto desenvolve-se a necessidade desta pesquisa, buscando explicações para a geração de deflúvio em bacias hidrográficas no semiárido.

### **1.1. Problema, questão científica e hipótese**

A magnitude do escoamento superficial depende de: intensidade da precipitação, geologia, permeabilidade do terreno, condição de umidade antecedente do solo, duração e frequência da precipitação, tipo de cobertura vegetal, área da bacia de drenagem, distribuição espacial e temporal da precipitação, geometria dos rios e ribeiros e declive dos terrenos INETI (2009).

Diante das condições apresentadas, necessárias para geração de escoamento, e sabendo-se que para as bacias estudadas, chuvas semelhantes provocam resposta ao

escoamento superficial bastante diferente. Então, qual a precipitação necessária para gerar escoamento superficial, nas bacias?

A questão científica a ser respondida por essa pesquisa é: quais os condicionamentos hidrológicos para que ocorra o início do escoamento superficial em uma bacia de Caatinga preservada, como no caso da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA)?

A hipótese admitida nessa pesquisa é de que, em uma bacia como a BEA, o escoamento superficial ocorrerá sempre que a precipitação total diária superar um valor fixo (supõe-se que esse valor seja da ordem de grandeza de 20 mm diários), desde que o solo não esteja seco.

## 1.2. Objetivo

O objetivo geral desta dissertação é avaliar as condições de **início do escoamento superficial** em uma pequena bacia semiárida preservada. A pesquisa foi desenvolvida na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA, 12 km<sup>2</sup>) localizada na Estação Ecológica de Aiuaba, em município homônimo, Ceará.

São objetivos específicos, avaliar com base em dados medidos, na BEA:

- a influência do **total precipitado** para o início do escoamento superficial;
- a influência da **umidade antecedente** do solo para o início do escoamento superficial;
- a influência da **distribuição temporal** da precipitação (caracterizada por suas diversas intensidades específicas) para o início do escoamento superficial;
- as **abstrações iniciais** para os eventos monitorados; e
- a importância das **condições geológicas** na formação do escoamento.

## 1.3. Justificativa

A gestão dos recursos hídricos é uma tarefa difícil de ser implantada, pressupõe o planejamento e monitoramento das ações, especialmente em regiões de escassez e incertezas, como o Nordeste brasileiro.

Entender os processos de geração do escoamento é fundamental para se poder fazer uma estimativa da vazão no exutório de uma bacia hidrográfica. Conhecer a vazão de um rio é essencial: para se conhecer a disponibilidade hídrica de uma região; para se conhecer os

processos ambientais, como transporte de sedimentos e de poluentes; previsão de enchentes; para se fazer a aplicação adequada de instrumentos de gestão (como outorga); e para o correto dimensionamento de obras hidráulicas (particularmente no Nordeste brasileiro, onde a utilização de barragens é uma técnica muito usada para convivência com a seca), entre outros.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Hidrologia / Ciclo hidrológico / escoamento superficial

A água é um recurso peculiar, não somente pela sua amplitude de utilização, mas também por ser exímio indicador ambiental da qualidade da manipulação do solo pelo homem. As águas dos cursos que drenam uma região apresentam características físico-químicas próprias, que refletem as atividades do solo da respectiva bacia hidrográfica (TONELLO, 2005).

Para Tucci (2004), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório.

Pode ser conceitualmente entendida como uma área definida topograficamente, drenada por um curso de água ou um sistema conectado de cursos d'água tal que toda vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída.

Também, tem sido utilizada como uma unidade geomorfológica fundamental. Isso se deve ao fato de suas características governarem, no seu interior, todo o fluxo superficial da água. Assim, vem sendo considerada uma unidade territorial ideal para o planejamento integrado do manejo dos recursos naturais (TONELLO, 2005).

Em razão da preocupação com a gestão hídrica, optou-se pela escolha da bacia hidrográfica como “recorte” territorial, pois a adoção da bacia hidrográfica, no caso brasileiro, constitui a unidade físico-territorial para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos, como estabelecido na Lei Federal 9.433/97.

A Política Nacional de Recursos Hídricos, regida pela Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal, estabelece em seu art. 1º – inciso V: “A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.”

Dentre outros, Lanna *apud* Collares (2000), propõe a adoção da unidade territorial “Bacia Hidrográfica” como uma alternativa para o planejamento e gerenciamento ambiental, destacando algumas vantagens e desvantagens. Os autores argumentam que a rede de drenagem de uma bacia pode ser capaz de indicar relação causa-efeitos, particularmente aquelas que envolvem o meio hídrico. Dentre as desvantagens argumenta que nem sempre os limites municipais e estaduais respeitam os divisores da bacia.

Os estudos sobre a dinâmica do relevo em bacias hidrográficas vêm adquirindo grande importância como suporte técnico-científico para a análise ambiental e gestão de bacias hidrográficas, servindo de subsídio para o planejamento urbano, rural e ambiental do espaço físico-territorial.

A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento não é uma unanimidade entre os países. Segundo Collares (2000) vários países da Europa, como por exemplo, Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca e Suécia, adotam limite administrativo. Dentre os países que adotam os limites definidos por bacias hidrográficas estão França, Espanha, Grécia, Portugal, Reino Unido e os Estados Unidos.

Para efeito de comparação, procura-se estabelecer uma classificação quanto ao tamanho da bacia, entretanto não existe consenso quanto à classificação das áreas das bacias hidrográficas. Alguns autores consideram como bacias pequenas aquelas com área inferior a 3 km<sup>2</sup>, bacias médias, com área variando de 3 km<sup>2</sup> a 1.000 km<sup>2</sup> e bacias grandes com área superior a 1.000 km<sup>2</sup>. Para Wisler e Brater (1964) apud Borsato e Martoni, (2006), bacias pequenas são as que possuem área inferior a 10 milhas quadradas (26 km<sup>2</sup>) e bacias grandes com área superior a esse valor.

Também para efeito de comparação se analisa uma bacia hidrográfica procurando criar uma ordenação dos rios para se ter um padrão de checagem entre as bacias. Essa disposição cria uma hierarquia das ordens dos rios, permitindo relacionar a drenagem com a geomorfologia da bacia.

O estudo das bacias de drenagem dentro da geomorfologia iniciou-se com a criação das leis básicas, com as propriedades matemáticas, feito por Horton (1945), Strahler (1954) e Gregory e Walling (1973), segundo Scheidegger (1968).

A hierarquia da rede hídrica cria as ordens dos rios, que permitem ordenar toda a bacia hídrica. A ordenação começa com os rios de primeira ordem, que são os rios sem tributários e o encontro de rios de mesma ordem, cria um novo rio a jusante, de uma ordem superior. Em toda a bacia o rio de maior ordem é chamado de rio principal e dá a ordem da bacia como um todo.

Essa ordenação permite que se crie vários índices que caracterizam a bacia hidrográfica em estudo. Esses índices são determinados através das Leis de composição de drenagem, proposta por Horton.

## Escoamento Superficial

Entre as fases básicas do ciclo hidrológico a do escoamento superficial talvez seja a mais importante, por tratar da ocorrência e transporte de água na superfície terrestre, tendo em vista que a maioria dos estudos hidrológicos está ligado ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento (VILLELA; MATTOS, 1975).

Iniciada a precipitação pluviométrica, parte dela é interceptada pela vegetação, parte infiltra no solo e parte pode ser retida em depressões da superfície do terreno. Se a duração da chuva continuar, após o preenchimento dessas depressões, terá início o escoamento superficial propriamente dito. Assim, a água que escoar sobre a superfície do solo, sem infiltrar, formará a enxurrada que irá compor, junto com o escoamento de base, os córregos, ribeirões, rios, lagos e reservatórios (CHOW et al., 1988).

Os fatores que influenciam o escoamento superficial podem ser de natureza edafoclimática ou fisiográfica. Dentre os fatores climáticos destaca-se a intensidade e a duração da precipitação, pois quanto maior a intensidade, mais rápido o solo atinge a sua capacidade de infiltração provocando excesso de precipitação que escoará superficialmente. A intensidade da chuva é o volume de água que cai na unidade de tempo. São classificadas em cinco categorias, de acordo com Moraes (2007), ver Tabela 1.

**Tabela 1 – Classificação das intensidades de chuva**

<b>Intensidade (mm/h)</b>	<b>Classificação</b>
< 2	Suave
2 - 20	Moderada
20 - 50	Forte
50 - 90	Muito Forte
> 90	Torrencial

Fonte: MACEDO, J. R. *apud* MORAIS, M. F. de (2007).

Outro fator climático importante é o da precipitação antecedente, pois uma precipitação que ocorre quando o solo está úmido devido a uma chuva anterior, terá maior facilidade de escoamento. Os fatores fisiográficos mais importantes são: a área e a forma e a topografia da bacia, a permeabilidade e a capacidade de infiltração do solo. (VILLELA & MATOS, 1975)

A influência da área é óbvia, pois sua extensão está relacionada à maior ou menor quantidade de água que ela pode captar. A área é o elemento básico para o estudo das demais características físicas. (VILLELA & MATOS, 1975)

Pruski, Brandão e Silva (2004) afirmaram que o escoamento superficial corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento das águas sobre a superfície

do solo. O conhecimento deste segmento é de fundamental importância, pois a maioria dos estudos hidrológicos está ligada ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento.

De acordo com Sistema Nacional de Informação Geocientífica, de Portugal - Léxico de Termos Hidrogeológicos INETI (2009), escoamento superficial pode definir-se como a "Parcela da precipitação que flui por ação da gravidade de modo não organizado, das zonas mais elevadas para as zonas mais baixas, concentrando-se em pequenos riachos que se reúnem em ribeiros e mais tarde em rios. Esta água irá terminar em lagos, mares ou oceanos, podendo infiltrar-se no terreno ou evaporar-se para a atmosfera. A magnitude do escoamento superficial depende da intensidade da precipitação, permeabilidade do terreno, duração e frequência da precipitação, tipo de coberto vegetal, área da bacia de drenagem, distribuição espacial da precipitação, geometria dos rios e ribeiros e declive dos terrenos".

Dependendo da sua origem, o escoamento em cursos de água pode subdividir-se nas seguintes formas: escoamento superficial (encosta); escoamento subsuperficial (hipodérmico); escoamento subterrâneo e precipitação direta sobre a superfície livre.

O escoamento superficial pode ser dividido em componentes, com destaque para o escoamento superficial direto e o escoamento de base ou subterrâneo. O primeiro componente resulta da parcela da precipitação que excede a capacidade de infiltração do solo e escoam sobre a sua superfície, gerando cheias; é frequente quando ocorrem precipitações muito intensas e/ou quando o solo já está muito umedecido e com capacidade de infiltração reduzida. Esta parcela do escoamento é conhecida como precipitação efetiva ou deflúvio superficial e sua importância está diretamente associada a dimensionamentos hidráulicos, como barragens, terraços, bacias de contenção e controle da erosão hídrica (TUCCI, 2001; PRUSKI et al., 2003 apud SILVA et al., 2008).

O escoamento superficial é a parte da escorrência que viaja sobre a superfície e canais e alcança a saída da bacia. A parte do escoamento superficial que flui sobre a superfície em direção aos canais chama-se escoamento de encosta e a outra parcela escoamento em linha de água (SILVA, 2007).

Segundo Lima (2010), o deflúvio de uma bacia hidrográfica pode ser considerado como o produto residual do ciclo hidrológico, o qual é influenciado por três grandes grupos de fatores: clima, fisiografia e uso do solo.

**Clima:** os fatores climáticos são importantes na determinação do deflúvio pois influenciam tanto a precipitação quanto a evapotranspiração.



Com relação à precipitação, não apenas a quantidade de chuva, mas também aspectos relacionados com o padrão da chuva, a intensidade, a duração, a distribuição temporal e a distribuição espacial em relação à bacia, etc. são importantes na determinação do hidrograma.

Com relação à evapotranspiração, são importantes fatores tais como a temperatura do ar, ventos, pressão barométrica, radiação solar, umidade relativa, etc. Além destas variáveis, é claro que a evapotranspiração vai também estar muito relacionada com a cobertura vegetal da bacia hidrográfica.

**Fisiografia:** as características físicas da bacia hidrográfica influenciam a formação do deflúvio de várias maneiras.

A declividade influencia os processos de infiltração, fluxo de água no solo, escoamento superficial e na velocidade de escoamento superficial. (BELTRAME, 1994).

A altitude é outra característica importante a considerar. Em geral, em maiores altitudes a precipitação média anual é maior, assim como são menores a temperatura e a evapotranspiração.

Um coeficiente interessante de incluir no estudo do potencial de escoamento em bacias hidrográficas é a densidade de drenagem, que relaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia. A relação foi definida por Horton (1945), citado por Christofoletti (1980) e expressa pela equação:

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad (1)$$

Na equação 1,  $Dd$  é densidade de drenagem,  $Lt$  o comprimento total dos canais e  $A$  a área da bacia.

Os coeficientes morfométricos fluviais, utilizados no estudo das bacias hidrográficas (como declividade, curva hipsográfica, altitude média, coeficiente de massividade, coeficiente orográfico e densidade de drenagem), são apenas instrumentos auxiliares na avaliação preliminar dos recursos hídricos, e não devem ser considerados como elementos finais.

**Uso do solo:** a cobertura vegetal, pela sua influência sobre processos hidrológicos tais como interceptação, transpiração, infiltração, percolação, etc., constitui-se num dos fatores mais importantes que afetam a produção de água em microbacias.

## 2.2.Hidrologia de regiões semiáridas

Para o Brasil, que possui uma disponibilidade hídrica superficial estimada em 8.160 km<sup>3</sup>/ano, equivalente a cerca de 18% do total do globo terrestre, o conhecimento quantitativo

e qualitativo desse recurso natural de inestimável valor social, econômico e ambiental torna-se fundamental para o desenvolvimento do país (CARVALHO, 2000).

O Nordeste brasileiro é um ambiente semiárido caracterizado por contexto ecológico frágil com alta variabilidade espacial e temporal das chuvas, elevados índices de evaporação, histórico de anos consecutivos secos e grandes enchentes (COSTA, 2007).

Essa região e diversas outras localidades do mundo encontram-se num grupo de regiões que enfrentam profundos problemas relativos à água. São regiões conhecidas pela semi-aridez, pela degradação do solo e marcadas pela grande variabilidade de fatores climáticos, com regime pluviométrico geralmente concentrado (3 a 4 meses) e mal distribuído no espaço. Essas características da distribuição espacial e temporal das chuvas são típicas das regiões semiáridas do planeta (FURTUNATO, 2004).

Com o objetivo de regionalizar os parâmetros hidrológicos, em vários lugares no mundo, existem bacias experimentais onde estudos hidrológicos vêm sendo realizados, e seus resultados estão sendo utilizados para manejo de bacias hidrográficas.

As bacias experimentais e representativas foram difundidas na região do semiárido do Nordeste do Brasil na década de 70 do século passado pela SUDENE.

O projeto FINEP/IBESA implantou uma rede de monitoramento hidro sedimentológica no Nordeste brasileiro, em parceria com as universidades, são as bacias experimentais de: Aiuaba - CE; Riacho da Gameleira - PE; Riacho Jatobá - PE; Rio Cedro - BA; Rio Guaraira - PB; São João do Cariri - PB; Serra Negra do Norte - RN.

Como os processos hidrológicos dependem da prática local de manejo de bacias e também dos aspectos hidrológicos, sócio-econômicos e ambientais, precisa-se implantar cada vez mais bacias experimentais/representativas, pois concebem uma rápida interação com o meio garantindo boa estimativa da disponibilidade hídrica através do monitoramento das variáveis do ciclo hidrológico.

Segundo a SUDENE (1980) *apud* Frischkorn; Araújo; Santiago, (2003), no Nordeste Brasileiro em torno de 78% da chuva corresponde à evapotranspiração real, 13% representam o deflúvio e 9% é percolado. De acordo com Duque (1980) *apud* Costa, (2007) é comum em anos chuvosos que metade da precipitação se concentre em um mês, com eventos isolados e elevada variabilidade espacial.

### 2.3. Modelagem hidrológica

A abstração inicial da precipitação é uma parcela da precipitação total que ocorreu anteriormente à precipitação efetiva, referindo-se àquela quantidade de chuva produzida desde o seu início até que haja início de escoamento superficial na seção de controle. Pode-se dizer que esta parcela infiltrou no solo ou foi retida pela vegetação e obstáculos no terreno (Sheeder et al., 2002). A literatura cita muitos modelos chuva-vazão, desde o primeiro, o Método Racional e passando pelas evoluções que se seguiram com o advento do HU (hidrograma unitário), tais como HU do Soil Conservation Service (SCS), na forma adimensional ou triangular, o HU de Clark, o HU Regionalizado de Redá entre outros. Estes modelos têm em comum o fato de se tornarem mais precisos quando aplicados para bacias de mesmas condições, ou bem semelhantes as que originaram o modelo, portanto apresentam restrições quando aplicados em bacias muito diferentes.

Um modelo matemático é uma representação ou interpretação simplificada da realidade, ou uma interpretação de um fragmento de um sistema, segundo uma estrutura de conceitos mentais ou experimentais (SILVA, 2008). Um dos métodos mais utilizados para estimar o volume de escoamento superficial resultante de um evento de chuva é o método desenvolvido pelo Soil Conservation Service – SCS. De acordo com este método, a lâmina escoada durante uma chuva é dada por:

$$q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)} \text{ quando } P > Ia \text{ e } q = 0 \text{ quando } P \leq Ia \quad (2)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Na Equação 2,  $q$  é a lâmina escoada no evento, ou volume de escoamento do evento dividido pela área da bacia (mm), também chamada “chuva efetiva”;  $P$  é a precipitação durante o evento (mm);  $S$  é o parâmetro que representa a capacidade de armazenamento da bacia;  $CN$  é um parâmetro adimensional (número de curva, ou ‘Curve Number’ em inglês, ver Tabela 2); e  $Ia$  é a lâmina referente às perdas iniciais de água do evento, dada por  $Ia = S/5$ . O parâmetro  $CN$  depende de três fatores: umidade antecedente do solo; tipo de solo e ocupação de solo. Uma vez feita a separação do escoamento, é necessário proceder com a distribuição temporal da vazão, utilizando o Método do Hidrograma Unitário Sintético (HUS). O uso do método SCS em bacias hidrográficas no Brasil é comum, porém sua precisão pode ser questionável, em especial para bacias com escoamento efêmero, onde as respostas hidrológicas possuem comportamento diferenciado. (MELLO, 2003).

Tabela 2 - Valores médios do parâmetro número de curva (CN) para bacias hidrográficas rurais (Tucci, 2000).

Uso da terra	Superfície	Tipo de Solo			
		A	B	C	D
<b>Solo Lavrado</b>	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras	70	80	87	90
<b>Plantações regulares</b>	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceamento em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
<b>Pastagens</b>	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	99
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
<b>Campos permanentes</b>	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densos, de alta transpiração	25	55	70	77
<b>Florestas</b>	Muito esparsas, de baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, de alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

#### 2.4. Processos que interferem no início do escoamento

Características físicas do solo, como textura, declividade e profundidade efetiva, influem muito na capacidade de infiltração e, conseqüentemente, no escoamento da água da chuva (BELTRAME, 1994). De acordo com Horton, quando a intensidade da chuva ( $i$ ) é menor que a capacidade de infiltração do solo ( $f$ ) toda a água é absorvida pelo solo e não há escoamento superficial, caso contrário o escoamento superficial (hortoniano) ocorre a uma taxa de  $(i - f)$ . A contribuição do escoamento superficial cresce com o tempo até atingir um valor sensivelmente constante à medida que a precipitação prossegue. Cessada esta, ele vai diminuindo até anular-se.

Segundo Reichardt (1987), quando a água de precipitação não se infiltra totalmente no solo, o excesso escoar pela superfície, indo depositar-se em depressões, ou, quando se trata de declividade acentuada, saindo da área de interesse. Portanto, a água que não se infiltra escorre e forma a enxurrada, processo denominado de escoamento superficial ou *run-off*. O autor ressalta que são muitos os fatores que afetam o processo de escoamento superficial, sendo os principais: a declividade do terreno e as características de infiltração do solo.

De acordo com Braga Jr. e Conejo (1983) *apud* Aguiar (2006), o estudo do escoamento superficial não deve se visto de maneira isolada, e sim com clara compreensão de que os dois processos (infiltração, escoamento) ocorrem simultaneamente. Essa interação se

faz presente na variação das taxas de infiltração, que possibilita a ocorrência de escoamento superficial quando as taxas de infiltração são pequenas e inibe o escoamento quando as taxas de infiltração são altas. Alguns fatores influenciam significativamente a velocidade do escoamento superficial, tais como: declividades moderadas e vegetação densa, o que permite que a água nesse trajeto se infiltre.

Segundo Vilella e Mattos (1975), é fundamental que se conheçam a precipitação e o escoamento superficial em uma bacia porque, dessa maneira, é possível calcular, por diferença, sua capacidade de infiltração. Esta capacidade englobará também toda a interceptação e armazenagem nas depressões. A maioria dos autores ressalta que o fato de a capacidade de infiltração englobar a interceptação e o armazenamento nas depressões, não compromete a solução de problemas de um projeto, pois, em geral, o que se pretende é conhecer o escoamento superficial resultante de certa precipitação, conhecida a capacidade de infiltração.

Tucci (2000) afirma que o escoamento superficial é a parcela do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida; quando a bacia é rural e possui cobertura vegetal, o escoamento sofre interferência dessa cobertura e grande parte dele se infiltra. Quando se trata de bacias urbanas, o escoamento sofre ação antropogênica que pode resultar em superfícies impermeáveis e sistemas de esgotos pluviais.

Para Reis (2009), diversos são os fatores que influenciam o escoamento superficial, dentre os quais podem-se destacar os de natureza climática e fisiográfica. Dentre os fatores de natureza climática, destacam-se a intensidade, a duração da chuva e a precipitação antecedente, ou seja, a condição de umidificação da bacia. Como fatores de natureza fisiográfica, ou seja, mais ligados às características físicas da bacia, pode-se apontar a área da bacia de contribuição; a conformação topográfica da bacia (declividades, depressões acumuladoras e retentoras de água, forma da bacia), condições da superfície do solo e constituição geológica do sub-solo (existência de vegetação, florestas, capacidade de infiltração, permeabilidade do solo, natureza e disposição das camadas geológicas) e as obras de controle e utilização da água à montante (irrigação ou drenagem do terreno, canalização ou retificação de cursos d'água, construção de barragens).

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

#### 3.1. Localização

A Bacia Experimental de Aiuaba (BEA, 12 km<sup>2</sup>) tem rede de drenagem composta por riachos intermitentes, com dois riachos principais e está localizada em município homônimo (Figura 1) e faz parte da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, na região do Estado do Ceará denominada *Inhamuns*. Considerando o sistema de coordenadas UTM (Zona 24S, SAD-69 datum), a BEA está entre as coordenadas 9.260.000 m - 9.255.000 m e 355.000 m - 361.000 m (COSTA, 2007).

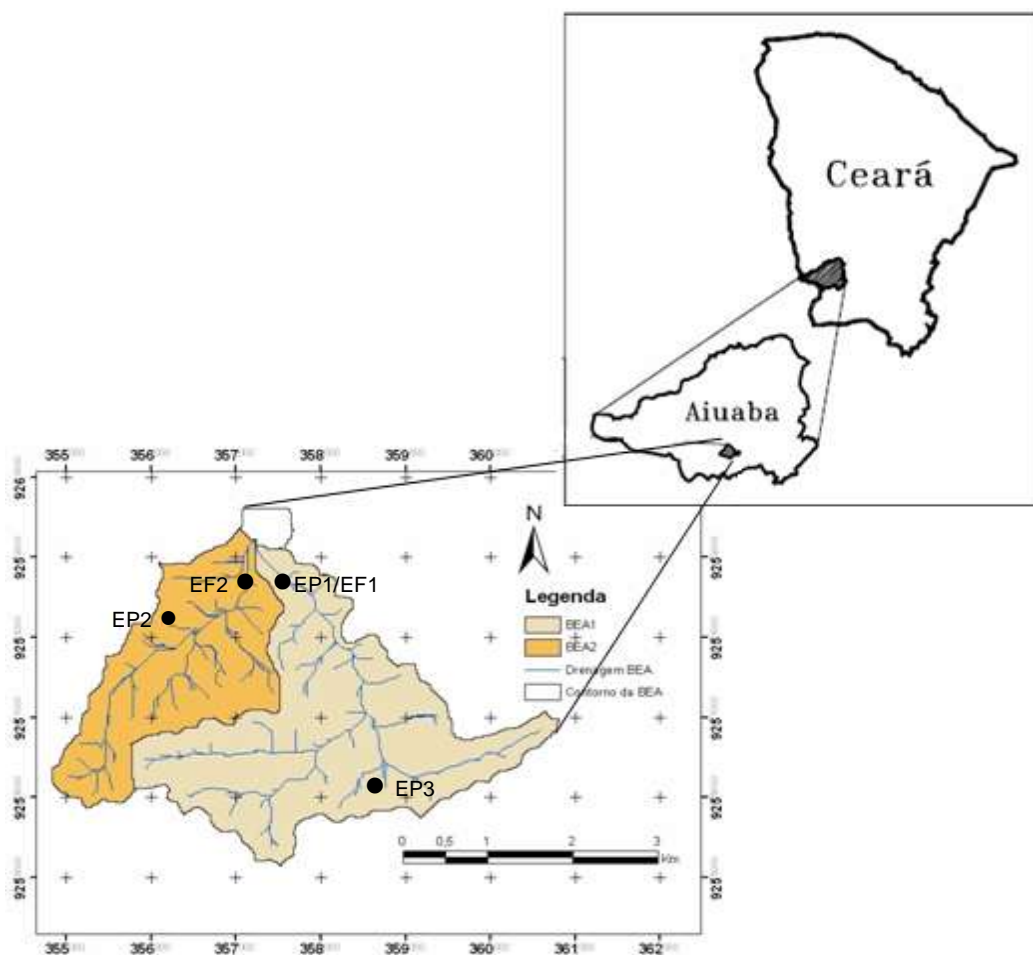


Figura 1 – Localização da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) em relação ao Estado do Ceará e ao município de Aiuaba. Fonte: Farias (2008).

A bacia localiza-se no setor sudoeste da Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba. Estabelecida em 1978, a ESEC de Aiuaba está associada à manutenção da biodiversidade florística e faunística do bioma caatinga e representa um importante papel para o ciclo hidrológico da região devido, principalmente, a sua cobertura florestal densa (ARAÚJO, *et*

al., 2004). Para descrição mais detalhada da ESEC de Aiuaba e de seu entorno, referir-se a (BELO, 2007).

O exutório da bacia é controlado por um pequeno reservatório ou açude, chamado de Boqueirão, com capacidade máxima de 59.700 m<sup>3</sup>, cuja área da bacia hidráulica é 7,12 ha e nível d'água máximo de 4,54 m, sendo o uso d'água basicamente para dessedentação de animais com o valor estimado de 1,0 m<sup>3</sup> por dia (ARAÚJO. *et al.*, 2004).

Foi realizada a divisão da BEA em duas sub-bacias, de modo a verificar as características individuais de cada uma. Na Figura 1 é mostrada a bacia principal (BEA1) que tem as seguintes características: área de 7,70 km<sup>2</sup>; perímetro de 21,93 m; declividade de 15% e 141 cursos d'água, e a bacia secundária (BEA2), com as seguintes características: área de 4,50 km<sup>2</sup>; perímetro de 13,53 m; declividade de 10% e 119 cursos d'água.

A Tabela 3 mostra as características fisiográfica da bacia principal (BEA1) e da bacia secundária (BEA2).

**Tabela 3 – Parâmetros fisiográficos da BEA1 e BEA2**

<b>Elementos da fisiografia</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>BEA1</b>	<b>BEA2</b>	<b>Unidade</b>
Área	Área	7,70	4,50	km <sup>2</sup>
	Perímetro	21,93	13,53	km
Forma Superficial	Coefficiente de Compacidade	2,21	1,80	
	Fator de Forma	0,22	0,21	
Relevo	Declividade média da bacia	15	10	%
	Altitude Máxima	659,03	660,21	m
	Mínima	509,27	509,27	m
	Média	591,20	576,21	m
Rede de Drenagem	Comprimento total dos rios	24,27	20,21	km
	Densidade da rede de drenagem	3,15	3,40	km/km <sup>2</sup>
	Extensão média do escoamento superficial	0,33	0,24	km
	Comprimento do rio principal	5,84	4,60	km
	Declividade média dos rios	2,50	3,28	%

A BEA tem sido monitorada desde janeiro de 2003 pelo HIDROSED - Grupo de Pesquisa Hidrosedimentológicas do Semiárido ([www.hidrosed.ufc.br](http://www.hidrosed.ufc.br)). Neste período vários trabalhos foram realizados. Têm sido realizadas medições e análises de variáveis hidrológicas (e.g. precipitação, evaporação e escoamento superficial), além de estudo de perdas por interceptação em um sítio experimental (MEDEIROS, 2005; MEDEIROS; ARAÚJO, 2005) e

estudos hidrogeológicos e sedimentológicos (COSTA, 2007; FARIAS 2008; WIEGAND et al., 2008; LOPES *et al.* (2010a); PINHEIRO, 2010; LIMA, 2010).

### 3.2. Clima e Hidrologia

De acordo com Farias (2008), a região apresenta uma média de precipitação pluviométrica de 570 mm (série histórica de 1970 a 2007, Posto Aiuaba, FUNCEME, 2008). As normais climatológicas de Tauá no período de 1961-1990 indicam temperatura média anual de 26,6°C; temperatura máxima média anual de 31,6°C; temperatura mínima média anual de 21°C; umidade relativa do ar média anual de 61,6%; insolação média anual de 2.540 horas (DNMET, 1992 *apud* COSTA, 2007).

### 3.3. Topografia

De acordo com Farias (2008) a área apresenta um relevo composto por serras baixas, apresentando um relevo acidentado em certos trechos e suavemente acidentado ou aplainado em outros (Figura 2). Com cotas altimétricas variam de 530 m a 660 m. É uma bacia de drenagem de 5ª ordem e alta densidade de drenagem (4,4 km/km), com tempo de concentração de 1,1 h, obtido pelo método de Kirpich. A declividade média da BEA é de 17%, (COSTA, 2007, FARIAS, 2008 e WIEGAND *et al.* 2009).



**Figura 2 – Foto da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), porção sudoeste, mostrando a topografia da área.**



### 3.4. Geologia

Geologicamente, a área está caracterizada da seguinte maneira: no extremo sul da BEA ocorrem gnaisses acinzentados de textura fina a média contendo megacristais de feldspato (FARIAS, 2008); nas porções central e norte da BEA ocorrem rochas metassedimentares, as quais constituem o prolongamento para oeste da Faixa Orós constituída, sobretudo, por metapelitos (filitos e xistos aluminosos), com intercalações de quartzito e mármore dolomíticos, sendo renomeada recentemente como Formação Santarém (CPRM, 2003 *apud* VERÍSSIMO, 2007); os quartzitos ocorrem ao longo de uma faixa aproximadamente E-W, na porção central da área sustentando uma serra, a qual se destaca na topografia local e constitui importante divisor de setores estruturais da bacia. (FARIAS, 2008). Na Figura 2 é mostrado o mapa geológico da BEA.

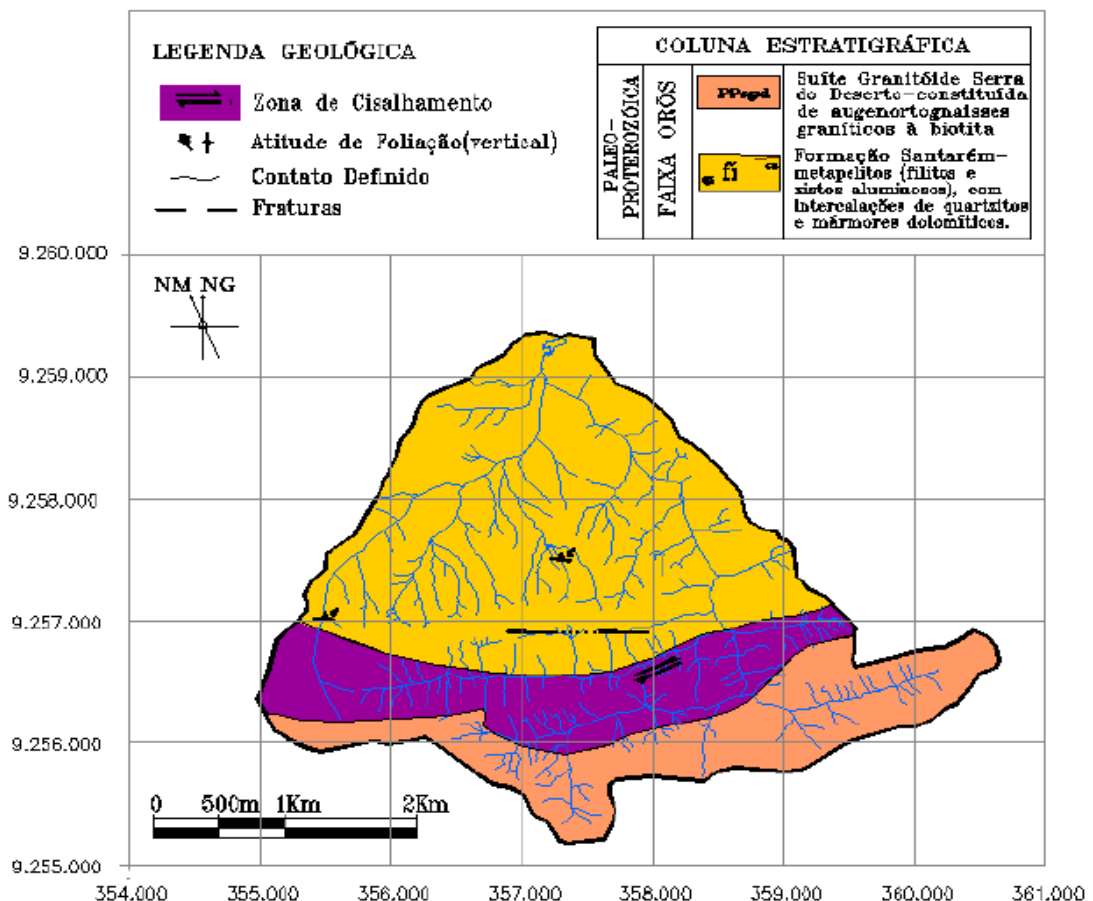


Figura 3 – Mapa de geologia da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Farias (2008) adaptado de Araújo, L. (2005).

### 3.5. Pedologia

Os principais tipos de solos da BEA: Podzólico vermelho-amarelo, Planossolo solódico e Bruno não cálcico, segundo mapa de solos elaborado por (CREUTZFELDT, 2006).

Os solos brunos não cálcicos são solos moderadamente profundos a rasos, tendo, de modo geral, seqüência de horizontes A, Bt e C, e a sua ocorrência na área está sempre aliada à presença de pedregosidade superficial, constituída por calhaus e até matacões, que caracterizam um pavimento desértico e encontram-se associados com solos litólicos e afloramentos de rocha. (ARAÚJO, L., 2005).

Os planossolos solódicos são solos moderadamente profundos a rasos também, mas raramente profundos, tendo, de modo geral, seqüência de horizontes A, Bt e C; e os podzólicos vermelho-amarelos rasos, caso da BEA, possuem profundidade não superior a 60 cm com seqüência de horizontes também A, Bt e C (ARAÚJO, L., 2005).

A Figura 4 apresenta o mapa de solos da BEA.

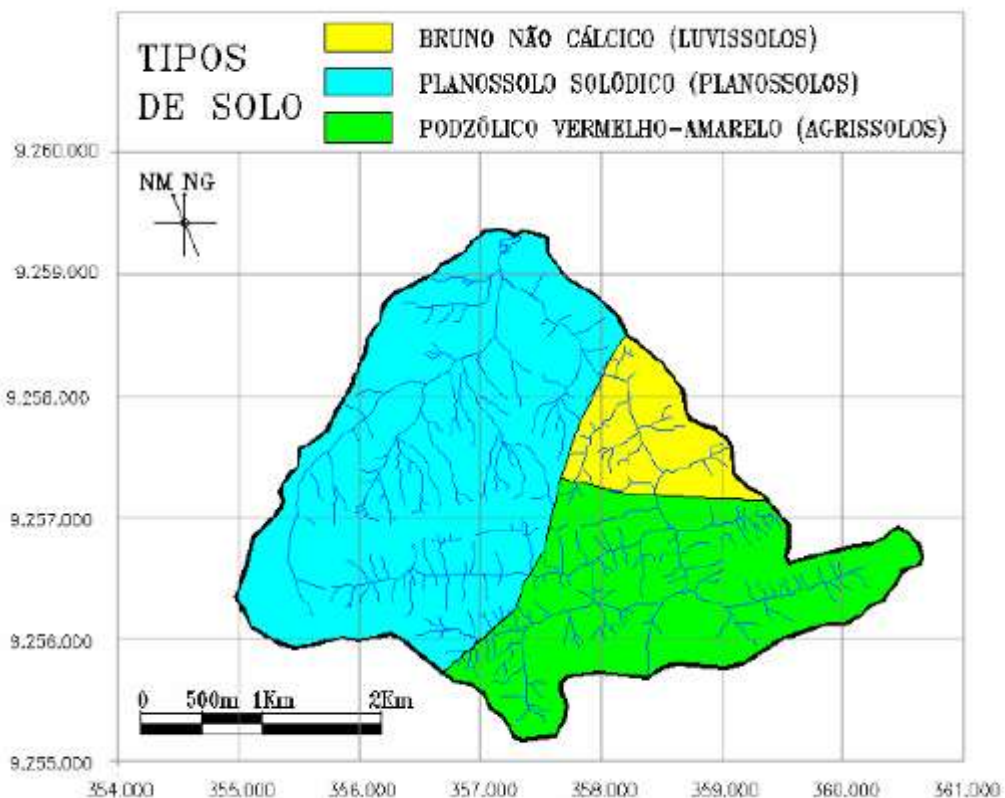


Figura 4 - Mapa se solos da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Farias (2008) adaptado de Creutzfeldt (2006).

### 3.6. Vegetação

Considerando que a BEA está totalmente inserida na Estação Ecológica de Aiuaba, não sofre influência antrópica, que proporciona alto nível de preservação. Portanto, pode apresentar as mesmas características de vegetação, que segundo Oliveira et al (1983) *apud* Medeiros (2004), considerando a flora, a fisionomia e a altura aproximada do estrato arbóreo, foram identificados cinco tipos vegetacionais dentro da Estação Ecológica de Aiuaba:

- **Carrasco** – Vegetação representada por um estrato arbóreo denso, com plantas de aproximadamente 6 m de altura, sendo que algumas árvores podem chegar a 8 m. O estrato herbáceo é praticamente ausente.
- **Caatinga arbórea densa na superfície dissecada** – Vegetação densa, apresentando estrato arbóreo com altura entre 10 a 12 m, podendo algumas árvores chegar a 15 m de altura. O estrato herbáceo é praticamente ausente.
- **Caatinga arbórea densa encarrascada na superfície dissecada** – Vegetação com estrato arbóreo complexo, com um primeiro nível denso e mais baixo (6 a 8 m de altura), e um segundo nível com árvores que chegam a 15 m de altura, esparsamente distribuídas entre as árvores do primeiro nível.
- **Caatinga arbórea densa na superfície conservada** – Apresenta estrato arbóreo denso, com plantas cuja altura varia entre 10 a 12 m, algumas podendo atingir 17 m. O estrato herbáceo é ausente.
- **Complexo caatinga arbustivo-arbórea na superfície conservada** – Floristicamente, é semelhante à caatinga arbórea densa na superfície conservada, da qual difere por apresentar muitos indivíduos de Alecrim ou Carquejo (*Calliandra depauperata* Benth.), que formam um estrato arbustivo contínuo, com alturas entre 0,75 e 1m. As mesmas espécies arbóreas (com alturas que variam de 6 a 8 m) da “Caatinga arbórea densa na superfície conservada” que apresentam ramos retorcidos, encontram-se espalhadas neste estrato arbustivo.

Também deve ser levado em consideração as **clareiras**, que são espaços abertos na caatinga, que pode ser natural ou de origem antrópica, remanescente da antiga exploração agrícola, Figura 05.



Clareiras geradas em consequência de antigos cultivos agrícolas



Clareiras em solo muito raso <30 cm

**Figura 5 – Exemplos de Clareiras na BEA**

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Após a análise da literatura, foram coletados dados de chuva e vazão em campo. Os novos dados, coletados em 2009 e 2010, foram sistematizados e agrupados com os dados anteriormente coletados (2003 a 2008), gerando uma série de oito anos (2003 a 2010). No entanto, os dados de 2003 (primeiro ano de monitoramento da BEA) sofreram diversas interrupções, características da implantação de uma nova infraestrutura hidrométrica, prejudicando algumas análises. Por outro lado, o ano de 2004 foi o mais chuvoso da década, com período de retorno estimado em 25 anos na bacia do Alto Jaguaribe (Lima Neto et al., 2011). Nesse ano, o açude Boqueirão (exutório da BEA) verteu continuamente por um período de mais de dois meses. Como esta pesquisa destina-se a investigar o início do escoamento na bacia, os dados de 2004 tampouco foram considerados. Assim, foram analisados todos os eventos chuvosos, dos seis anos de interesse (2005 a 2010), cuja precipitação superou 10mm. Após a identificação desses eventos, foi realizada busca de critérios que explicassem, o mais eficientemente possível, as condições hidrológicas para o início do escoamento. A seguir foram avaliadas as condições de abstração inicial da BEA. Por fim, foram comparados os hidrogramas medidos simultaneamente nas estações fluviométricas EF1 e EF2, ambas localizadas na Bacia Experimental de Aiuaba.

Para realização desta pesquisa foram estudados e analisados, além de textos de livros e periódicos da hidrologia nacional e internacional, trabalhos anteriormente realizados na BEA, entre eles Araújo *et al.* (2004), Araújo L. C. (2005), Medeiros (2005), Medeiros e Araújo (2005), Costa (2007), Farias (2008), Medeiros (2009), Lopes *et al.* (2010a), Lopes *et al.* (2010b), Lima (2010), Lima e Araújo (2010).

### 4.1. Hidrometria da Bacia Experimental

#### Monitoramento da precipitação e da umidade do solo

Para o monitoramento hidrológico, foram instaladas, estrategicamente posicionadas, três estações pluviométricas equipadas também com sensores de umidade: EP1, EP2 e EP3 (ver Figura 1). Os instrumentos foram posicionados de forma a representar as características topográficas da bacia experimental. Assim, um posto foi localizado próximo ao exutório da bacia (EP1), onde se verificam as cotas altimétricas mais baixas (próxima da estação fluviométrica EF1); outra (EP2) localiza-se em cotas altimétricas intermediárias, às margens

da Estrada CE – 187, próxima à estação fluviométrica EF2. A terceira (EP3) localiza-se na parte mais elevada da bacia, próxima ao distrito de Cedro (município de Aiuaba).

As três estações vêm monitorando continuamente a chuva e a umidade do solo desde o ano de 2003. A chuva é monitorada através de pluviômetros de báscula com resolução de 0,254 mm; módulo de memória CR510 da Campbell, com 128 kB de memória; bateria recarregável com regulador de suporte e cabo (PS 12LA); painel solar de 10 Watts (MSX 10) e kit de aterramento do sistema de coleta de dados. A chuva é registrada a cada 5min quando há registro, e a cada 6h quando não ocorre precipitação.

Os sensores de umidade de solo são do tipo TDR, instalados a uma profundidade de 15 cm, enviando seus dados para o mesmo módulo de memória dos pluviômetros de báscula. A curva de calibração dos sensores foi gerada por Lopes *et al.* (2010a) através de experimentos *in situ*. A curva foi, então, utilizada retroativamente para o cálculo da umidade do solo no período de interesse desta pesquisa (2005 a 2010). Os valores de umidade são medidos em intervalos horários.

### **Monitoramento de vazão**

A BEA também está equipada com duas estações fluviométricas: EF1 e EF2 (ver Figura 1). A estação EF1 foi instalada em janeiro de 2003, sendo do tipo calha Parshall. A área da bacia controlada pela estação EF1 é de 7,7km<sup>2</sup>. A calha possui capacidade de medição de 3 a 456 L/s, com as seguintes dimensões básicas: largura do estrangulamento de 0,3048 m, elevação de 0,914 m e comprimento total de 3,25 m. Os registros são feitos com resolução de 1cm por um linígrafo da HIDROMEC, equipado com um sensor de nível, bateria recarregável e painel solar de 10 Watts. As visitas às estações fluviométricas foram realizadas a cada 20 dias no período chuvoso (dezembro a maio), e a cada 45 dias no período seco. Nessas visitas, foram verificadas as condições de operação do aparelho e, quando necessárias, capina e limpeza do terreno; é observada a existência de carga na bateria; a troca de elementos quando necessária e a descarga (*download*) dos dados (Figura 6) com auxílio do computador, usando o programa Linígrafo Flex (Figura 7). O monitoramento foi programado na estação para intervalos de 15 minutos.



Figura 6 – Estação Fluviométrica 1 (EF1), mostrando a calha Parshall e a coleta de dados para notebook.

MEDIDA	DATA	HORA	NÍVEL (m)	PRECIPITAÇÃO (mm de chuva)	ACUMULADO (mm de chuva)	IMPLÍCITA
53882	01/01/10	00:14	0,38	0,0	0,0	X
53883	01/01/10	00:15	0,38	0,0	0,0	
53884	01/01/10	00:16	0,38	0,0	0,0	X
53885	01/01/10	00:17	0,38	0,0	0,0	X
53886	01/01/10	00:18	0,38	0,0	0,0	X
53887	01/01/10	00:19	0,38	0,0	0,0	X
53888	01/01/10	00:20	0,38	0,0	0,0	X

Escala do eixo de nível: 0,01 a 1,48  
 Escala do eixo de precipitação: 0,0 a 0,0  
 Escala do eixo de período: 24/11/2009 a 1/1/2010  
 0% ( 01/01/10 ; 0,38 )  
 Usuário: 07/01/2010 - 16:54:18 Total: 53891 Inválidas: 0 Fora de Sequência: 0 Arquivo C:\Do

Figura 7 – Tela do programa Linígrafo Flex, com dados medidos.

A segunda estação (EF2) foi instalada apenas no final do período chuvoso (outubro) de 2007, o que, na prática, corresponde ao início de medições apenas no ano de 2008. A EF2 é do tipo vertedouro triangular de parede delgada e controla uma área de 4,5km<sup>2</sup>. O vertedouro possui capacidade de medição de até 300 L/s, com a seguinte forma: chapas metálicas, com ângulo de 90° e altura 1 m. A lâmina de água é medida por uma sonda instalada aproximadamente 2 metros a montante do vertedouro (Figura 8), e os dados são registrados em um módulo de memória CR510 da Campbell, com 128 kB de memória; bateria recarregável com regulador de suporte e cabo (PS 12LA); painel solar de 10 Watts e kit de aterramento do sistema de coleta de dados. O monitoramento foi programado na estação para intervalos de 15min.



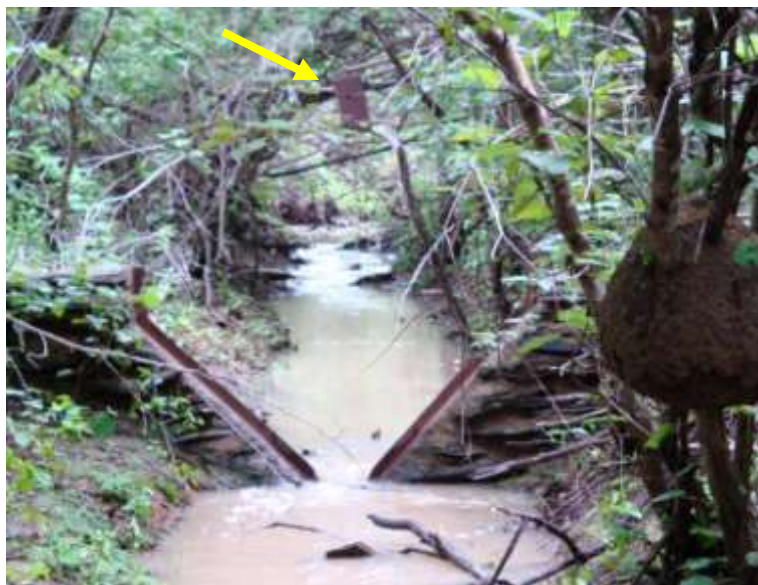


Figura 8 – Estação Fluviométrica 2 (EF2), mostrando a sonda instalada a montante do vertedouro.

Essas estações controlam os dois principais riachos da bacia, sendo suas expressões mostradas abaixo: Equações 4 (CHOW, 1973); e 5 para EF1 e EF2, respectivamente.

$$Q = 4.W_{CP} \cdot H_A^{1,552} W^{0,026} \quad (4)$$

$$Q = 1,4.H^{5/2} \quad (5)$$

Na equação 4, Q é a vazão da calha Parshall em cfs,  $W_{CP}$  a largura do estrangulamento em ft e  $H_A$  a altura da coluna d'água no ponto a montante do estrangulamento, em ft. Na equação 5, Q é a vazão em  $m^3 \cdot s^{-1}$ ; e H é a altura da coluna d'água em metros.

No entanto, as duas estações acima mencionadas, além de não controlarem toda a bacia, apresentaram algumas falhas e apenas dois eventos foram monitorados com êxito simultaneamente por EF1 e EF2. Por essa razão, optou-se, nesse estudo, por utilizar o balanço hídrico do açude Boqueirão para avaliar a ocorrência (ou não) de escoamento na BEA, o que incrementou o número de eventos com medições para quase 14 a cada ano. A seguir são apresentados material e métodos do monitoramento do nível do reservatório.

### Monitoramento do nível do reservatório

No exutório da BEA situa-se o açude Boqueirão, que possui a capacidade máxima de acumulação de  $59.700 m^3$ , Araújo, (2003), cuja relação entre o nível d'água e o volume armazenado é mostrada na Figura 9. O referido açude é monitorado tanto por um conjunto de régua linimétrica, com leituras diárias realizadas por uma pessoa da região; quanto por um linígrafo automático (*Thalimedes* OTT), com medidas a cada hora (Figura 10).



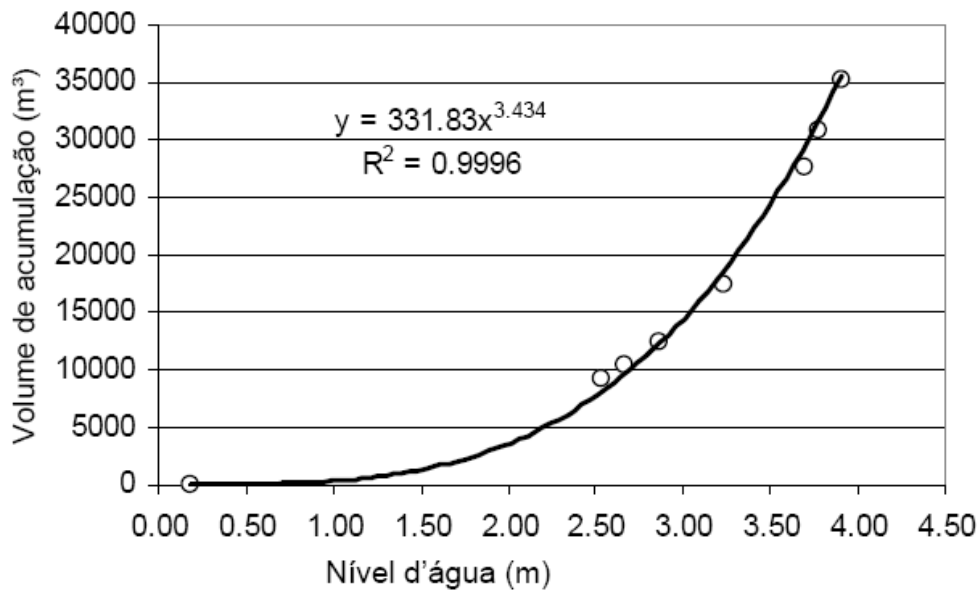


Figura 9 – Relação entre o nível d'água e o volume de acumulação no açude Boqueirão, fonte: ARAÚJO, J. et al., 2004.

O deflúvio afluente à bacia hidráulica da BEA foi estimado aplicando-se a equação do balanço hídrico em reservatórios superficiais, conforme Costa (2007). O autor avalia as trocas hídricas no exutório da BEA com base em (MOLLE, 1989; CAMPOS, 1996; VALLET-COULOMB et al., 2001; MOTZ; SOUZA; ANNABLE, 2001; ARAÚJO, J. et al., 2004a).

Com base na equação 6 é possível estimar a vazão afluente ao reservatório.

$$\overline{Qa} = (\Delta H - P1 - Rs + Eo + I + U + \overline{Qs} / \overline{A}) \cdot \overline{A} \quad (6)$$

Sendo  $\overline{Qa}$  é o deflúvio afluente médio (l/s),  $\Delta H$  a diferença da lâmina d'água (mm/s) medida na estação limnimétrica, P1 a precipitação direta sobre o lago medida (mm/s) na EP1, Rs a recarga subterrânea (mm/s), Eo a evaporação (mm/s), I a infiltração (mm/s), U o uso d'água (mm/s) estimado por Araújo, *et al.* (2004), Qs a vazão de sangria (l/s) e  $\overline{A}$  a área média do espelho d'água (m²), estimada pela relação área inundada *versus* altura do nível d'água (ARAÚJO, *et al.*, 2004).

Como os eventos de chuva-deflúvio são efêmeros e têm em média duração de 7 horas, desconsiderou-se a recarga subterrânea (Rs), a evaporação (Ea) e a infiltração (I). Para o período de estudo não houve sangria da barragem.

Por estar localizado dentro da Estação Ecológica de Aiuaba, o uso da água acumulada no açude é unicamente para dessedentação de animais, sendo a vazão de retirada estimada em apenas 1,0m³ por dia (ARAÚJO, *et al.*, 2004), valor considerado desprezível no

balanço hídrico, pois corresponde a menos de 0,03mm diários na média. Quanto à consideração da precipitação direta sobre o lago, Costa (2007), analisando o balanço hídrico desta bacia, entendeu que sua desconsideração acarreta superestimativa sistemática no cálculo do deflúvio afluente.



**Figura 10 – Açude Boqueirão, exutório da BEA, mostrando localização das réguas linimétricas e Linígrafo. Data: 11/4/2010**

#### **Análise da textura e da condutividade hidráulica dos solos**

Para determinação da classe textural do solo, foram coletadas três amostras de solos, sendo uma amostra para cada classe de solo, em profundidade de 0 a 30 cm. O material foi coletado usando picareta (amostra de solo deformada) e acondicionado em sacolas plásticas e devidamente identificados para envio ao laboratório. A análise granulométrica foi realizada no laboratório de solos da UFC, utilizando a norma da ABNT – Solos (Análise Granulométrica) NBR 7181, Dez/1984. As planilhas de análise granulométricas do solo encontram-se no Anexo A, B e C. Para condutividade hidráulica do solo em condições de saturação ( $K_{sat}$ ) foram usados dados fornecidos por Costa (2010). O autor usou permeâmetro compacto de carga constante “*Amoozometer*”, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm em 118 pontos da bacia.

#### **4.2. Separação de eventos**

Uma das dificuldades metodológicas da presente pesquisa foi a escolha de um critério para separação dos eventos chuvosos. Para essa finalidade, foi analisada a Literatura especializada. Istok e Boersma (1986), estudando cinco bacias hidrográficas no oeste do

Oregon, E.U.A. durante quatro anos, usaram como critério de separação de eventos, chuvas medidas em um período consecutivo separadas por seis ou mais horas consecutivas de seca. Grottker, (1988) considerou que a separação de eventos se dará pela presença de, no máximo, 1mm no intervalo de seis horas. Moura (2005), para analisar eventos de chuva em duas bacias hidrográficas no estado da Paraíba, utilizou os seguintes critérios: um evento chuvoso é definido como um evento onde a precipitação é superior a 1 mm, e apresenta seu início ou o seu término separado de mais de 30 min do evento anterior ou do evento posterior, respectivamente. SHI Z. et al., (2009), estudando uma microbacia experimental na área das Três Gargantas, na China, durante um período de seis anos, separaram apenas eventos com precipitação maior que 20 mm e que apresentaram escoamento. Worrall (2007) considerou um evento sempre que a chuva tenha sido precedida e seguida de um período de 1h sem chuva. O autor conclui, no entanto, que esse intervalo (1h) não é suficiente para o Reino Unido.

Para a presente pesquisa, admitiu-se como evento aquele episódio de chuva com precipitação maior ou igual a 10 mm (chuvas inferiores a 10 mm são consideradas desprezíveis na geração de escoamento por todos os autores que, anteriormente, estudaram a hidrologia da BEA) seguido e antecedido por um intervalo de seis horas com precipitações inferiores a 1mm nesse intervalo. Foi registrado um caso em que duas chuvas de mais de 40 mm eram separadas por um intervalo de mais de seis horas, no qual ocorreu uma precipitação inferior a 1 mm. A hipótese de que as duas chuvas corresponderiam a um único evento (posto que houve precipitação, embora mínima, entre os dois núcleos) mostrou-se inconsistente, como será discutido adiante. Por isso foi admitida tolerância de até 1 mm de chuva entre dois eventos.

### **4.3. Análise do início do escoamento em função das variáveis hidrológicas**

Após a coleta e análise de consistência dos dados hidrológicos, foi necessário buscar qual(is) variável(is) explicaria(m) a formação do escoamento superficial na BEA. Em princípio, foram testadas várias combinações de variáveis, dispostas na forma de gráficos. Em cada gráfico havia três categorias de eventos: aqueles que sabidamente não geraram escoamento (representados por bolas pretas), aqueles que sabidamente geraram escoamento (representados por bolas brancas) e aqueles incertos (representados por 'X'). Foram considerados eventos incertos aqueles cujo escoamento calculado foi inferior a 0,1 mm. Isso se justifica por dois aspectos: primeiro a imprecisão das medidas (precisão do linígrafo é de 1-

2 mm e das réguas linimétricas é de 5 mm), pois o balanço hídrico é positivo, porém pequeno, dentro da margem de erro do método. O segundo aspecto é que a precipitação direta no lago (precisão dos pluviômetros é de 0,254 mm) pode ter sido responsável pela recarga do lago sem que tenha havido necessariamente escoamento. Observe-se que a precipitação sobre o lago que compensaria o escoamento de 0,1 mm na bacia hidrográfica seria maior que 40 mm.

Em cada um desses gráficos foram geradas três regiões. A região R-1 corresponde àquela capaz de identificar os eventos pluviométricos maiores que 10 mm que não geraram escoamento. A região R-2 corresponde àquela na qual há uma mistura de eventos que geraram e que não geraram escoamento, portanto, a região cujo critério escolhido não foi capaz de explicar a ocorrência ou não de vazão nos rios. Por fim, a região R-3 corresponde àquela capaz de identificar os eventos pluviométricos que geraram escoamento.

Definiu-se aqui a eficiência ( $\eta$ ) da variável em prever o início do escoamento, como sendo a razão entre o número de pontos das regiões R-1 e R-3 (somados) pelo número total de eventos. O indicador eficiência foi usado para escolher os critérios que melhor explicam o início do escoamento na análise realizada no âmbito da presente pesquisa.

### **Efeito da precipitação total sobre o início do escoamento**

Nesta análise utilizou-se a precipitação total de cada evento na EP1 *versus* a lâmina escoada na BEA, determinada a partir do monitoramento do reservatório com base no balanço hídrico realizado por Costa (2007).

### **Efeito da umidade sobre o início do escoamento superficial**

Primeiro utilizou-se a umidade de cada estação isoladamente (EP1, EP2 ou EP3) ou de modo combinado (EP1+EP2; EP1+EP3; EP2+EP3; ou EP1+EP2+EP3). A escolhida para utilização neste trabalho foi a média das três estações, pois apresentou maior eficiência para as combinações realizadas.

Buscou-se também correlação entre os dados de umidade média do solo uma hora antecedente a cada evento estudado e a ocorrência (ou não) de escoamento, primeiro variando a precipitação e depois a intensidade média da precipitação, seguida das intensidades específicas para as durações de 5, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos.

### **Efeito da distribuição temporal da precipitação sobre o início do escoamento**

Foram analisadas as diversas intensidades: média e para as durações de 5, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos, em função da precipitação, associada a ocorrência (ou não) de escoamento.

Isso possibilitou a avaliação da intensidade que melhor indica a ocorrência do escoamento para a bacia estudada.

#### **4.4. Avaliação das abstrações iniciais**

A BEA enquadra-se como uma floresta esparsa com tipo de solo B, que corresponde a um valor de CN 68 (ver Tabela 2), valor superior ao observado por Costa (2007), que variou de 50 a 60. O valor do CN para a BEA foi determinado em função da umidade antecedente dos 83 eventos chuvosos selecionados, separados a amplitude em três faixas de umidade: baixa, média e alta. Após a classificação e escolhido a faixa média, correspondente ao CN II, dispondo os valores da lâmina escoada em função da precipitação obteve-se o valor da abstração inicial (Ia) ao traçar a envoltória inferior para os dados. Usando a equação 2 determina-se a capacidade de armazenamento do solo (S), necessária na obtenção do CN na equação 3.

#### **4.5. Hidrogramas comparativos das duas microbacias hidrográficas na BEA**

Para as duas microbacias BEA1 (riacho principal) e BEA2 (riacho secundário) monitoradas, os dados de vazão foram correlacionados com o tempo, gerando hidrogramas, no intuito de comparar o volume de água gerado por cada bacia. Sendo que apenas dois eventos foram monitorados simultaneamente para ambas, do dia 21/3/2010 e 11/4/2010. No entanto são apresentados mais três hidrogramas referente aos dias 27/2/2008, 1/4/2008 e 25/1/2010.

Após a coleta e análise de coerência da lâmina escoada na EF1 e EF2, foram usadas as equações 4 e 5 para determinação das vazões instantâneas, para cada vertedouro e disposto no mesmo gráfico, os hidrogramas. Assim é possível que visualmente seja realizada a comparação, pois os dados apresentam-se em mesma escala.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Parâmetros hidrológicos da Bacia Experimental

#### Textura e condutividade dos solos

Tendo em consideração a importância da textura do solo nos processos de infiltração, referida por diversos autores (Ferreira, 1996; Costa, 1999; Casanellas e Reguerín, 2005; Pato, 2007), foi realizada a análise granulométrica nas proximidades da EP1, EP2 e EP3, locais monitorizados dentro da BEA, cujos resultados se apresentam na Figura 11.

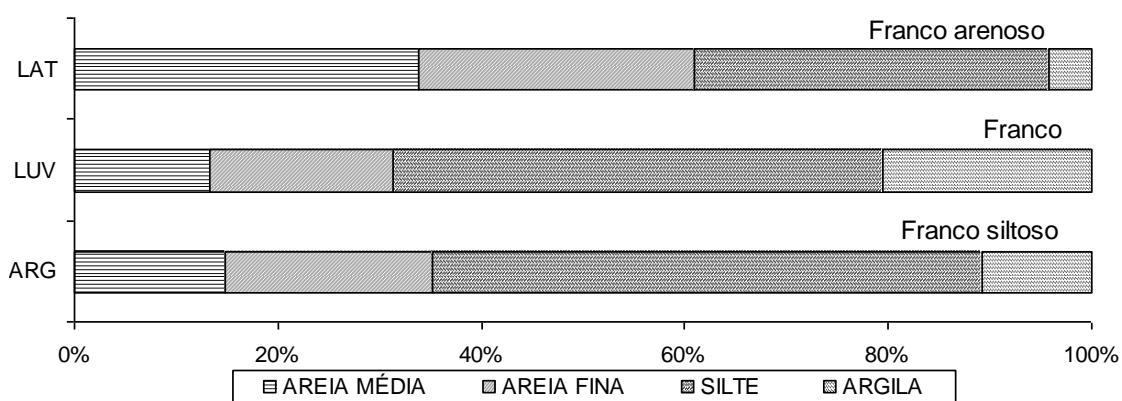


Figura 11 - Classes texturais de solos da BEA. Na figura, ARG= Argissolo, LUV= Luvissolo, LAT= Latossolo.

De um modo geral, observam-se variações em termos de textura dentro da BEA. Contudo, predomina a ocorrência de solo franco com textura moderadamente grossa. Nas proximidades da EP3 (Latossolo), manifesta-se um solo franco arenoso de textura fina. Já na área próxima à EP2 (Luvissolo) exhibe solo franco, mas de textura moderadamente fina. Na EP1 (Argissolo) é uma média das anteriores.

Segundo Casanellas e Reguerín (2005), solos arenosos como o LAT da (EP3) apresentam um baixo potencial para geração de escoamento e estão associados à elevada condutividade hidráulica. Os solos mais argilosos como o ARG da (EP1), pelo contrário, estão associados a valores de escoamentos médio a alto com baixa condutividade hidráulica.

Costa (2010), medindo a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) da BEA, encontrou: mediana de 9 mm/h e média de 25 mm/h com coeficiente de variação de 2,4.

## Monitoramento do nível do reservatório

O deflúvio afluente à bacia hidráulica da BEA pode ser estimado aplicando-se a equação do balanço hídrico em reservatórios superficiais, em que se avaliam as trocas hídricas no exutório (COSTA, 2007).

Na Figura 12, foi analisado o nível máximo do reservatório para o final do período chuvoso (maio), e o nível mínimo para o final do período seco (novembro). Com isso podemos observar que diante da série é possível ter uma previsão ao final do período chuvoso da necessidade de uma fonte alternativa de água.

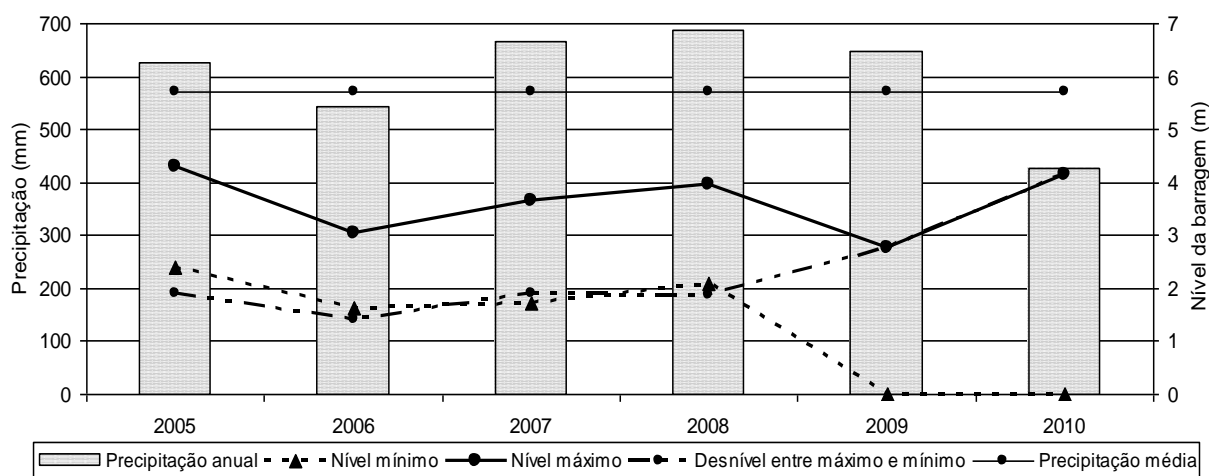


Figura 12 – Nível máximo e mínimo no reservatório Boqueirão e precipitação média anual na BEA.

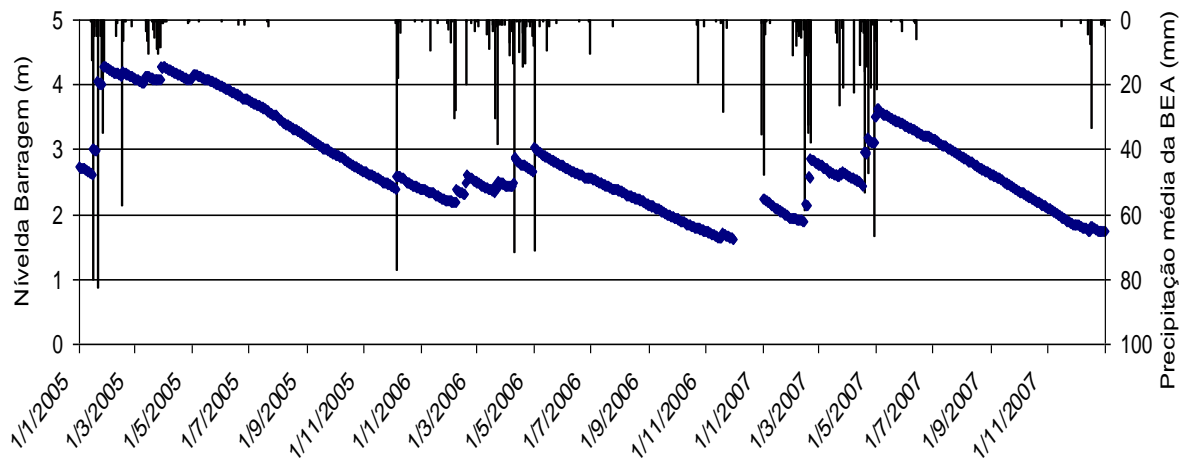
Percebe-se que nos anos 2009 e 2010 o reservatório esvaziou-se, sendo o uso d'água basicamente para dessedentação de animais com o valor estimado de  $1,0 \text{ m}^3$  por dia (ARAÚJO, J. et al., 2004a). A recarga do açude Boqueirão pode ocorrer mesmo quando a precipitação média anual estiver abaixo da média histórica para a região, a recarga acontece em eventos específicos (*flash flood*). Isso pode ser constatado observando-se o ano de 2010, no qual a precipitação anual ficou bem abaixo da média, mas o nível máximo do reservatório ficou alto.

É importante registrar que uma nova estimativa de consumo de água pelos animais no reservatório foi realizada, no momento que percebeu-se o aumento do rebanho de animais na área. Com base em uma aproximação feita com uma pessoa do local, o consumo de água para dessedentação animal para o ano de 2010 foi de  $13,00 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

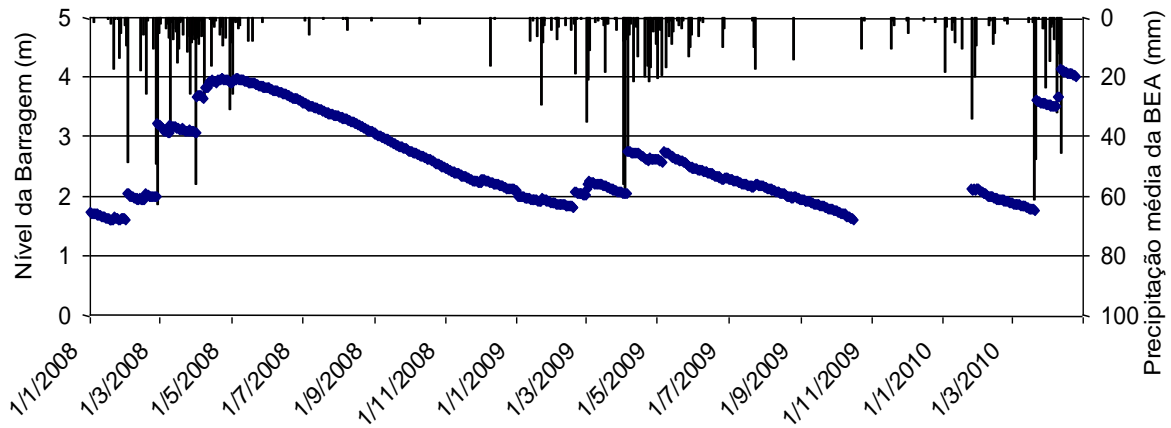
Nas Figuras 13 e 14 é apresentado o monitoramento da precipitação diária da BEA e do nível da água no reservatório que controla a bacia. É possível perceber que as recargas acontecem de modo instantâneo, evidenciando eventos chuva-deflúvio intensos (*flash flood*).

Os eventos de escoamento duram poucas horas. Foi possível perceber através de observações que para alguns eventos existe escoamento próximo a EP3, mas este não chega a atingir a EF1.

No período monitorado 2005-2010, não ocorreu sangria da barragem e nos anos 2009 e 2010 se esvaziou completamente (lembrar que o monitoramento é realizado a partir do nível 1,6 metros, abaixo desta cota não tem monitoramento, entretanto pelas observações de campo em 2009 e 2010 o nível atingiu o valor zero).



**Figura 13 – Nível da água no reservatório Boqueirão e precipitação média na bacia do período 1/1/2005 a 31/12/2007. Observe que o nível mínimo da régua é 1,60m (1670m<sup>3</sup>), abaixo do qual não é possível medir.**



**Figura 14 – Nível da água no reservatório Boqueirão e precipitação média na bacia do período 1/1/2008 a 30/4/2010. Observe que o nível mínimo da régua é 1,60m (1670m<sup>3</sup>), abaixo do qual não é possível medir.**

## 5.2. Efeito da precipitação total sobre o início do escoamento superficial

No período de observação, de 01 de janeiro de 2005 até 30 de abril de 2010, 83 eventos chuvosos com mais de 10 mm/evento foram observados na Bacia Experimental de Aiuaba. Os eventos foram medidos na EP1 e ocorreram em 80 dias como mostrado na Tabela



4, com totais precipitados variando de 10,37 mm para o menor evento até 111,67 mm para o maior evento. Em 57% dos eventos observados houve vazão afluente à Barragem. O evento observado que apresentou a maior duração de precipitação (27 horas), ocorreu entre os dias 01 e 02 de fevereiro de 2010 com total precipitado de 40,13 mm. A maior intensidade em cinco minutos ( $I_5$ ) observada neste período foi de 170,70 mm/h, em um evento chuvoso que durou apenas 2 horas e 50 minutos com total precipitado de 82,77 mm no dia 20/01/2005. Este evento foi também o que apresentou a maior lâmina escoada: 2,16 mm.

**Tabela 4 – Dados dos 83 eventos chuvosos selecionados para estudo na BEA. (P – Precipitação em mm; ESC – Escoamento em mm; CR – Coeficiente de Runoff).**

Nº	Data	P (mm)	ESC (mm)	CR (%)	Nº	Data	P (mm)	ESC (mm)	CR (%)
1	15/1/2005	92,65	0,45	0,48	43	9/3/2008	42,63	0,19	0,45
2	20/1/2005	82,77	2,16	2,61	44	15/3/2008	14,73	0,00	0,00
3	24/1/2005	18,26	0,05	0,30	45	16/3/2008	10,62	0,00	0,00
4	26/1/2005	49,70	0,80	1,61	46	26/3/2008	25,34	0,04	0,17
5	15/2/2005	57,32	0,18	0,31	47	1/4/2008	56,38	1,11	1,98
6	15/3/2005	10,37	0,03	0,28	48	7/4/2008	26,90	0,64	2,37
7	25/3/2005	10,40	0,03	0,27	49	14/4/2008	12,17	0,13	1,05
8	5/12/2005	77,79	0,16	0,21	50	29/4/2008	13,20	0,00	0,00
9	7/12/2005	17,70	0,00	0,00	51	30/4/2008	24,60	0,00	0,00
10	5/2/2006	30,32	0,00	0,00	52	2/5/2008	25,64	0,16	0,61
11	6/2/2006	22,81	0,14	0,60	53	8/12/2008	16,26	0,00	0,00
12	18/2/2006	20,05	0,10	0,49	54	21/1/2009	29,72	0,03	0,00
13	20/3/2006	30,42	0,06	0,20	55	19/2/2009	18,80	0,12	0,61
14	23/3/2006	38,86	0,08	0,21	56	2/3/2009	40,13	0,10	0,25
15	5/4/2006	10,92	0,01	0,00	57	3/3/2009	18,55	0,03	0,17
16	9/4/2006	16,74	0,03	0,20	58	18/3/2009	20,83	0,00	0,00
17	9/4/2006	55,12	0,40	0,72	59	2/4/2009	16,51	0,00	0,00
18	19/4/2006	17,96	0,00	0,00	60	2/4/2009	47,50	0,00	0,00
19	21/4/2006	10,62	0,00	0,00	61	3/4/2009	36,32	0,00	0,00
20	1/5/2006	79,10	0,45	0,57	62	4/4/2009	30,23	0,00	0,00
21	23/10/2006	11,90	0,00	0,00	63	6/4/2009	44,95	0,56	1,24
22	18/11/2006	28,40	0,03	0,00	64	10/4/2009	21,59	0,00	0,00
23	1/2/2007	10,89	0,00	0,00	65	13/4/2009	12,70	0,00	0,00
24	14/2/2007	58,64	0,14	0,24	66	20/4/2009	20,07	0,00	0,00
25	16/2/2007	11,16	0,00	0,00	67	22/4/2009	12,19	0,00	0,00
26	18/2/2007	67,47	0,26	0,39	68	23/4/2009	25,15	0,03	0,12
27	20/2/2007	47,41	0,34	0,72	69	25/4/2009	16,76	0,00	0,00
28	23/3/2007	26,40	0,01	0,00	70	1/5/2009	20,57	0,00	0,00
29	7/4/2007	26,40	0,00	0,00	71	4/5/2009	19,30	0,17	0,88
30	14/4/2007	13,71	0,00	0,00	72	9/5/2009	17,02	0,00	0,00
31	18/4/2007	53,53	0,43	0,80	73	27/5/2009	13,46	0,00	0,00
32	19/4/2007	15,74	0,13	0,84	74	30/5/2009	16,00	0,00	0,00
33	22/4/2007	61,38	0,31	0,51	75	2/1/2010	18,29	0,00	0,00
34	25/4/2007	21,06	0,00	0,00	76	17/1/2010	10,41	0,00	0,00
35	29/4/2007	67,69	0,79	1,17	77	25/1/2010	34,04	0,35	1,04
36	2/5/2007	20,30	0,21	1,01	78	27/1/2010	20,07	0,00	0,00

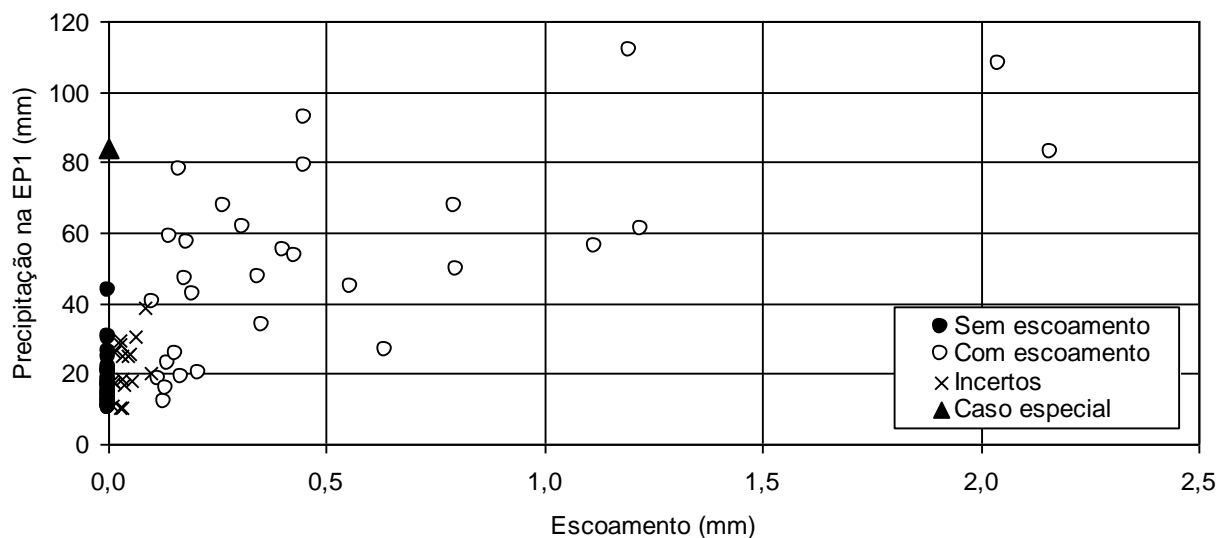
37	20/1/2008	17,26	0,01	0,00	79	21/3/2010	108,20	2,04	1,89
38	25/1/2008	12,17	0,00	0,00	80	29/3/2010	14,22	0,00	0,00
39	1/2/2008	46,93	0,18	0,37	81	2/4/2010	14,73	0,00	0,00
40	12/2/2008	17,74	0,01	0,00	82	9/4/2010	43,68	0,00	0,00
41	17/2/2008	25,89	0,05	0,19	83	11/4/2010	61,21	1,22	1,99
42	27/2/2008	111,67	1,19	1,07					

Esses eventos de chuvas produziram o total de água escoado superficialmente equivalente a 16,14 mm, enquanto o somatório das precipitações responsáveis por esse escoamento foi de 2.615 mm para um total precipitado (média para as EP1, EP2 e EP3), no período, de 3.600 mm. Esta diferença ocorre pelo fato de não estar sendo contabilizado precipitação menor que 10 mm e também foram selecionados eventos somente da EP1.

O coeficiente de escoamento superficial (CR), razão entre a lâmina escoada e a respectiva precipitação, foi calculado para os 47 eventos com escoamento selecionados no período de 2005 a 2010. Não foi considerado o ano 2004 por ser atípico (para maiores detalhes reportar a Costa (2007)). O maior coeficiente de runoff foi de 2,61%, Tabela 4, sendo o valor médio de 0,77% considerando apenas os eventos com escoamento e de 0,62% considerando os todos eventos com precipitação maior que 10 mm. Esses valores são compatíveis com os apresentados por Costa (2007), que obteve um valor médio de 0,74%, para a mesma bacia. No entanto, quando se divide a lâmina total de escoamento superficial pela precipitação total dos anos hidrológicos estudados, chega-se a um valor médio de 0,45%. Pequenos valores de coeficientes de escoamento superficial em bacias hidrográficas estão associados às características físicas do solo, cobertura deste e indicação de boas condições de infiltração.

### **Caso especial: a chuva de 02 de abril de 2009**

Uma atenção maior foi dada aos eventos de precipitação compreendidos entre os dias 02/04/2009 e 03/04/2009. O critério usado de seis horas absolutamente secas (sem chuva) não separava o referido evento, caracterizando-o como um evento de 83,82 mm, sem escoamento. Isso lançava-o fora de tendência dos demais casos analisados, por isso foi chamado de “caso especial”, que pode ser observado na Figura 15.



**Figura 15 – Relação entre escoamento e precipitação na BEA para os eventos selecionados, sem a separação do evento de 7/4/2009, chamado de “caso especial”.**

Como uma precipitação tão considerável poderia não ter gerado escoamento? Então este evento foi analisado separadamente. Na Figura 16 podemos ver a distribuição deste evento no tempo (duração de 17 horas e 55 min), e percebe-se que existe uma lacuna de seis horas e vinte minutos neste intervalo, iniciando-se às 19 horas e 15 min no dia 2/4/2009. Assim, a referida chuva só não seria separada em dois eventos por dois registros de 0,254 mm (correspondente a uma basculada do pluviômetro) ocorridos às 0:25 min e às 0:30 min do dia 3/4/2009. Isso interrompeu o intervalo de seis horas secas (sem chuvas), critério usado para separação de eventos de precipitação. Se considerarmos, no entanto, que a separação de eventos se dará pela presença de, no máximo, 1 mm de chuva no intervalo de seis horas (tomando-se como base Grottker, 1988), essa chuva se caracteriza como dois eventos: um no dia 02/04/2009 com 47,50 mm e outro no dia 03/04/2009 com 36,32 mm (eventos 60 e 61 da Tabela 4).

Vários autores têm se debruçado sobre o critério de separação de eventos pluviométricos, como discutido no item 4.2, sem que se tenha chegado a um consenso. Assim, a simples escolha de um critério específico pode influenciar os resultados da análise, como constatado no caso especial do(s) evento(s) do dia 02/04/2009.

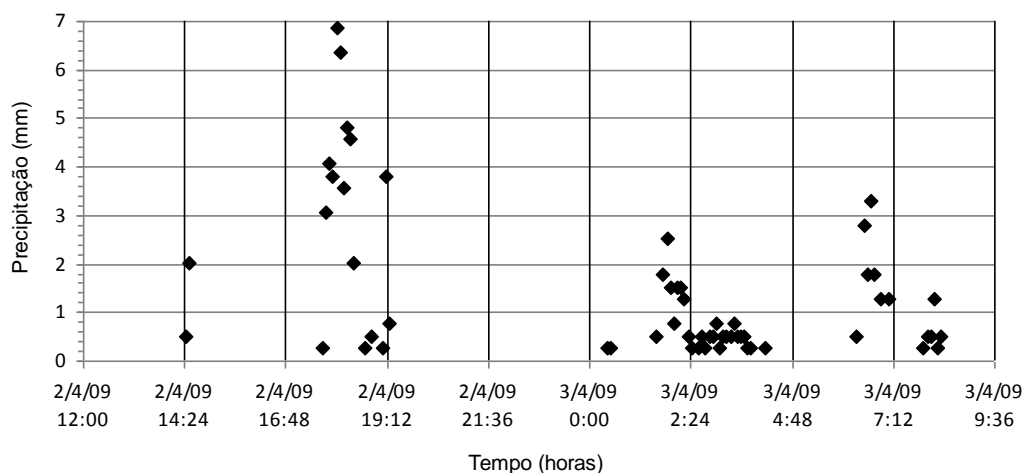


Figura 16 – Distribuição temporal do evento “caso especial”.

Uma hipótese levantada para a não geração de escoamento na chuva do caso especial é a variação espacial da precipitação na bacia hidrográfica, Figura 17. Observa-se uma grande variação espacial na distribuição da precipitação para a região estudada. Note que a precipitação na EP3 foi menor que 10 mm, em quanto que na EP1 houve registro de 83 mm.

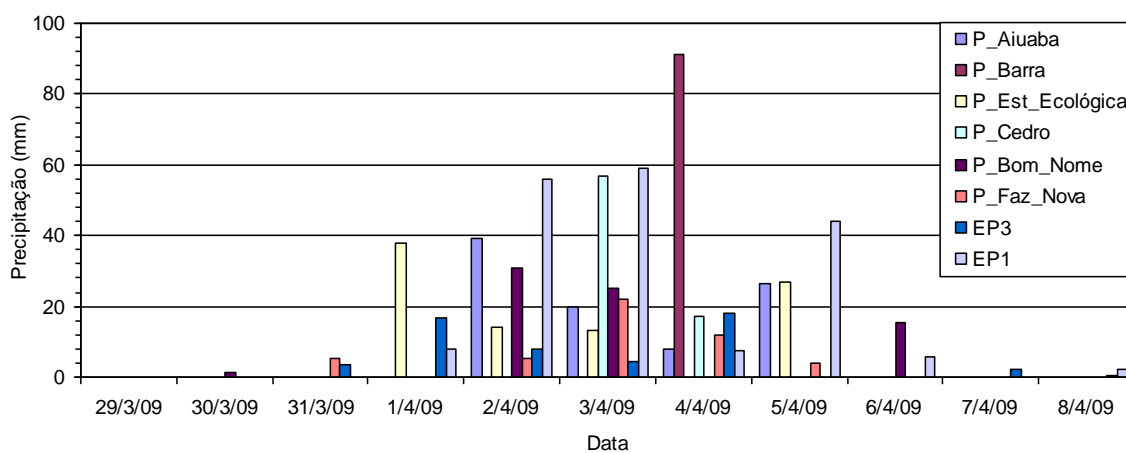
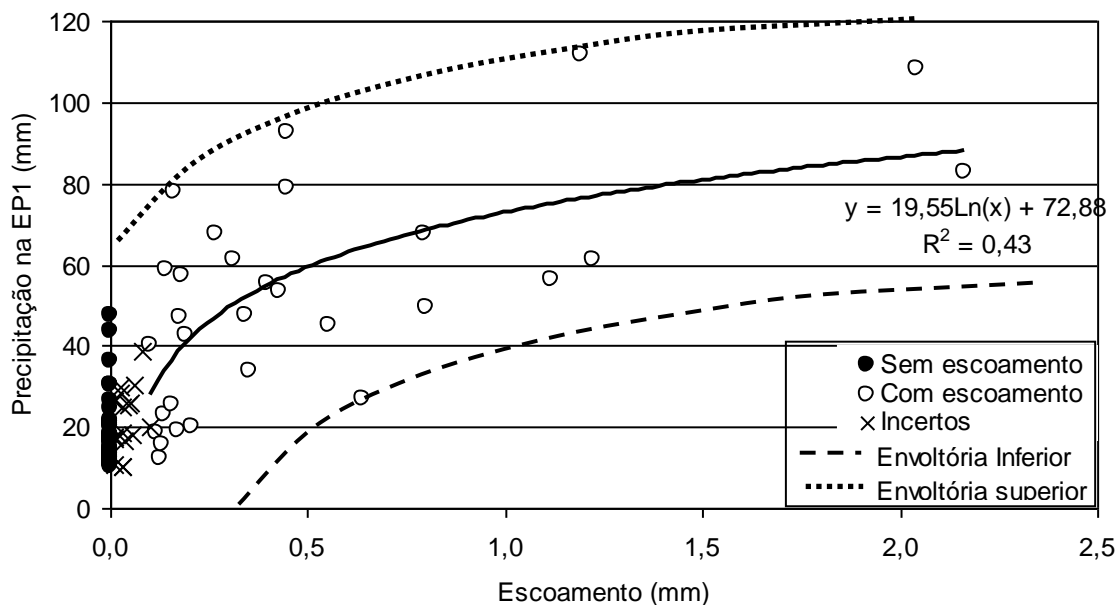


Figura 17 – Valores de precipitação para sete postos pluviométricos vizinhos a EP1, para cinco dias anteriores e cinco dias posteriores ao evento “caso especial”.

### Precipitação total *versus* escoamento

Na Figura 18 são mostrados os resultados da lâmina escoada na bacia e da precipitação no período de 01/01/2005 a 30/04/2010, para os 83 eventos selecionados. Os dados da lâmina escoada foram obtidos das régua linimétricas instaladas no reservatório, realizando-se o balanço hídrico e a curva cota – área - volume de Araújo et al 2004. A precipitação correspondente àquela medida na estação EP1.



**Figura 18 – Relação entre escoamento e precipitação na BEA, para os 83 eventos selecionados.**

Na Figura 18 é possível observar que, em determinados eventos, não houve escoamento mesmo em eventos nos quais a precipitação foi maior que 40 mm. Em outros eventos, houve escoamento com precipitações abaixo de 20 mm. Para escoar 0,5 mm na BEA, é requerida uma precipitação de 60 mm, com variação de  $\pm 40$  mm. Isso mostra uma grande incerteza, sendo oportuna a realização de outras análises.

Alencar (2006) estudou a influência da precipitação no escoamento superficial na microbacia hidrográfica do Córrego Capetinga, Distrito Federal, com área de 9,62 km<sup>2</sup>, portanto semelhante à área da BEA. Objetivou verificar a influência do total precipitado, da umidade antecedente e da intensidade de precipitação na ocorrência do escoamento superficial na microbacia. O autor aplicou uma regressão linear múltipla para estabelecer a relação entre precipitação e escoamento superficial para os eventos de cheias observadas, obtendo  $r^2 = 0,60$ , enquanto na BEA (precipitação *versus* lâmina escoada) obteve-se  $r^2 = 0,43$  para uma função logarítmica. Estes valores são baixos, não sendo capazes de explicar a ocorrência de escoamento.

De fato, Costa (2007) mostra grande dispersão dos valores de deflúvio afluente versus precipitação média, para valores na escala de evento e para valores na escala diária. O autor mostra a influência de outros fatores no processo chuva-deflúvio como, por exemplo, a alta variabilidade da intensidade da chuva. De acordo com vários autores, o volume de escoamento gerado depende de vários fatores, notadamente da intensidade e duração dos eventos chuvosos, mas também da própria orientação da chuva e, ainda, do teor de umidade do solo antecedente (Tesar et al., 2003; Kostka & Holko, 2003; Parikh et al., 2005; Lencastre & Franco, 2006; Wang et al., 2008). Segundo Durrans et al. (2004), eventos pluviométricos de pequena e média magnitudes (precipitação inferior a 40 mm) contribuem para a maior parte do volume de escoamento total anual das bacias hidrográficas urbanas, devido à frequência com que acontecem. Por outro lado, Belmonte & Beltán (2001) destacam o comportamento do solo. No Verão, a precipitação convectiva intensa pode alterar a estrutura do solo e ultrapassar rapidamente a capacidade de infiltração, gerando fluxos hortonianos. No Outono-Inverno, as chuvas são menos intensas, no entanto mais persistentes e o sistema responde mais gradualmente.

A partir dos dados medidos para os eventos em estudo, não é possível avaliar se ocorrerá ou não escoamento com base apenas na precipitação total.

### **5.3. Efeito da umidade antecedente do solo sobre o início do escoamento superficial**

Sabendo que os valores de umidade entre os solos da BEA para o mesmo período diferem significativamente (Lopes, *et al* 2010b), foi realizado teste na tentativa de encontrar um valor de umidade que melhor separasse os eventos que geram escoamento daqueles que não produzem escoamento. Utilizou-se a umidade de cada estação isoladamente (EP1, EP2 ou EP3) ou de modo combinado (EP1+EP2; EP1+EP3; EP2+EP3; ou EP1+EP2+EP3). A que apresentou maior eficiência nas combinações foi a média das três estações.

#### **Umidade *versus* precipitação**

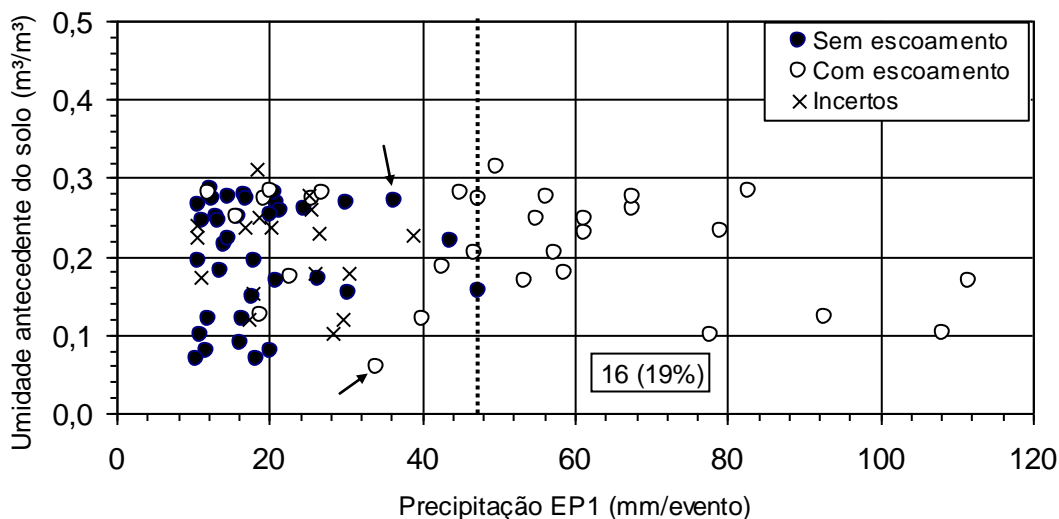
Os valores de umidade média da BEA, coletados uma hora antes do início de cada evento, variaram entre 0,06 e 0,31 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Para efeito de análise, os teores de umidade antecedente foram separados em três classes: de 0,06 - 0,14m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (umidade baixa); 0,14 - 0,23m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (umidade média); 0,23 - 0,31m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> (umidade alta).

A Figura 19 busca correlacionar a umidade antecedente do solo com precipitação e com a ocorrência (ou não) de escoamento superficial. Observa-se que o único traço divisório

(linha pontilhada) capaz de caracterizar a ocorrência de escoamento independente da umidade antecedente do solo (linha vertical). Na Figura 19 pode-se, por exemplo, identificar o evento de 25/01/2010 com umidade baixa e precipitação moderada (6% e 27mm) que gerou escoamento, enquanto que outro evento (03/04/2009), com umidade muito superior (27%) e precipitação semelhante (28 mm), não gerou escoamento. Os referidos eventos estão identificados por setas na Figura 19.

Para uma precipitação na EP1 maior que 47,50 mm, independente da umidade, sempre haverá escoamento na BEA. Já para precipitações menores, não foi possível estabelecer uma relação unívoca entre a ocorrência do escoamento e umidade.

Este resultado está em acordo com a estimativa proposta por Antonio Francisco de Silva, residente das imediações da BEA e responsável pela coletas de dados da bacia. Segundo o produtor agrícola, sempre haverá escoamento quando ocorre uma chuva maior ou igual a 40 mm, “a não ser que a terra esteja encharcada, aí pode ser com uma chuva menor”.

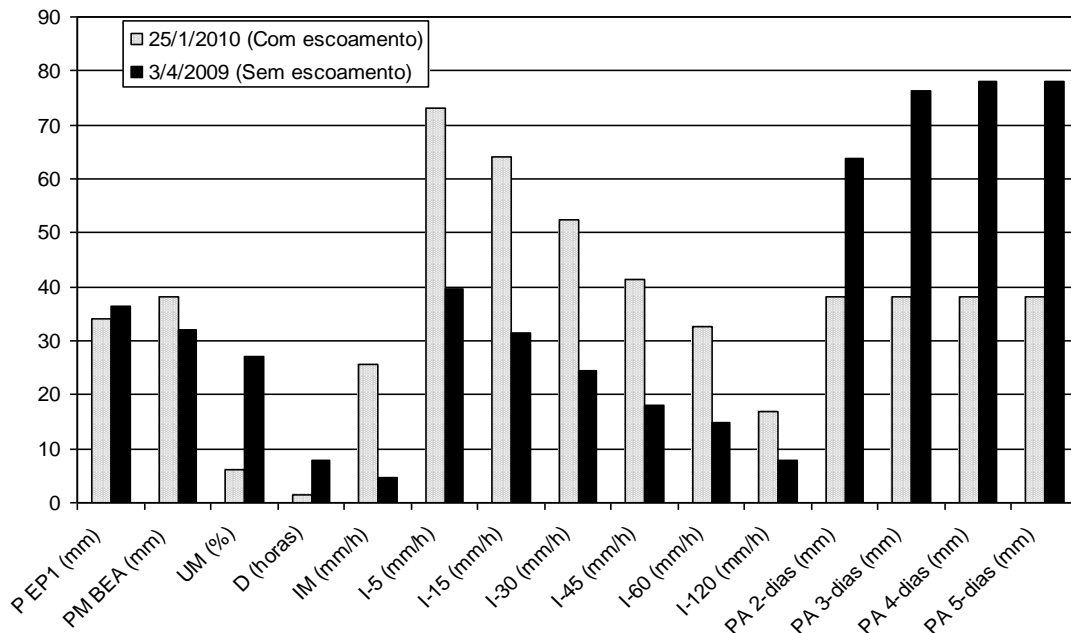


**Figura 19 – Relação entre precipitação EP1 e umidade média na BEA, para os 83 eventos seleccionados. Na caixa, indica-se o número de eventos (e seu respectivo percentual) pertencente a uma região do ábaco**

A umidade antecedente do solo, combinada com a precipitação total EP1, não consegue explicar nem 20% dos casos. Entretanto, a umidade antecedente do solo demonstra ter importância (ainda que secundária) na geração do escoamento da BEA, como consagrado na literatura. Para os casos estudados, 47% dos eventos com escoamento ocorreram quando a umidade encontrava-se na faixa alta, 34% na faixa média e somente 19% na faixa baixa. Os percentuais da lâmina total escoada representam 53%, 27% e 20% para as umidades alta, média e baixa, respectivamente.

Foram seleccionados os dois eventos, indicados por setas na Figura 19, com escoamento (25/01/2010) e sem escoamento (03/04/2009), para entender porque eventos tão

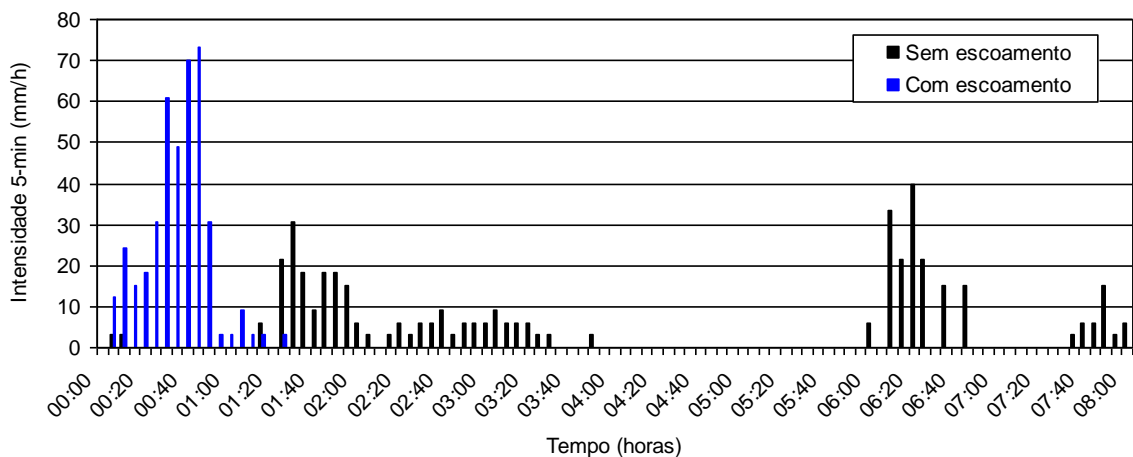
parecidos em termos de precipitação provocaram respostas hidrológicas diferente do esperado (escoamento quando o solo estava seco e não-escoamento quando o solo estava úmido). Levantaram-se dados referentes aos eventos, apresentados na Figura 20.



**Figura 20 – Comparativo das variáveis medidas para os eventos de precipitação com escoamento (25/1/2010) e sem escoamento (3/4/2009). Na figura, P EP1= precipitação na estação EP1; PM= precipitação média; UM= umidade volumétrica média; D= duração; IM= intensidade média; I<sub>5</sub>= intensidade máxima para cinco minutos (e correspondentes); PA 2= precipitação antecedente para dois dias (e correspondentes).**

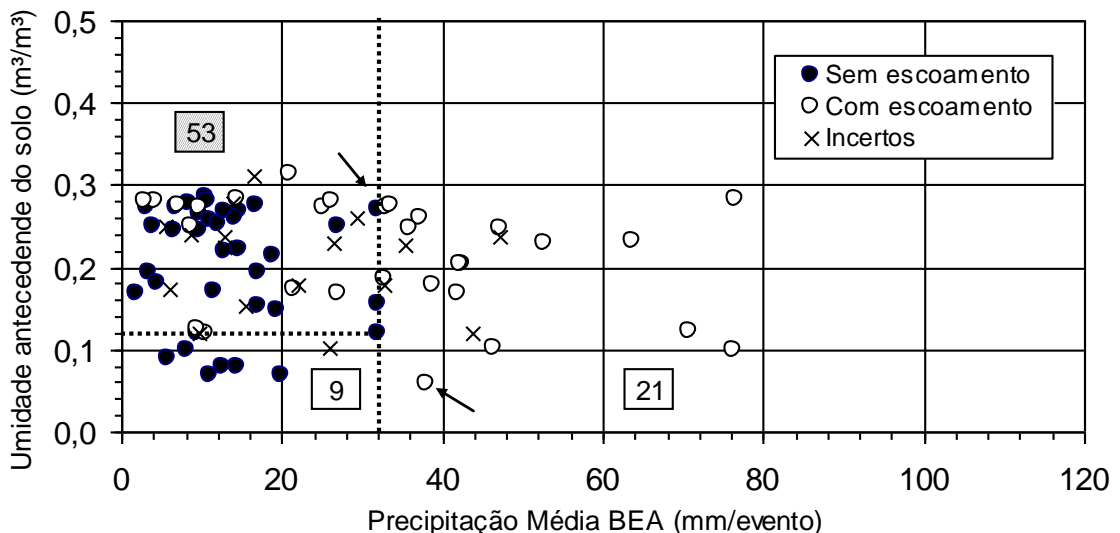
Na Figura 21 observa-se a distribuição temporal dos dois eventos selecionados, apontando que uma precipitação muito distribuída no tempo para a bacia estudada, pode ser uma barreira na geração do escoamento superficial. Os intervalos sem precipitação seriam suficientes para que a água acumulada na superfície do solo conseguisse ser absorvida, rompendo a conectividade do fluxo e não permitindo que este alcance os riachos ou, mesmo que atinja, não seja suficiente para chegar ao exutório. Isso pode ser facilmente observado na Figura 21, que mostra a evolução temporal dos dois eventos analisados.





**Figura 21 – Análise da distribuição temporal para os eventos de precipitação com escoamento (25/1/2010) e sem escoamento (3/4/2009).**

Trabalhando-se com a precipitação média diária da BEA, ao invés de considerar somente a EP1, é possível melhorar a análise devido à espacialização da precipitação que é levada em consideração (Figura 22). Assim, para precipitação média diária da BEA maior que 32 mm, independentemente da umidade antecedente do solo, sempre haveria escoamento. Já para precipitações menores que 32 mm e umidade baixa (menor que  $0,13\text{m}^3/\text{m}^3$ ) não haveria escoamento. Esses critérios explicariam 30 eventos (36%): 21 eventos com escoamento (25%) e nove sem escoamento (11%). No entanto, 53 eventos (64%) continuariam sem explicação, segundo esses critérios.

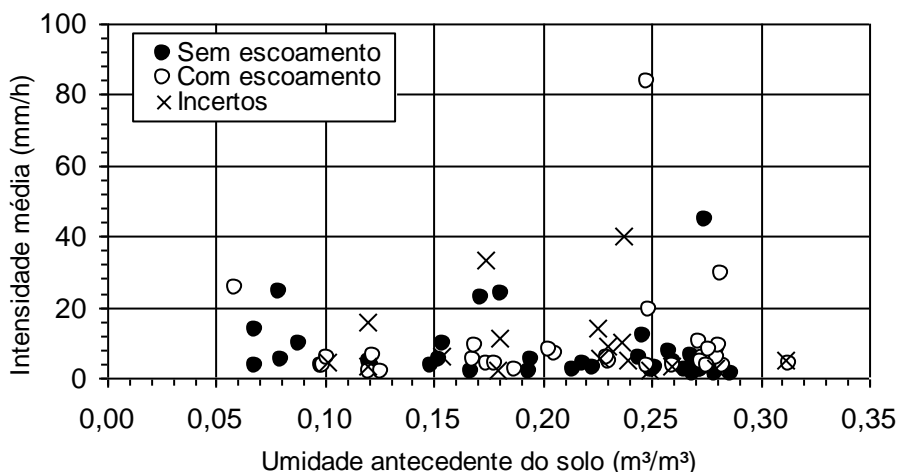


**Figura 22 – Relação entre precipitação média diária na BEA (nos dias dos 83 eventos selecionados) e umidade média do solo na BEA. Os números nas caixas representam a quantidade de eventos da respectiva região do ábaco. Observe que a caixa hachurada corresponde aos eventos não explicados pelo(s) critério(s) estabelecido(s).**

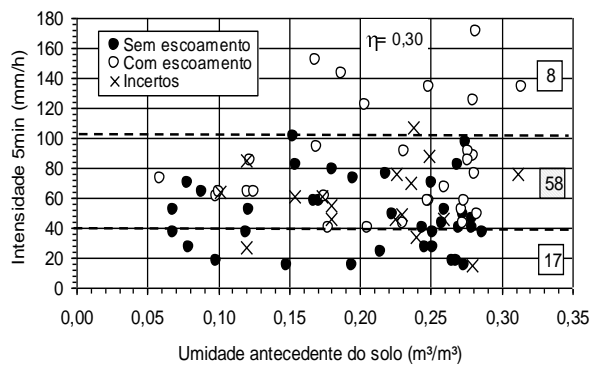
A análise acima demonstrou que a umidade antecedente do solo é menos relevante para a geração (ou não) do escoamento superficial que a distribuição temporal da precipitação. Demonstrou-se também que a chuva média sobre a bacia caracteriza melhor a geração do escoamento que a chuva em um único posto pluviométrico.

### Umidade *versus* intensidade

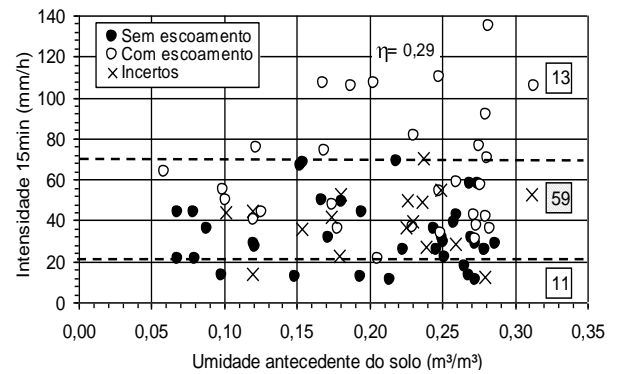
Tendo como base a análise acima, avaliou-se a ocorrência de escoamento em função de diversas intensidades de precipitação na EP1. Quando se analisou a intensidade média da precipitação *versus* a umidade média da BEA, (Figura 23) verifica-se que esta não separa eventos com e sem escoamento. Isso ocorre porque a intensidade média não mostra a distribuição temporal no evento. Por esse motivo, avaliou-se qual intensidade específica (isto é, qual intensidade máxima ocorrida em um determinado intervalo de tempo) explicaria o maior número de eventos com e sem escoamento. Quando avaliadas as intensidades específicas para as durações de 5, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos (Figura 24) é possível identificar três regiões: aquela na qual sempre ocorre escoamento, aquela na qual nunca ocorre escoamento e uma faixa intermediária na qual não é possível distinguir um caso do outro.



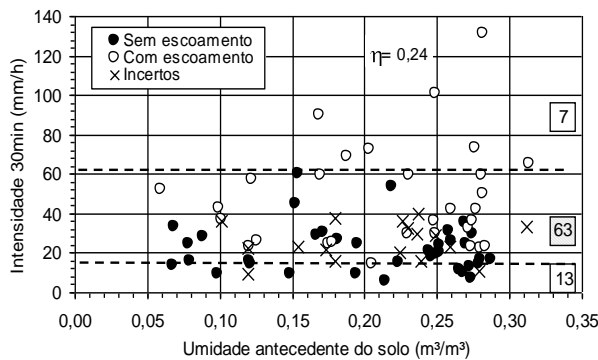
**Figura 23 – Relação entre umidade média na BEA e intensidade média da precipitação, para os 83 eventos selecionados.**



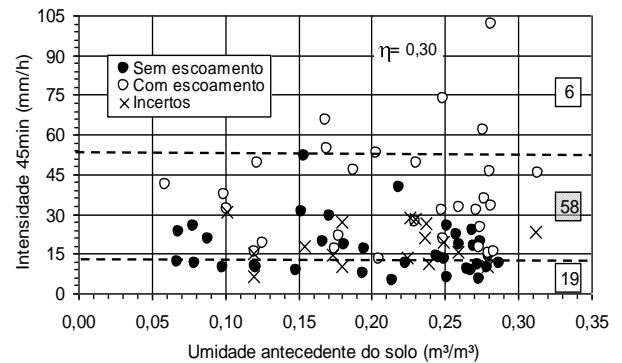
(a) Intensidade  $I_5$



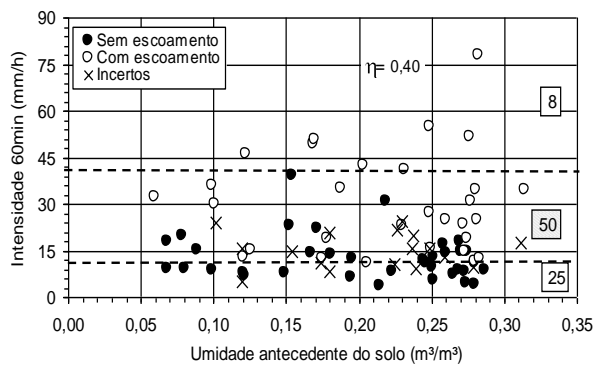
(b) Intensidade  $I_{15}$



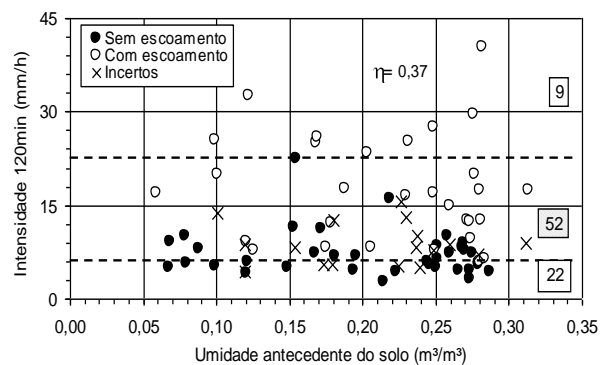
(c) Intensidade  $I_{30}$



(d) Intensidade  $I_{45}$



(e) Intensidade  $I_{60}$



(f) Intensidade  $I_{120}$

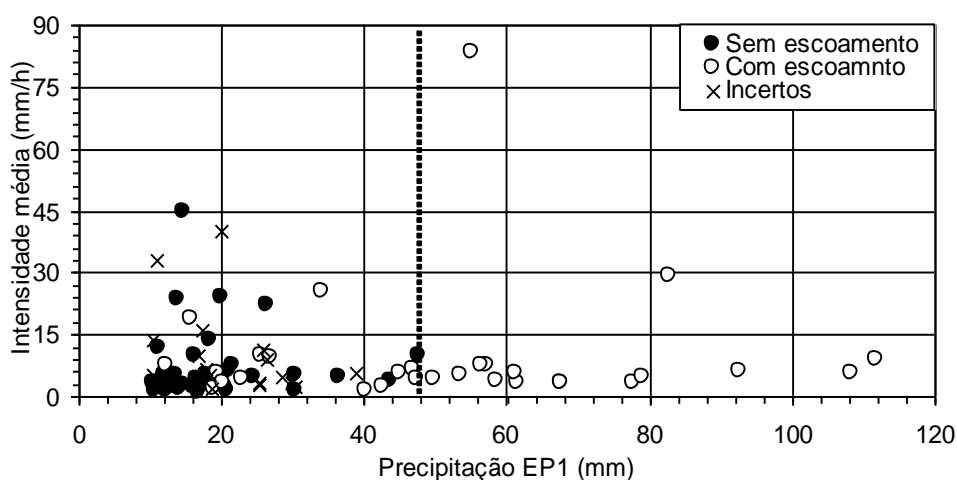
Figura 24 – Relação entre a umidade média do solo na BEA e intensidades específicas da precipitação, para os 83 eventos seleccionados. Observe que  $\eta$  representa a eficiência da respectiva intensidade específica em separar eventos com e sem geração de escoamento. O valor de  $\eta$  é a razão entre o número de eventos explicados e o número total de eventos (83). Os números nas caixas representam a quantidade de eventos da respectiva região do ábaco. A caixa hachurada corresponde aos eventos não explicados pelo(s) critério(s) estabelecido(s).

A relação umidade do solo *versus* intensidade da precipitação não apresenta resultados conclusivos. O melhor desempenho encontrado foi o da Figura 24 (e), com intensidade de 60 minutos, a qual apresenta eficiência de apenas 40%. Ressalta-se que 60 min é, aproximadamente, o tempo de concentração da bacia. Mais precisamente 65 min, (MEDEIROS, 2005).

#### 5.4. Efeito da distribuição temporal da precipitação sobre o início do escoamento

O efeito da distribuição temporal da precipitação sobre o início do escoamento foi analisado a partir da determinação das intensidades: média, máxima, e para as durações de 5, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos. A intensidade máxima é determinada pelo valor da maior altura precipitada no período dividida pelo respectivo intervalo de tempo.

A partir da observação da Figura 25 é possível afirmar que houve escoamento toda vez que a precipitação excedeu 47,50 mm, entretanto eventos com precipitações menores ainda continuam misturados. A intensidade média não é um bom parâmetro, pois representa apenas um valor médio, sem os valores máximos, que podem ser decisivos para o início do escoamento.



**Figura 25 – Relação entre precipitação na EP1 e intensidade média na BEA, para os 83 eventos selecionados.**

Na Figura 26 é analisada a ocorrência de escoamento em função da precipitação da EP1 e da intensidade máxima para os 83 eventos medidos. Neste caso percebe-se uma divisão em três regiões: a que sempre ocorre escoamento, a que nunca ocorre escoamento e outra em que não há separação.

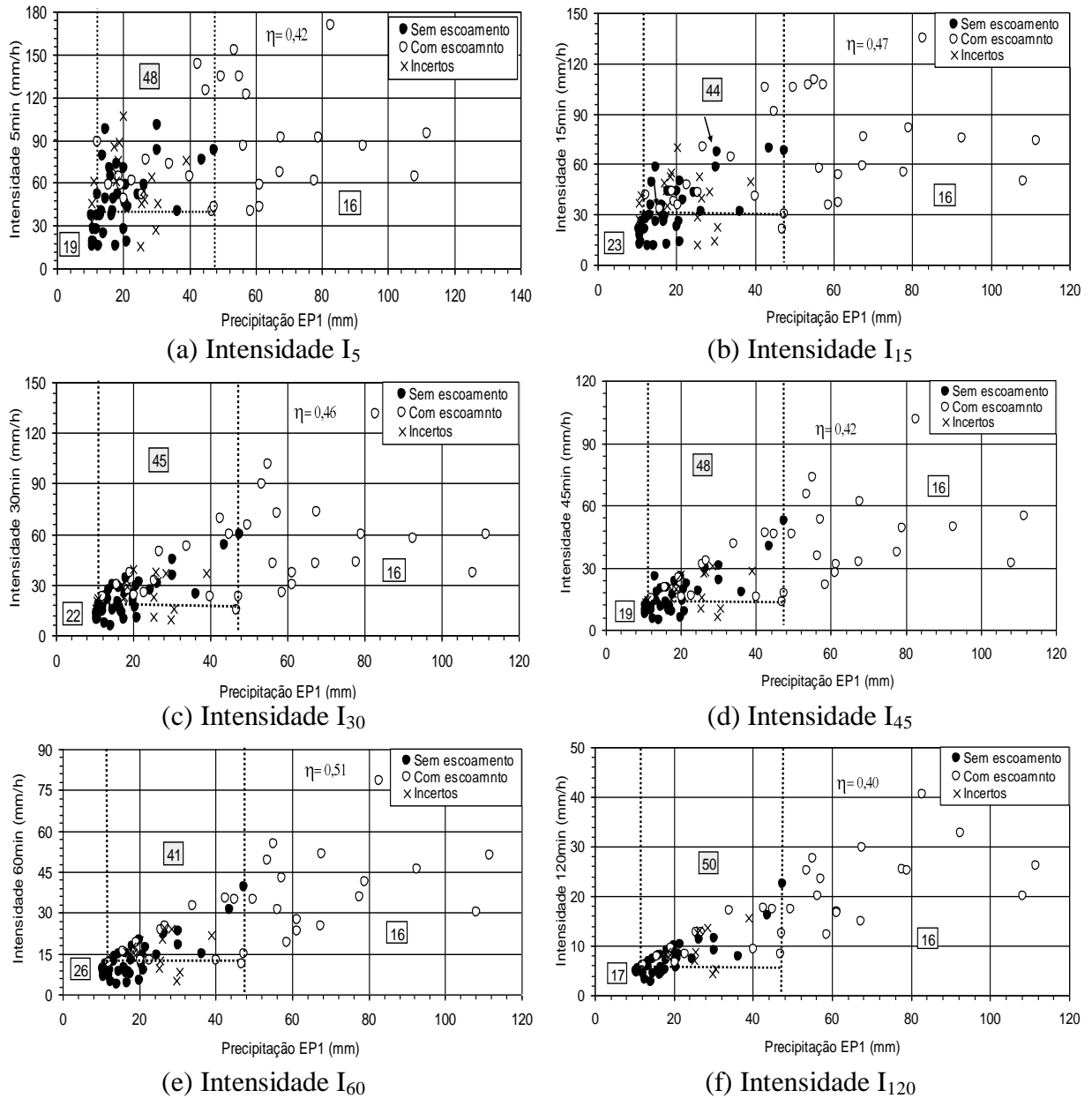
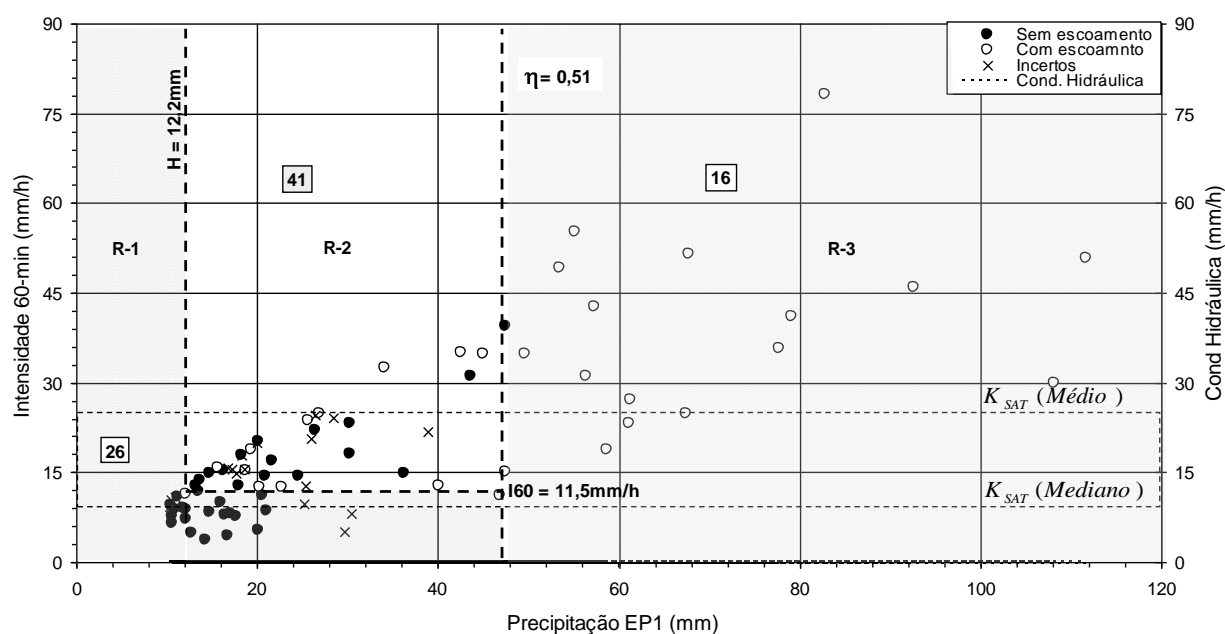


Figura 26 – Relação entre precipitação e intensidades específicas na BEA, para os 83 eventos selecionados.

Para os eventos selecionados identificou-se que a intensidade  $I_{60}$ , foi aquela que mais separou eficientemente os eventos com e sem escoamento. Observe-se que o tempo referência da intensidade (60 min) é bem próximo do tempo de concentração para esta bacia (65 min), segundo Medeiros (2005).

Na Figura 27 é apresentada uma síntese da influência da precipitação e intensidade de chuva na geração de escoamento superficial da BEA. Percebe-se que há três regiões distintas: na região R-3 estão os eventos que sempre geram escoamento, independente da intensidade. Essa região é delimitada por precipitação (EP1) acima de 47,50 mm. Os eventos que compõem a região R3 somaram 75% da lâmina escoada na BEA para o período observado, isso indica que os eventos não explicados por esse critério são poucos expressivos.

Há outra região R-1, que nunca gera escoamento. Nessa região a precipitação (EP1) é menor que 12,20 mm ou a intensidade da chuva ( $I_{60}$ ) igual ou menor 11,5 mm/h. Segundo Costa (2010), a mediana de 118 valores de  $K_{sat}$  na BEA foi de 9 mm/h, sendo sua média 25 mm/h. A intensidade crítica (11,5 mm/h), portanto, situa-se entre as duas, aproximando-se mais da mediana. Isso indica que na BEA, deve prevalecer o escoamento Hortoniano, o que confirma observações *in situ* de Costa (2007). Na região R-2 não é possível a separação de eventos com e sem escoamento. Essa região é caracterizada por ter precipitação entre 12,20 mm e 47,50 mm e intensidade ( $I_{60}$ ) maior ou igual que 11,5 mm/h. Nesta região encontram-se 25% do escoamento da BEA. Esta região pode sofrer maior influência do padrão da precipitação (continuidade do evento), ocasionado quebra da conectividade, ou seja, re-infiltração do escoamento a jusante.

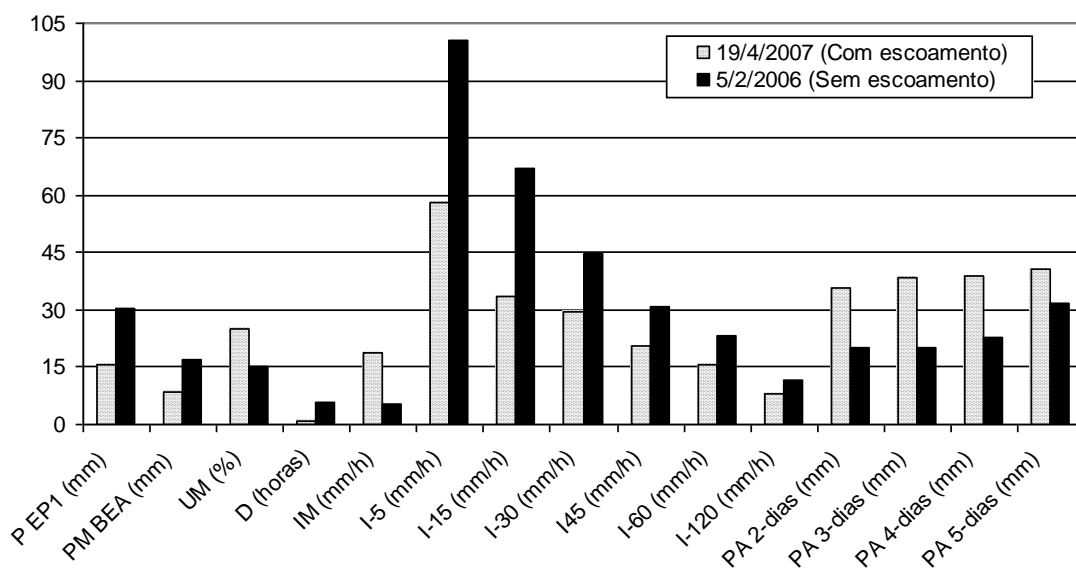


**Figura 27 – Análise da influência da precipitação e intensidade da precipitação na geração de escoamento superficial.**

Resta avaliar qual critério seria capaz de separar os eventos com e sem escoamento, na região R-2 (Figura 27). Nesse sentido, foi realizada uma análise detalhada de dois eventos, escolhidos por não apresentarem a tendência esperada. O primeiro, do dia 05/02/2006, apresenta elevadas intensidade e precipitação ( $I_{60} = 23,11$  mm/h; precipitação EP1 = 30,32 mm) porém, não gerando escoamento. O segundo evento analisado, do dia 19/04/2007, com intensidade moderada ( $I_{60} = 15,74$  mm/h) e baixa precipitação na EP1 (15,74 mm), no entanto houve escoamento. No que se refere à umidade antecedente do solo, os eventos apresentaram valores de  $0,25\text{ m}^3/\text{m}^3$  e  $0,15\text{ m}^3/\text{m}^3$  para os eventos com e sem escoamento, respectivamente.

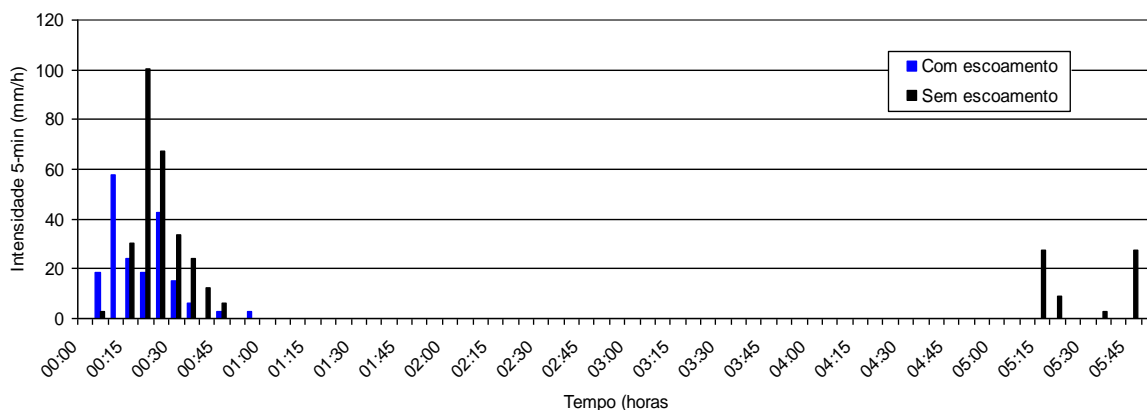
Apesar desta diferença, a análise das Figuras 23 e 24 demonstrou que a umidade do solo não é capaz de explicar a ocorrência ou não de escoamento na BEA. Então, fez-se uma comparação dos casos, utilizando outras variáveis.

Para entender porque eventos de precipitação apresentam respostas hidrológicas tão diferentes das esperadas, levantaram-se dados referentes aos eventos, que são mostrados na Figura 28.



**Figura 28 – Comparativo das variáveis medidas para os eventos de precipitação com escoamento (19/4/2007) e sem escoamento (5/2/2006). Na figura, P EP1= precipitação na estação EP1; PM= precipitação média; UM= umidade volumétrica média do solo; D= duração; IM= intensidade média da precipitação; I<sub>5</sub>= intensidade máxima para cinco minutos (e correspondentes); PA 2= precipitação antecedente para dois dias (e correspondentes).**

Na Figura 29 é mostrada a análise da distribuição temporal para os eventos de precipitação do dia 19/4/2007 e 5/2/2006. Enquanto um ocorreu sem interrupção o outro está dividido com períodos sem chuvas. Verifica-se que o evento com escoamento ocorreu em um pequeno intervalo de tempo e de forma continuada, sem interrupções.



**Figura 29 – Análise da distribuição temporal para os eventos de precipitação com escoamento (19/4/2007) e sem escoamento (5/2/2006).**

Para os dois eventos escolhidos teve-se a preocupação em verificar os eventos anteriores e posteriores ocorridos.

Alguns dados levantados ajudam a explicar a ocorrência de escoamento no evento de 19/4/2007: a umidade média da BEA encontrava-se alta; a duração da chuva foi curta, o evento chuvoso caracterizou-se por ser contínuo de boa distribuição temporal (Figura 29). O escoamento pode não ter sido proveniente exclusivamente deste evento, e sim um escoamento remanescente de precipitações anteriores.

Na Tabela 5 é mostrado o evento anterior ao dia 19/4/2010, no qual é possível justificar novamente a ocorrência do escoamento, devido à alta umidade do solo. Já no dia 5/2/2006, não houve precipitação nos cinco dias anteriores. No entanto, esta precipitação serviu para melhorar as condições de geração de escoamento para o dia seguinte (6/2/2006).

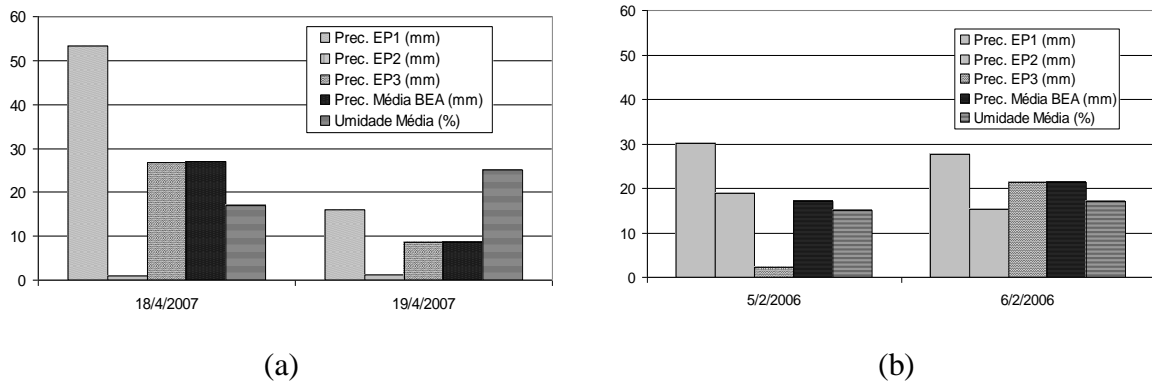
**Tabela 5 – Evento anterior ao dia 19/4/2007 (com escoamento) e posterior ao dia 5/2/2006 (sem escoamento). Na tabela, P= precipitação.**

Data	P EP1 (mm)	P EP2 (mm)	P EP3 (mm)	P Média (mm)	Umidade (%)	Escoamento (mm/evento)
18/4/2007	53,33	1,02	26,67	27,01	17	0,43
19/4/2007	16,00	1,27	8,64	8,64	25	0,13
5/2/2006	30,22	18,80	2,29	17,10	15	---
6/2/2006	27,69	15,25	21,34	21,42	17	0,14

Ao analisar o evento sem escoamento (5/2/2006) levantam-se as seguintes proposições: a umidade média da BEA é baixa; a duração do evento é maior comparado ao anterior (Figura 28), o evento apresenta uma maior distribuição temporal (Figura 29). No entanto, quando observamos o dia posterior (06/02/2006) Tabela 5, verifica-se a ocorrência do escoamento, confirmando a influência da umidade para o início do escoamento.

Na Figura 30 é analisada a distribuição espacial da precipitação na BEA associada ao teor de umidade média do solo. Na Figura 30(a) verifica-se que a precipitação do dia 19/4/2007 é baixa. No entanto, ocorreu escoamento devido ao teor de umidade média da BEA estar alto. Na Figura 30(b), verifica-se que a umidade encontra-se com valor médio, sendo que no dia 5/4/2006 a variação espacial da precipitação é elevada, não havendo escoamento. No dia seguinte ocorreu evento com melhor distribuição espacial da precipitação gerando escoamento.





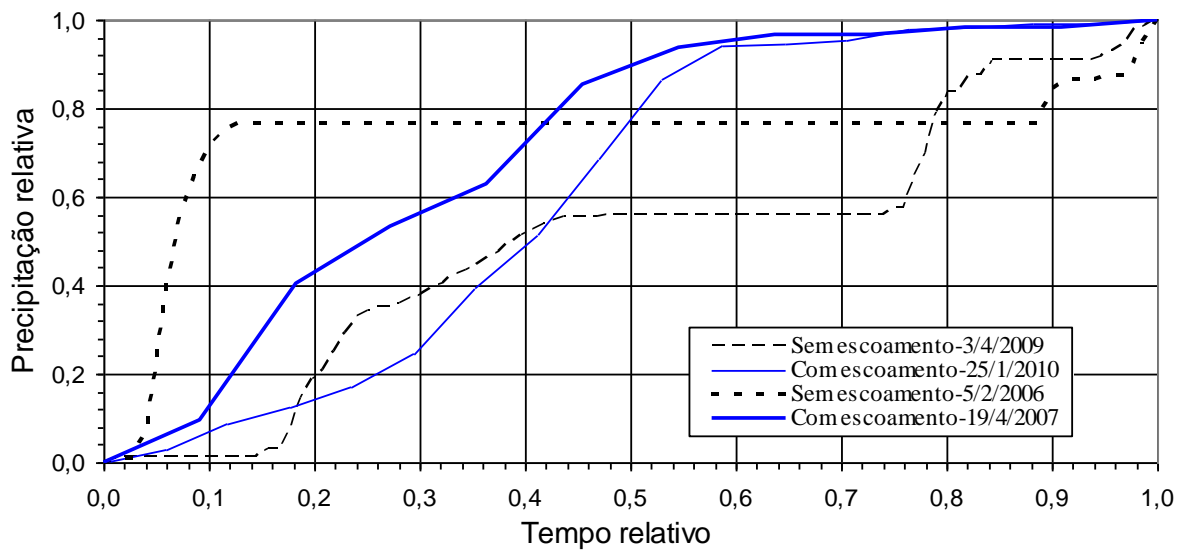
**Figura 30 – Análise da distribuição espacial para os eventos de precipitação: com escoamento (19/4/2007) e do dia anterior (18/04/2007); e sem escoamento (5/2/2006) e do dia posterior (6/2/2006).**

Apesar das explicações acima apresentadas, não foi identificado com base na umidade antecedente do solo, precipitação total e intensidades específicas, nenhum padrão capaz de separar os eventos da região R-2. Por exemplo, o critério de umidade não explica os casos dos dias 3/4/2009 e 25/1/2009, Figura 19. Por isso, foi realizada investigação complementar, apresentada a seguir.

### 5.5. Análise dos eventos da região R-2

Foram selecionados quatro eventos localizados na região R-2 (Figura 27), para comparação. Ao representar os eventos numa escala relativa, de precipitação *versus* tempo (Figura 31), nota-se que há comportamento semelhante, para eventos com respostas hidrológicas semelhantes.

Observa-se que os eventos sem escoamento (3/4/09 e 5/2/06) apresentam interrupções na precipitação, que pode ter levado à desconectividade do escoamento. A água excedente pode ter iniciado o escoamento, mas, devido à interrupção na precipitação, houve infiltração do excedente. Isso não teria ocorrido nos eventos dos dias 25/1/10 e 19/4/07, nos quais houve escoamento. Tal comportamento pode ser observado pela suavidade das curvas acumulativas dos referidos eventos.



**Figura 31 – Comparação de quatro eventos observados na BEA, localizados na região R-2.**

Medeiros (2008) afirma que o balanço de água no solo determina as condições de geração de escoamento: embora haja uma predominância de iniciação do escoamento superficial por processos Hortonianos, na escala de bacia hidrográfica o excesso de precipitação é percebido em eventos de grande magnitude ou após seqüências de eventos chuvosos, quando a umidade do solo encontra-se elevada. Essas características são decorrentes da forma descontínua com que as camadas de solo são saturadas, permitindo que o escoamento gerado em posições elevadas seja reinfiltrada a jusante. Assim, na escala de bacia hidrográfica, é necessário que determinadas condições de umedecimento sejam atingidas, elevando a conectividade hidrológica e impedindo que o escoamento superficial seja completamente interrompido antes de atingir o exutório.

Cammeraat (2004) demonstra, por exemplo, com base em medidas realizadas em região semiárida na Espanha, que as condições críticas para geração de escoamento são muito distintas nas diferentes escalas de bacia. Então na escala da BEA, talvez a condição crítica para ser satisfeita seja, por exemplo, uma continuidade na precipitação, como foi percebida na Figura 31.

Utilizou-se a função densidade de probabilidade para explicar a ocorrência do escoamento superficial na BEA, como mostra a Figura 32. Nos eventos em que ocorreu escoamento, percebe-se uma suavidade nas curvas. Já para os eventos sem escoamento, existe uma tendência à presença de picos.

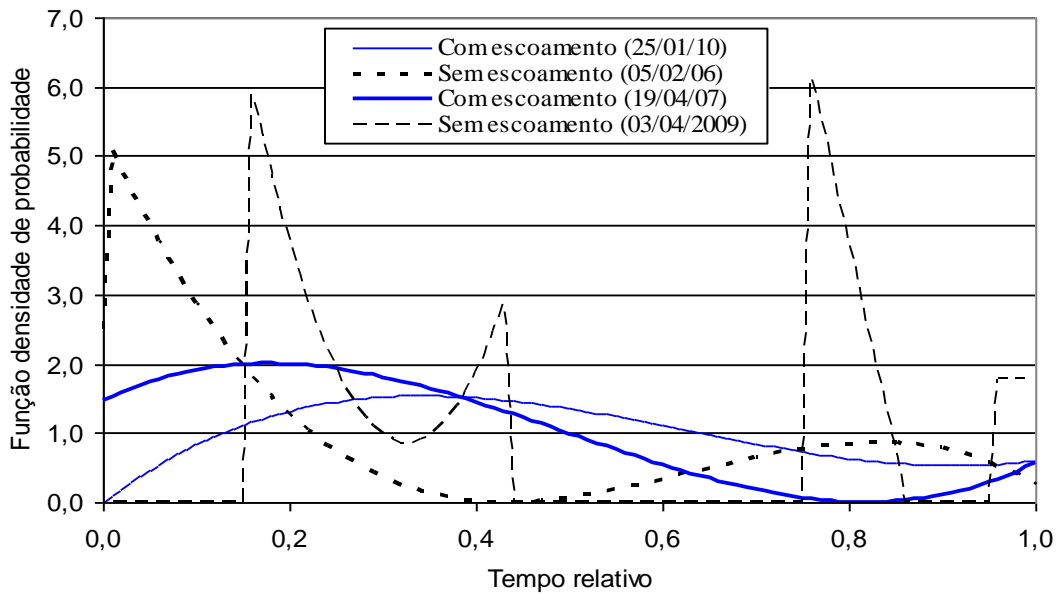


Figura 32 – Comparação dos quatro eventos de chuva observados, aplicando a função densidade de probabilidade.

### 5.6. Avaliação das abstrações iniciais e do parâmetro CN

Observando os valores da umidade do solo da BEA, 6% a 31%, respectivamente mínimo e máximo, os 83 eventos foram agrupados em três faixas de umidade: umidade baixa ( $\theta_{\text{Seco}} = 6 - 14\%$ ), umidade média ( $\bar{\theta} = 14 - 23\%$ ) e umidade alta ( $\theta_{\text{Umido}} = 23 - 31\%$ ). Cada faixa foi associada aos grupos CN I, CN II e CN III do método SCS.

Para os eventos estudados, o valor da abstração inicial foi de 16 mm, obtido ao ser traçada uma envoltória inferior nos dados da Figura 33. Com base nesses dados, determina-se armazenamento (S) de 80 mm e CN de 78.

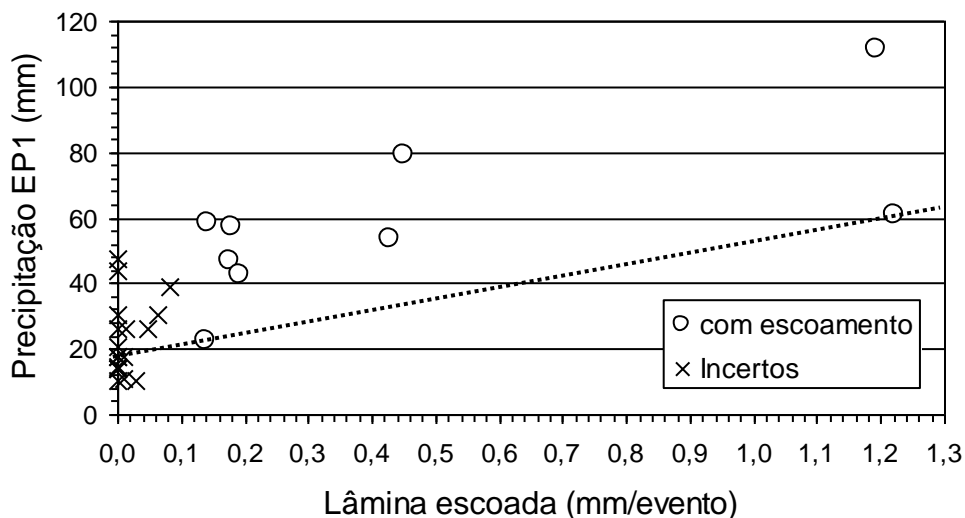


Figura 33 – Envoltória inferior referente a faixa de umidade média para precipitação na EP1

Rodrigues (2009), estudando quatro bacias experimentais no município de Iguatu/CE, determinou que o escoamento total anual nessas micro bacias corresponde a somente 7,4% da precipitação anual. Considerando não haver perdas em trânsito, devido às pequenas dimensões da bacia, o autor sugere o alto poder de abstração destas micro bacias, devido à infiltração e a evaporação.

Na BEA, as perdas em trânsito podem ser muito significativas, visto que o coeficiente de escoamento é inferior a 1%. Portanto, é fundamental a continuação do monitoramento da bacia para avaliação destas perdas.

Na Tabela 6 são apresentados os valores de CN encontrados para a BEA, determinados em função da envoltória inferior (Figura 33), na qual considerou-se que quando a envoltória toca o eixo das ordenadas (Y) corresponde ao valor da abstração inicial.

**Tabela 6 – Valores dos parâmetros abstração inicial (Ia), armazenamento (S) e classe de umidade da BEA.**

<b>Classes de Umidade</b>	<b>Ia (mm)</b>	<b>S (mm)</b>	<b>CN</b>
$\theta_{\text{Seco}}$	17	85	77
$\bar{\theta}$	16	80	78
$\theta_{\text{Úmido}}$	8	40	89

Observando os valores de CN encontrados e analisando-se os dados hidrológicos da BEA, é possível identificar que os valores de CN encontrados estão muito elevado, não condizente com as observações de campo, sabendo que (Costa, 2007) determinou CN médio, para a mesma bacia, de 42, com máximo de 59 e mínimo de 27. O autor também afirma que não foi encontrada relação satisfatória entre umidade antecedente do solo a 15 cm de profundidade com os eventos de chuva e escoamento. O método SCS busca representar as perdas hídricas potenciais de uma bacia; quanto menor o valor do parâmetro CN, maior será o armazenamento inicial de uma bacia, reduzindo a possibilidade de escoamento.

Considerando-se que a umidade média do solo a 15 cm de profundidade não possui boa correlação, quer com CN, quer com coeficiente de runoff, infere-se que a água a uma profundidade de 15 cm ou mais não influencia consideravelmente no processo chuva-deflúvio. Portanto, se existirem contribuições relevantes do escoamento subsuperficial para o deflúvio superficial, além do escoamento hortoniano, essas devem ocorrer a uma profundidade menor que 15 cm. (COSTA, 2007).

Ainda segundo o método SCS, o escoamento somente ocorrerá caso a precipitação exceda a abstração inicial (Ia). Admitindo-se que a abstração inicial seja 47,5 mm (Figura 27), o método indica que CN= 52. Esse valor está de acordo com o intervalo observado por Costa

(2007), e mais compatível com as observações de campo, posto que a mediana do coeficiente de escoamento na BEA é de apenas 0,5%.

Da análise realizada, observa-se compatibilidade entre os métodos de calibração (Costa, 2007) e da abstração inicial admitida igual a precipitação limite (47,5 mm para a BEA), tanto entre si quanto com as observações *in situ*. No entanto, a estimativa da abstração inicial pelo método da envoltória inferior não gerou resultado aceitável.

### 5.7. Hidrogramas comparativos das duas micro bacias hidrográficas na BEA

A comparação das respostas hidrológicas entre as duas bacias, do riacho principal (BEA1) e do secundário (BEA2), foi motivada pelo trabalho de Costa (2007), e pela percepção no campo de que as mesmas se comportam de maneira distinta. Isso pode ser observado na Figura 34, mostrando o comportamento dos riachos para o mesmo evento (11/4/2010), e indicando que quatro horas após o encerramento da precipitação, continua passando água na EF2, enquanto que na EF1 já não há vazão. Isso leva a supor a existência de escoamento de base na bacia BEA2, enquanto que na bacia BEA1 o escoamento parece cessar logo após o término da precipitação.



(a) Estação fluviométrica 1 – EF1



(b) Estação fluviométrica 2 – EF2

Figura 34 – Comportamento dos riachos, quatro horas após o encerramento da precipitação, no dia 11/4/2010.

Na Tabela 7 é possível observar a diferença dos volumes escoados nas duas bacias, sendo que para o dia 11/4/2010 o volume chegou a ser 43 vezes maior na EF2. Diferença também observada na duração do evento de escoamento, mostrando que apesar de próximas, as bacias apresentam comportamentos bastante diferentes.

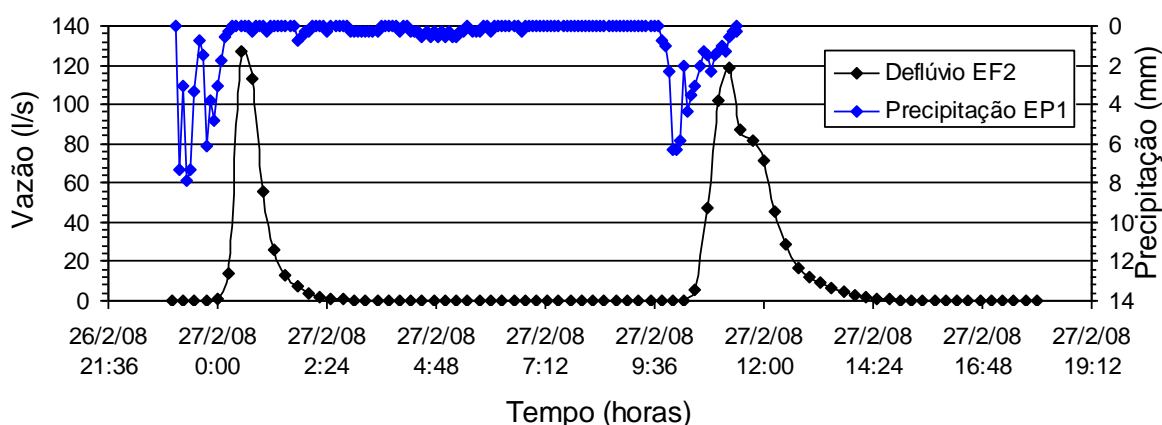
Também foi possível visualizar uma diferença significativa entre o volume medido nas duas estações fluviométricas (EF1 e EF2) e o volume encontrado pelo balanço hídrico proposto por Costa (2007).

**Tabela 7 – Medidas de escoamento na bacia principal EF1 e secundária EF2 e estimativa do volume de entrada na barragem, usando o balanço hídrico proposto por Costa (2007).**

Data	Prec. EP1 (mm)	Duração (horas)	Prec. Média BEA (mm)	Volume EF1 (m³)	Duração (horas)	Volume EF2 (m³)	Duração (horas)	VEB**
27/2/2008	111,67	12,25	42,04	NM	NM	909	19,00	14.800
1/4/2008	56,38	7,33	7,11	NM	NM	3,28	25,25	13.800
25/1/2010	34,04	1,33	38,10	3	0,31	NM	NM	4.400
21/3/2010	108,20	18,50	46,36	425	11,55	557	29,75	24.800
11/4/2010	61,21	10,83	52,58	103	3,10	4.431	12,45	15.100

\*NM – Não Medido, \*\* VEB – Volume de entrada na barragem (m³)

As Figuras 35, 36 e 37 mostram as medidas de chuva-deflúvio para eventos dos dias 27/02/2008 na EF2, 1/4/2008 na EF2 e 25/1/2010 na EF1, com volume total escoado de 910 m³, 3,28 m³ e 2,60 m³ respectivamente. Para estes eventos, não foi possível a medição simultânea em ambas as estações, impossibilitando estabelecer uma relação entre as duas.



**Figura 35 – Precipitação da EP1 a cada 5 min e hidrograma da EF2 a cada 15 min do evento chuva-deflúvio de 27/2/2008.**

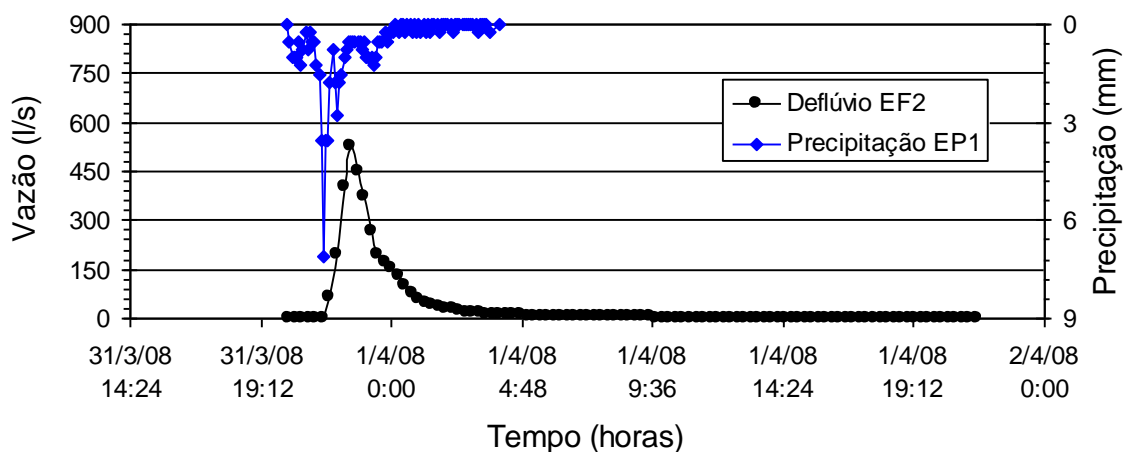


Figura 36 – Precipitação da EP1 a cada 5 min e hidrograma da EF2 a cada 15 min do evento chuva-deflúvio de 01/4/2008.

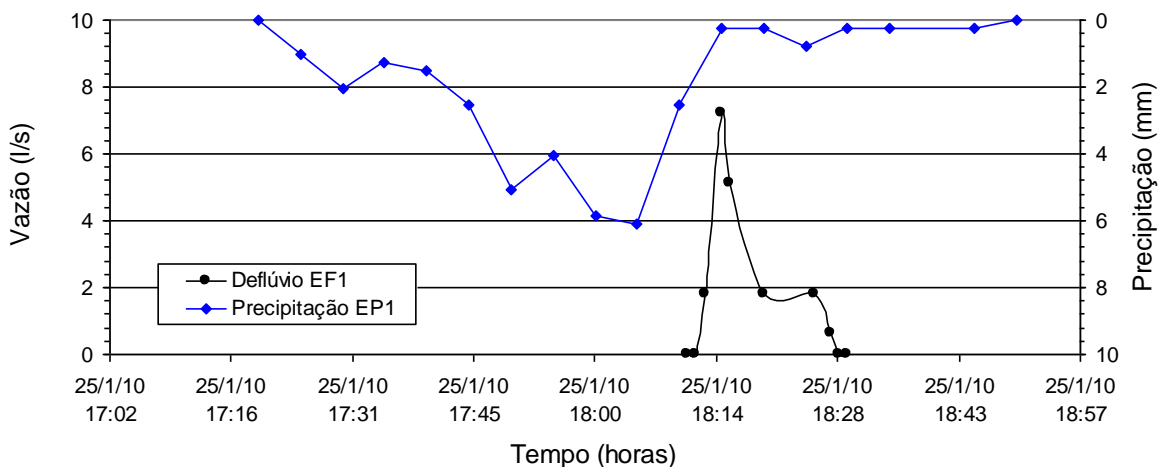
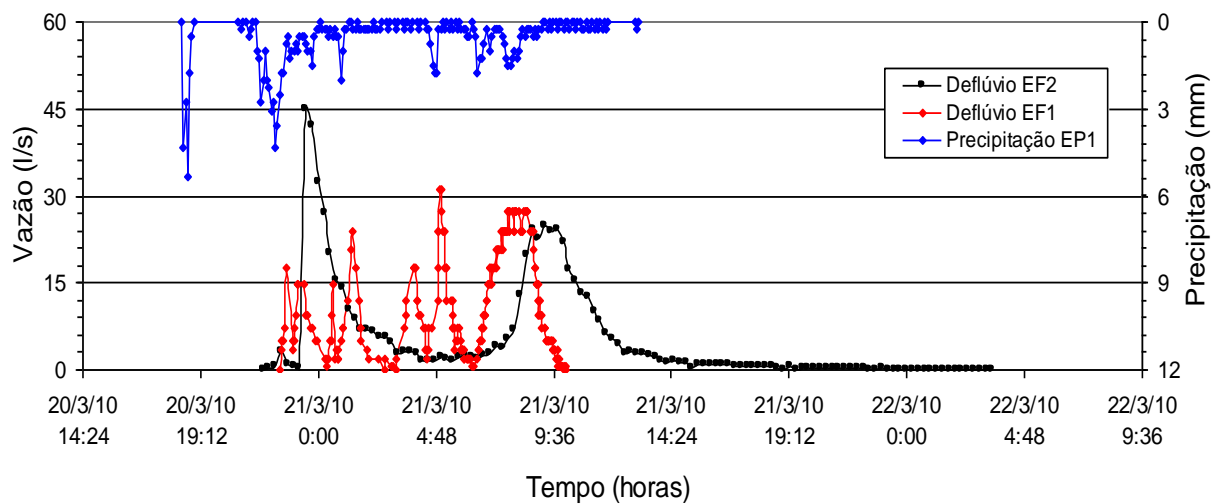
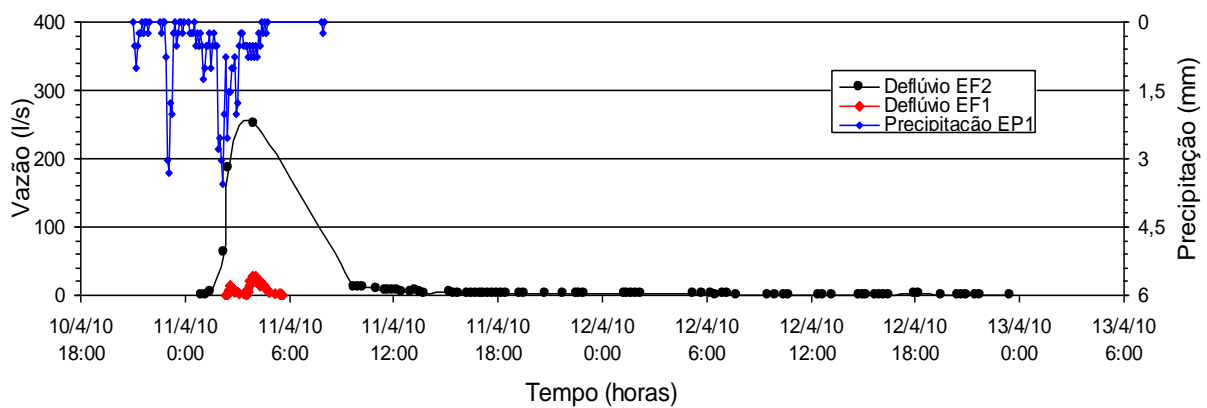


Figura 37 – Precipitação da EP1 a cada 5 min e hidrograma da EF1 a cada 5 min do evento chuva-deflúvio de 25/1/2010.

Para as medidas realizadas no dia 21/3/2010, os volumes escoados na EF1 e EF2 foram de 424 m<sup>3</sup> e 557 m<sup>3</sup>, respectivamente (Figura 38), já no dia 14/4/2010, os volumes escoados na EF1 e EF2 foram de 103 m<sup>3</sup> e 4.431 m<sup>3</sup>, respectivamente, Figura 39.



**Figura 38** – Precipitação da EP1 (a cada 5 min) e hidrograma da EF1 (a cada 5 min) e EF2 (a cada 15 min) do evento chuva-deflúvio de 21/3/2010.



**Figura 39** – Precipitação da EP1 (intervalo de 5 min) e hidrograma da EF1 (intervalo de 5 min) e EF2 (intervalo de 15 min) do evento chuva-deflúvio de 11/4/2010.

A diferença nas contribuições dos riachos pode ser explicada pelo fato de que o riacho principal no litotipo Formação Santarém é controlado por fraturas e/ou falha geológica na sua orientação N-S e E-W, enquanto o riacho secundário, não. Supõe-se que as fraturas provocam perdas em trânsito consideráveis no escoamento superficial durante o processo chuva-deflúvio (COSTA, 2007). Essa hipótese é reforçada pelas medidas das estações fluviométricas e pela observação de campo.



## 6 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido procurou estudar as condições de **início do escoamento superficial** em uma pequena bacia semiárida preservada, que mostrou ter uma dimensão conveniente para este tipo de estudos. Neste sentido, conclui-se que:

- As condições de infiltração e escoamento da BEA puderam ser analisadas em condições naturais e isentas de ação antrópicas;
- Por meio do monitoramento do nível d'água no açude Boqueirão, foi possível saber a lâmina escoada na BEA e analisar o coeficiente de deflúvio para a bacia, importante informação na gestão de bacias hidrográficas;
- É importante estabelecer um consenso na metodologia usada para a separação de eventos chuvosos, principalmente no caso de desejar fazer comparações hidrológicas;
- A maior intensidade em cinco minutos ( $I_5$ ) observada neste período foi de 170,70 mm/h, em um evento chuvoso que durou 2 horas e 50 minutos com total precipitado de 82,77 mm no dia 20/01/2005 e foi também aquele que apresentou a maior lâmina escoada: 2,16 mm do total precipitado na bacia.
- O coeficiente de runoff (CR) médio da BEA é baixo da ordem de 0,77%, com valor máximo de 2,61%;
- Não é possível avaliar se ocorrerá ou não escoamento com base apenas na precipitação total.
- A umidade média antecedente do solo foi a que apresentou melhor eficiência na separação dos eventos de escoamento, se comparada com as umidades medidas individualmente nas três estações. Entretanto essa informação combinada com a precipitação total na EP1, não consegue explicar nem 20% dos casos. Mas não deixa de ter sua importância, para os casos estudados, 47% dos eventos com escoamento ocorreram quando a umidade encontrava-se na faixa alta, 34% na faixa média e somente 19% na faixa baixa.
- Para a relação umidade *versus* intensidade, o melhor desempenho encontrado foi o da Figura 24 (e), com intensidade de 60 minutos, cuja eficiência foi de apenas 40%. Este valor aproxima-se do tempo de concentração da BEA, que é de aproximadamente 65 minutos;
- Analisando a umidade *versus* a distribuição temporal da precipitação, a intensidade  $I_{60}$ , foi aquela que separou mais eficientemente os eventos com e sem escoamento (51%)

- As condições em que nunca é gerado escoamento na BEA, região R-1 da Figura 27, são: a precipitação (EP1) é menor que 12,20 mm ou a intensidade da chuva ( $I_{60}$ ) igual ou menor 11,5 mm/h. A intensidade crítica (11,5 mm/h), portanto, situa-se entre a mediana (9 mm/h) e a média (25 mm/h) da Ksat da BEA.
- Na BEA, para ter início do escoamento superficial é necessário um evento de precipitação EP1 superior a 47,50 milímetros, independente de sua intensidade, que corresponde à Região R-3, da Figura 27. Os eventos que compõem a região R-3 somaram 75% da lâmina escoada na BEA para o período observado.
- Não foi possível separar todos os eventos com e sem escoamento, havendo uma região (região R-2 na Figura 27) em que ocorrem os dois tipos de eventos. Essa região no gráfico de precipitação *versus* intensidade  $I_{60}$  é caracterizada por ter precipitação entre 15,50 mm e 47,50 mm e intensidade ( $I_{60}$ ) igual ou maior que 11,5 mm/h. Nesta região encontra-se 25% do escoamento da BEA ocorrido no período estudado.
- Eventos com respostas hidrológicas semelhantes, ao serem representados numa escala relativa de precipitação *versus* tempo (Figura 31), mostraram comportamento semelhante.
- A distribuição temporal da precipitação é importante para entender a ocorrência do escoamento, que pode ser explicado pela função densidade de probabilidade, conforme exposto na Figura 27.
- Com as medidas de vazão realizadas na EF1 e EF2, é possível afirmar que existe grande diferença no escoamento entre as duas bacias BEA1 e BEA2;
- Os resultados encontrados fornecem elementos importantes sobre o início do escoamento superficial em microbacias semiáridas de escoamento efêmero, servindo de base para guiar pesquisas futuras com enfoque sobre esse tema, ou servir de auxílio para outros temas ligados à hidrologia de regiões semiáridas.
- A investigação realizada levanta ainda algumas questões pertinentes para futura investigação e que não foram possíveis de avaliar completamente no âmbito deste estudo, como o caso do uso da função densidade de probabilidade para mais eventos.

## 7. BIBLIOGRAFIA

AGUIAR, L. S. G. **Estimativa do escoamento superficial a partir de testes da infiltração potencial na Bacia do Ribeirão Itaim, Taubaté – SP.** 2004. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Departamento de Ciências Agrárias, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2004.

ALENCAR D. B. S. de; *et al.* **Influência da Precipitação no Escoamento Superficial em uma Microbacia Hidrográfica do Distrito Federal.** Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.1, p.103-112, jan./abr. 2006.

ARAÚJO, L. C. Macêdo de. **Análise da Susceptibilidade à Erosão dos Solos as Estação Ecológica da Aiuaba – CE.** 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE.

ARAÚJO, J. C.; BELO, P.; SILVA, R.; GERMANO, C.; FREITAS, M.; MEDEIROS, P. H. A. (2004) **Bacia experimental de Aiuaba, Ceará.** In: RIGHETTO, A. M. (org.) *Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido.* Relatório Técnico, FINEP/FUNPEC, Natal.

BASSREI, Amin. **Inversão de Dados Geofísicos Unidimensionais Através da Entropia Relativa Mínima.** Tese Submetida como requisito ao grau de Doutor em Ciências Geofísicas. Universidade Federal da Bahia. 1990

BELO, P. S. do Carmo. **Proposta de Zoneamento da Área de Amortecimento de uma Unidade de Conservação: Estudo de Caso, ESEC de Aiuaba, CE.** 2007. Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente/PRODEMA-UFC. Fortaleza – CE.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação.** Florianópolis: Ed. da UFSC, 1994. 112p.

BORSATO, F. H.; MARTONI, A. M. **Estudo da Fisiografia das Bacias Hidrográficas Urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná.** Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v24n2/v24n2a24.pdf>>. Acesso: 25 de novembro de 2006.

CAMMERAAT, L.H. **Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain.** (2004). Agriculture, Ecosystems and Environment, 104(2), 317-332.)

CARVALHO, N. O. **Hidrosedimentologia prática.** CPRM, Rio de Janeiro, 372p.

CASANELLAS, J. P, REGUERÍN, M. López-Acevedo. **Agenda de campo de suelos: información de suelos para la agricultura y el medio ambiente.** Mundi Prensa Libros S.A. ISBN: 84-8476-231-9. 2005.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology.** McGRAWHILL International Editions: Civil Engineering Series. 1988. 572 p.

COLLARES, E. G. **Avaliação de Alterações em Redes de Drenagem de Microbacias Como Subsídios ao Zoneamento Geoambiental de Bacias Hidrográficas: Aplicação na Bacia Hidrográfica do Rio Capivari – SP.** 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.

COSTA, J. B. (1999), **Caracterização e constituição do solo.** 6ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 527 p

COSTA, Alexandre Cunha. **Comunicação Pessoal.** 2010.

COSTA, A. C. **Hidrologia em uma Bacia Experimental em Caatinga Conservada no Semi-árido Brasileiro.** 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE. 2007.

FARIAS, T. R. L. ; ARAUJO, J. C. . **Hidrologia e sedimentologia comparada de pequenas bacias em região tropical sub-úmida no Ceará.** In: IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador. Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008.

FERREIRA, A. J. D. **Processos hidrológicos e hidroquímicos em Povoamentos de *Eucalyptus globulus Labill.* E *Pinus Pinaster Aiton.*** Dissertação apresentada para obtenção do grau de Doutor no ramo de Ciências aplicadas ao Ambiente. Aveiro: Departamento de Ambiente e Ordenamento. 1996.

FURTUNATO, O. M. **Simulação Hidrológica na Bacia do Alto Paraíba com efeito da Variabilidade do Clima.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 133 p. 2004.

GROTTKER, M. **Runoff quality from a street with medium traffic loading.** Sci. Total Environ. v. 59, p. 457-466, 1987.

INETI (2009). **Sistema nacional de informação geocientífica** - léxico de termos hidrogeológicos.e-geo.ineti.pt.

ISTOK, J.D.; BOERSMA, L. **Effect of antecedent rainfall on runoff during low-intensity rainfall.** Journal of Hydrology, Amsterdam, v.88, p.329-42, 1986.

LIMA, Y. C. P.; LIMA NETO, I. E.; ARAUJO, J. C. **Análise Ex-Post do Assoreamento de um Pequeno Reservatório: Estudo de Caso Açude Boqueirão, Aiuaba, Ceará.** In Anais: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 2010.

LIMA NETO, I. E; WIEGAND, M. C., ARAUJO, J. C. **Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin.** Hydrological Sciences Journal, 2011. Aceito.

LOPES, J. W. B. ; COSTA, C. A. G. ; PINHEIRO, E. A. R. ; TOLEDO, C. E. ; ARAUJO, J. C. **Calibração in loco de sensor de umidade do solo sob vegetação de caatinga preservada.** In: FURLANI; C. E. A.; SILVA, R. P.; ROSALÉN, D. L.; SILVA, J. G. F.; REIS, E. F.; VENTURIM, J. B.. (Org.). A Engenharia Agrícola e o Desenvolvimento das Propriedades Familiares. 1 ed. Vitória: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2010a, v. 1.

LOPES, J. W. B. ; COSTA, C. A. G. ; ARAUJO, J. C.; PINHEIRO, E. A. R. **MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM BACIAS SEMIÁRIDAS II: análise da sazonalidade espaço - temporal da umidade do solo.** In Anais: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 2010b.

MEDEIROS. P. H. A. **Medida e modelagem da interceptação em uma bacia experimental do semi-árido.** Dissertação. (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE. 2005.

MEDEIROS. P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas.** Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE. 2009.

MEDEIROS, J. B. Leal de Pontes. **Zoneamento fito - ecológico da estação ecológica de aiuaba – uma contribuição à Educação ambiental e à pesquisa científica.** 2004. 141p. Dissertação (Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MELLO, C. R. de; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; LOPES, D. **Abstração inicial da precipitação em micro bacia hidrográfica com escoamento efêmero.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.7, n.3, p.494-500, 2003.

MOURA, Eulina M. de, MEDEIROS, Victor M. de A. **Diferenças em microescala no regime de precipitação no nordeste: litotal e semi-árido.** In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB, 2005.

MORAIS, M. Fonseca de. **Estimativa do Balanço Hídrico na Bacia Experimental/Representativa de Santa Maria/Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ.** 2007. 251f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MOREIRA, D. W. **Intensidade máximas de chuvas e sua influência na vazão máxima e sedimentação do Ribeirão Itaim, Taubaté – SP.** 2005. 160f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005.

PATO, R. L. S. **Bacia Hidrográfica da Ribeira dos Covões. Variáveis biofísicas e evolução do uso do solo no período 1958-2002.** Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Geociências (especialidade em Ambiente e Ordenamento do Território). Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. 2007.

PINHEIRO, E. A. R.; ARAUJO, J. C.; COSTA, C. A. G.; LOPES, J. W. B. **MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DE BACIAS SEMIÁRIDAS I: Avaliação *in Situ* da Profundidade Efetiva de Raízes da Caatinga.** In Anais: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 2010.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial.** Viçosa: UFV, 2ª. Edição, 2004, 87p.

REICHARDT, Klaus. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1987. 186 p.

REIS, L. F. R. **Escoamento superficial.** Notas de hidrologia e recursos hídricos. Disponível em: <<http://www.shs.eesc.usp.br/graduacao/disciplinas/shs403/download/escoamento-superficial.pdf>>, 25 de maio de 2009.

RIGHETTO, A. M. (2004). **O Projeto IBESA. Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido.** Relatório Técnico, Convênio FINEP/FUNPEC 22010453-00.

SETZER, J.; PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal, nas condições do estado de São Paulo.** Boletim Técnico DAEE, São Paulo, v. 2, p.81-104, 1979.

SHANNON, C. E., and WEAVER, W., 1949, **The Mathematical Theory of Communication.** The University of Illinois Press. Urbana. 1948. 125 p.

SHI Z.-H., CHEN L.-D., *et al.* **Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China (2009) *Catena*, 77 (1), pp. 1-7.**

SILVA, C. O. A. **Análise de Modelos de Escoamento Aplicados a Águas Superficiais e Subterrâneas**. 2007. 80f. Dissertação (Recursos Hídricos). Universidade do Algarve, Faro.

SILVA, P. M. O et al. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 258-265, 2008.

SILVA, J. Alves. **Estimativa de crescimento em altura de Leucena [Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit.] por meio do Modelo ARIMA**. 2008. 64 f. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE.

TONELLO, Kelly Cristina. **Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. 2005. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed.UFRGS, 2000.

TUCCI, Carlos E. M, SILVEIRA, André L. L. da. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 2004, 943p.

VERÍSSIMO, C. (2007) **Relatório Preliminar da Geologia da Bacia Experimental de Aiuaba**. Fortaleza: Grupo de Pesquisa Hidro-Sedimentologia do Semi-Árido, 6 p.

VILLELA, S. M.; Mattos, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245p.

WIEGAND, M. C. *et al.* **Estimativa da produção de sedimentos em uma bacia experimental usando modelos empíricos**. In: Anais do VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Campo Grande – MS. 2008.

WIEGAND, M. C. **Proposta metodológica para estimativa da produção de sedimentos em grandes bacias hidrográficas: estudo de caso Alto Jaguaribe, CE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Federal Universidade do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. 2009.



WORRALL F., BURT T.P., ADAMSON J.K. **Change in runoff initiation probability over a severe drought in a peat soil - Implications for flowpaths.** (2007) *Journal of Hydrology*, 345 (1-2), pp. 16-26

## ANEXOS

### Anexo A – Análise granulométrica do solo nas proximidades da estação EP1

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO  
Com dispersor e Com defloculante

EP1		RESUMO DA SEDIMENTAÇÃO			AMOSTRA 1
UMIDADE DA SEDIMENTAÇÃO					( % )
CAPSULA No.	1	PEDREGULHO	ACIMA DE 4,8	mm	0
PESO BRUTO UMIDO(g)	50,00	AREIA GROSSA	4,8 - 2,00	mm	0
PESO BRUTO SECO(g)	50,00	AREIA MÉDIA	2,00 - 0,42	mm	15
PESO DA CAPSULA(g)	13,18	AREIA FINA	0,42 - 0,074	mm	20
PESO DA AGUA(g)	0,00	SILTE	0,074 - 0,005	mm	54
PESO DO SOLO SECO(g)	36,82	ARGILA	ABAIXO DE 0,005	mm	11
UMIDADE(%)	0,00	ARGILA COLOIDAL	ABAIXO DE 0,001	mm	xxx

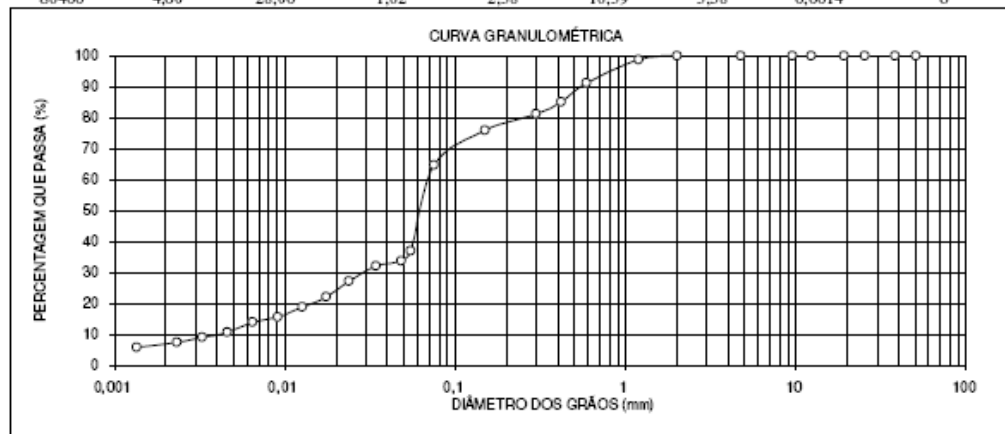
  

AMOSTRA SECA		PENEIRAMENTO DO SOLO GRAUDO					
	AM.TOTAL	AM.PARC.	PENEIRA POLEG. mm	PESO(g) RETIDO	PESO(g) PASSA	% PASSA AM. TOTAL	
CAPSULA No.	1	2	2"	50,80	0,00	1000,00	100
PESO SOLO UMIDO(g)	1000,00	100,00	1 1/2"	38,10	0,00	1000,00	100
PESO PEDREG.(g)	0		1"	25,40	0,00	1000,00	100
P.S.MIUDO UMIDO(g)	1000	-	3/4"	19,10	0,00	1000,00	100
P.S. MIUDO SECO(g)	1000,00	-	1/2"	12,27	0,00	1000,00	100
P. AMOSTRA SECA(g)	1000,00	100,00	3/8"	9,52	0,00	1000,00	100
CTE. DO FATOR K	-	1,641	No. 4	4,76	0,00	1000,00	100
DENSIDADE A 20 °C		2,56	No. 10	2,00	0,00	1000,00	100

PENEIRAMENTO DO SOLO MIUDO				
PENEIRA POLEGADA	mm	PESO(g) RETIDO	PESO(g) PASSA	% PASSA AM. TOTAL
No. 16	1,19	1,24	98,76	99
No. 30	0,590	7,48	91,28	91
No. 40	0,420	6,13	85,15	85
No. 50	0,297	3,92	81,23	81
No. 100	0,149	5,23	76,00	76
No. 200	0,075	11,26	64,74	65

#### SEDIMENTAÇÃO

DENSIMETRO No.: 1					PROVETA No.: 1			
TEMPO DECORRIDO s	LEITURA (L)	TEMPERAT. (o C)	CORREC. MEIO DISPERSOR	LEITURA CORRIGIDA	ALT. DE QUEDA (cm)	LEIT. COR. FINAL	"d" DOS GRAOS (mm)	% <d AM. TOTAL(Q)
30	23,00	28,00	1,62	21,38	14,02	22,58	0,0548	37
60	21,00	28,00	1,62	19,38	14,37	20,58	0,0480	34
120	20,00	28,00	1,62	18,38	14,54	19,58	0,0341	32
240	17,00	28,00	1,62	15,38	14,14	16,58	0,0238	27
460	14,00	28,00	1,62	12,38	14,66	13,58	0,0175	22
900	12,00	28,00	1,62	10,38	15,01	11,58	0,0127	19
1800	10,00	28,00	1,62	8,38	15,36	9,58	0,0091	16
3600	9,00	28,00	1,62	7,38	15,53	8,58	0,0064	14
7200	7,00	28,00	1,62	5,38	15,87	6,58	0,0046	11
14400	6,00	28,00	1,62	4,38	16,05	5,58	0,0033	9
28800	5,00	28,00	1,62	3,38	16,22	4,58	0,0023	8
86400	4,00	28,00	1,62	2,38	16,39	3,58	0,0014	6



Anexo B – Análise granulométrica do solo nas proximidades da estação EP2

ANALISE GRANULOMETRICA POR SEDIMENTAÇÃO  
Com dispersor e Com defloculante

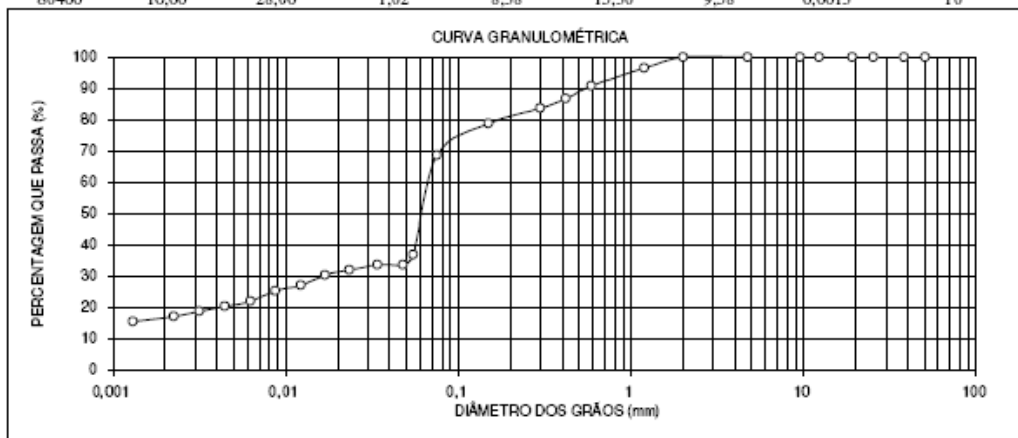
EP2		RESUMO DA SEDIMENTAÇÃO			AMOSTRA 1
UMIDADE DA SEDIMENTAÇÃO					(%)
CAPSULA No.	1	PEDREGULHO	ACIMA DE 4,8	mm	0
PESO BRUTO UMIDO(g)	50,00	AREIA GROSSA	4,8 - 2,00	mm	0
PESO BRUTO SECO(g)	50,00	AREIA MÉDIA	2,00 - 0,42	mm	13
PESO DA CAPSULA(g)	13,18	AREIA FINA	0,42 - 0,074	mm	18
PESO DA AGUA(g)	0,00	SILTE	0,074 - 0,005	mm	48
PESO DO SOLO SECO(g)	36,82	ARGILA	ABAIXO DE 0,005	mm	21
UMIDADE(%)	0,00	ARGILA COLOIDAL	ABAIXO DE 0,001	mm	xxx

AMOSTRA SECA			PENEIRAMENTO DO SOLO GRAUDO					
	AM.TOTAL	AM.PARC.	POLEG.	mm	PESO(g) RETIDO	PESO(g) PASSA	% PASSA AM. TOTAL	
CAPSULA No.	1	2	2"		50,80	0,00	1000,00	100
PESO SOLO UMIDO(g)	1000,00	100,00	1 1/2"		38,10	0,00	1000,00	100
PESO PEDREG.(g)	0	-	1"		25,40	0,00	1000,00	100
P.S.MIUDO UMIDO(g)	1000	-	3/4"		19,10	0,00	1000,00	100
P.S. MIUDO SECO(g)	1000,00	-	1/2"		12,27	0,00	1000,00	100
P. AMOSTRA SECA(g)	1000,00	100,00	3/8"		9,52	0,00	1000,00	100
CTE. DO FATOR K	-	1,637	No. 4		4,76	0,00	1000,00	100
DENSIDADE A 20 °C		2,57	No. 10		2,00	0,00	1000,00	100

PENEIRAMENTO DO SOLO MIUDO				
POLEGADA	mm	PESO(g) RETIDO	PESO(g) PASSA	% PASSA AM. TOTAL
No. 16	1,19	3,44	96,56	97
No. 30	0,590	5,62	90,94	91
No. 40	0,420	4,25	86,69	87
No. 50	0,297	2,92	83,77	84
No. 100	0,149	4,90	78,87	79
No. 200	0,075	10,17	68,70	69

DENSIMETRO No.: 1				PROVETA No.: 1			
TEMPO DECORRIDO	LEITURA (L)	TEMPERAT. (o C)	CORREC. MEIO DISPERSOR	LEITURA CORRIGIDA	ALT. DE QUEDA (cm)	LEIT. COR. FINAL	% d AM. TOTAL(Q)
30	23,00	28,00	1,62	21,38	14,02	22,58	0,0546
60	21,00	28,00	1,62	19,38	14,37	20,58	0,0479
120	21,00	28,00	1,62	19,38	14,37	20,58	0,0338
240	20,00	28,00	1,62	18,38	13,63	19,58	0,0233
460	19,00	28,00	1,62	17,38	13,80	18,58	0,0169
900	17,00	28,00	1,62	15,38	14,14	16,58	0,0123
1800	16,00	28,00	1,62	14,38	14,32	15,58	0,0087
3600	14,00	28,00	1,62	12,38	14,66	13,58	0,0062
7200	13,00	28,00	1,62	11,38	14,84	12,58	0,0044
14400	12,00	28,00	1,62	10,38	15,01	11,58	0,0032
28800	11,00	28,00	1,62	9,38	15,18	10,58	0,0022
86400	10,00	28,00	1,62	8,38	15,36	9,58	0,0013



## Anexo C – Análise granulométrica do solo nas proximidades da estação EP3

### ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR SEDIMENTAÇÃO Com dispersor e Com defloculante

EP2		AMOSTRA 1					
UMIDADE DA SEDIMENTAÇÃO		RESUMO DA SEDIMENTAÇÃO (%)					
CAPSULA No.	1	PEDREGULHO	ACIMA DE 4,8	mm	0		
PESO BRUTO UMIDO(g)	50,00	AREIA GROSSA	4,8 - 2,00	mm	0		
PESO BRUTO SECO(g)	50,00	AREIA MÉDIA	2,00 - 0,42	mm	34		
PESO DA CAPSULA(g)	13,18	AREIA FINA	0,42 - 0,074	mm	27		
PESO DA AGUA(g)	0,00	SILTE	0,074 - 0,005	mm	35		
PESO DO SOLO SECO(g)	36,82	ARGILA	ABAIXO DE 0,005	mm	4		
UMIDADE(%)	0,00	ARGILA COLOIDAL	ABAIXO DE 0,001	mm	xxx		
AMOSTRA SECA		PENEIRAMENTO DO SOLO GRAUDO					
	AM.TOTAL	AM.PARC.	PENEIRA	PESO(g)	PESO(g)	% PASSA	
			POLEG.	mm	RETIDO	PASSA	AM. TOTAL
CAPSULA No.	1	2	2"	50,80	0,00	1000,00	100
PESO SOLO UMIDO(g)	1000,00	100,00	1 1/2"	38,10	0,00	1000,00	100
PESO PEDREG.(g)	0	-	1"	25,40	0,00	1000,00	100
P.S.MIUDO UMIDO(g)	1000	-	3/4"	19,10	0,00	1000,00	100
P.S. MIUDO SECO(g)	1000,00	-	1/2"	12,27	0,00	1000,00	100
P. AMOSTRA SECA(g)	1000,00	100,00	3/8"	9,52	0,00	1000,00	100
CTE. DO FATOR K	-	1,637	No. 4	4,76	0,00	1000,00	100
DENSIDADE A 20 °C	-	2,57	No. 10	2,00	0,00	1000,00	100

PENEIRA		PESO(g)		% PASSA	
POLEGADA	mm	RETIDO	PASSA	AM. TOTAL	
No. 16	1,19	6,13	93,87	94	
No. 30	0,590	19,89	73,98	74	
No. 40	0,420	7,88	66,10	66	
No. 50	0,297	4,55	61,55	62	
No. 100	0,149	6,66	54,89	55	
No. 200	0,075	15,77	39,12	39	

### SEDIMENTAÇÃO

DENSIMETRO No.: 1				PROVETA No.: 1				
TEMPO DECORRIDO	LEITURA (L)	TEMPERAT. (o C)	CORREC. MEIO DISPERSOR	LEITURA CORRIGIDA	ALT. DE QUEDA (cm)	LEIT. COR. FINAL	"d" DOS GRAOS (mm)	% <d AM. TOTAL(Q)
s								
30	12,00	28,00	1,62	10,38	15,92	11,58	0,0582	19
60	10,00	28,00	1,62	8,38	16,27	9,58	0,0509	16
120	8,00	28,00	1,62	6,38	16,62	7,58	0,0364	12
240	7,00	28,00	1,62	5,38	15,87	6,58	0,0251	11
460	6,00	28,00	1,62	4,38	16,05	5,58	0,0183	9
900	5,00	28,00	1,62	3,38	16,22	4,58	0,0131	7
1800	4,00	28,00	1,62	2,38	16,39	3,58	0,0093	6
3600	3,00	28,00	1,62	1,38	16,57	2,58	0,0066	4
7200	3,00	28,00	1,62	1,38	16,57	2,58	0,0047	4
14400	3,00	28,00	1,62	1,38	16,57	2,58	0,0033	4
28800	3,00	28,00	1,62	1,38	16,57	2,58	0,0023	4
86400	2,00	28,00	1,62	0,38	16,74	1,58	0,0014	3

