



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento – PPGRHS

Cidade Universitária – Campus A. C. Simões
Cidade Universitária – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas



SERGIO RENATO ÁVILA GLASHERSTER DA ROCHA

*SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA EXPERIMENTAL
DE SANTANA DO IPANEMA*

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MACEIÓ-AL

2008

SERGIO RENATO ÁVILA GLASHERSTER DA ROCHA

***SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA
EXPERIMENTAL DE SANTANA DO IPANEMA***

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, na área de concentração em Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientadora: **Cleuda Custódio Freire**

Co-Orientador: **Vladimir Caramori Borges de Souza**

MACEIÓ-AL

2008

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

R672s Rocha, Sergio Renato Ávila Glasherster da.
Simulação do escoamento superficial na bacia experimental de Santana do Ipanema / Sergio Renato Ávila Glasherster da Rocha, 2008.
xi, 133 f. : il.

Orientadora: Cleuda Custódio Freire.
Co-Orientador: Vladimir Caramori Borges de Souza.
Dissertação (mestrado em Engenharia : Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2008.

Bibliografia: f. 112-124.
Anexos: f. 125-133.

1. Bacia hidrográfica experimental. 2. Semi-árido – Alagoas. 3. Modelagem computacional. 4. Kineros2. 5. REHISA. I. Título.

CDU: 556.51



Membros da **BANCA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO** de Mestrado do Engenheiro Civil Sérgio Renato Ávila da Rocha tendo como título: "Simulação do escoamento superficial na bacia experimental de Santana do Ipanema" apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas, no dia 31 de outubro de 2008, na sala de aula de mestrado do PPGRHS/CTEC/UFAL.

MEMBROS DA BANCA:

Profa. Cleuda Custódio Freire (UFAL)
(Orientador)

Prof. Vladimir Caramori Borges de Souza (UFAL)
(Co-orientador)

Prof. Carlos de Oliveira Galvão (UFCG)

Prof. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves (UFAL)

Prof. Valmir de Albuquerque Pedrosa (UFAL)

AGRADECIMENTOS

Nesse momento tão importante, é necessário fazer alguns agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Primeiramente a Deus por ter me dado toda a paz, saúde e capacidade necessária para que eu chegasse até aqui, além de ter posto em minha vida os melhores pais e a melhor companheira que alguém pode ter.

Aos meus pais por terem me ensinado tantos valores e por terem me dado a base necessária para poder alcançar meus objetivos.

À minha avó (em memória) por ter me ensinado o sentido das palavras bondade e humildade, e a meu avô (em memória), por ter me ensinado a ter garra e ser perseverante.

À minha namorada Mari, por ter aparecido como um anjo em minha vida, iluminando-a e me fazendo a pessoa mais feliz do mundo.

Aos meus orientadores, Cleuda e Vladimir, por confiarem em mim na elaboração desse trabalho, e me darem oportunidade de aprender cada dia mais.

Ao professor Celso Piatti, pelo intenso apoio e confiança que demonstrou por mim em todos os momentos e pela sua grande amizade.

Aos demais professores do PPGRHS, em especial à professora Rosangela, pela atenção sempre dada.

A todos os colegas de Mestrado, em especial Claudionor, João de Lima, Hugo e Léo.

Ao pessoal da SEMARH, que me ensina a crescer profissionalmente: Lôbo, Fábio, Gino, Damaris, Jorge, Marcos Paulo, Fabiana, Catarina, Jamerson e Wilton.

Ao pessoal da SEMARH, das farras nossas de cada dia: Aline, Aurélio, Dani, Nanda, Faião, Janaína, Juliana, Miss, Ivson, Júlio, João André, Luciana, Rosane e Roberta, dentre outros.

À Gessica e à Adriana, pela ajuda em momentos importantes, e aos demais professores e pesquisadores da UFRPE que nos ajudaram na construção de equipamentos.

A todos que estiveram conosco em Santana, seja na logística (Edvan e todo o pessoal do Ferrageiro, pessoal da pizzaria, seu Zé do Xokantis, Ademir) ou ralando em campo (Baixinho, seu Francisco).

Aos que cederam parte de sua propriedade para nos ajudar: seu Amâncio, seu José, seu Francisco e seus familiares.

À Gabi, ao Natalino e à Adriana, pela ajuda em campo e na vida social em Santana.

À Magaly, por compartilhar todos os momentos, tanto os fáceis como os difíceis, no campo e no curso, com o mesmo objetivo de buscar o sucesso.

À Simone e ao Henrique, pela ajuda nas atividades e por almejarem sempre o melhor, no trabalho e na vida, e pela amizade.

Ao pessoal da nova turma do projeto, que está dando continuidade de uma maneira brilhante àquilo que começamos.

Ao Jerônimo, pelo empréstimo da estação total, e ao Carlão, pela ajuda no levantamento topográfico.

Ao pessoal do Laboratório de Recursos Hídricos, em especial a Helen e a Geiza, pelas tardes de resenha na UFAL.

Ao Marcos, do Laboratório de Solos, pela ajuda nas análises

Ao Marquinhos, por propiciar um bom ambiente a todos do CTEC.

Enfim, a todos que estiveram em minha vida e que me apoiaram nesses dois anos e meio de mestrado e a todos os amigos de verdade que sempre confiaram e contaram comigo mesmo quando eu precisava me dedicar a outras coisas.

Além disso, importante é também agradecer à FINEP, pelo apoio financeiro ao projeto "Bacias Experimentais e Representativas da Rede de Hidrologia do Semi-Árido: UFAL (BEER/UFAL)", através do edital MCT/FINEP/CT-HIDRO – Bacias Representativas – 04/2005, e à CAPES pela concessão de bolsa de estudos durante o desenvolvimento do mestrado.

RESUMO

O semi-árido alagoano, ocupando 45,6% do Estado, apresenta uma distribuição irregular de precipitação, solos rasos e altas taxas de evaporação, sendo necessário conhecer de maneira mais precisa seus processos hidrológicos e a relação entre eles para que seja aprimorada a gestão dos recursos hídricos da região. O objetivo desse trabalho foi simular o escoamento superficial para diferentes cenários de uso e ocupação do solo na Bacia Experimental de Santana do Ipanema (BESI), localizada na Bacia Hidrográfica do Riacho Gravatá (BHRG). Para isso, foi implantada a BESI, composta por três unidades de estudo: duas sub-bacias, de 3,35 e 0,09 km², e uma microbacia de 5.000 m². Aplicou-se o modelo chuva-vazão-erosão Kíneros2 para nove eventos de precipitação ocorridos durante 2007 e 2008, na BHRG e na sub-bacia maior da BESI. No cenário atual de uso e ocupação do solo, o coeficiente de deflúvio da BHRG variou de 0,02 a 0,55, com um valor médio de 0,27%, enquanto para a sub-bacia da BESI a faixa de variação foi de 0,05 a 0,69, com valor médio de 0,25. Foi constatado que os parâmetros de maior sensibilidade são o grau de capilaridade (G), a condutividade hidráulica saturada (Ks) e o coeficiente de Manning (n). O valor médio do coeficiente de deflúvio para os eventos estudados variou em cerca de 40% quando se modificou a condição inicial de umidade do solo na faixa de 10% a 90%, para ambas as bacias. Na análise de cenários de uso e ocupação do solo, para a BHRG, uma condição de desmatamento total apresentou um coeficiente de deflúvio médio de 0,59 enquanto uma condição de caatinga apresentou um valor de 0,08 para esse coeficiente. Na sub-bacia da BESI esse coeficiente foi de 0,64 e 0,14, respectivamente, para as mesmas condições. Com isso, percebe-se, a partir da análise desses valores, que nas duas bacias estudadas um efeito desmatamento do solo conduz a um acréscimo considerável no volume escoado, contribuindo ainda mais para a escassez hídrica da região.

Palavras-chave: Semi-árido; Bacia Experimental; Kíneros2; REHISA; Hidrologia

ABSTRACT

The semiarid region of Alagoas, that occupies 45,6% of State, presents an irregular distribution of rain, shallow soils and high evaporation taxes, being necessary to know with more accuracy the hydrological processes and the relations between them to improved the water resources management of the region. The aim of this study was to simulate surface runoff for different land occupation and use scenarios in the Experimental Basin of Santana do Ipanema (BESI), located in the Gravata Creek Watershed (BHRG). For this reason, the BESI was deployed, composed by three units of study: two sub-basins of 3,35 and 0,09 km², and a microbasin of 5.000 m². It was applied the runoff and erosion model Kineros2 for nine rain events occurred during 2007 and 2008 in the BHRG and in the largest sub-basin in the BESI. In the current scenario of land occupation and use, the runoff coefficient value ranged from 0,02 to 0,55 for the BHRG, with an average of 0,27, while for the sub-basin of the BESI the range of variation was from 0,05 to 0,69, with average value of 0,25. It was found that the parameters of largest sensibility are: mean capillarity degree (G), saturated hydraulic conductivity (Ks) and Manning's coefficient (n). The average value of runoff coefficient for the studied events ranged around 40%, when the initial condition of soil humidity was modified between 10% and 90%, for both basins. In land occupation and use scenarios analysis, for the BHRG, a total deforestation condition had a average runoff coefficient of 0,59 while for a caatinga condition the value was 0,08. In the BESI, the runoff coefficient was 0,64 and 0,14, respectively, for the same conditions. From the analysis of these values, was concluded that in two studied basins the effect of land deforestation leads to a considerable increase in runoff volume, contributing further to water scarcity in the region.

Keywords: Semi-arid; Experimental basin; Kineros2; REHISA; Hydrology

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
2 ESTUDOS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO	5
2.1 SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO E ALAGOANO	5
2.2 BACIAS EXPERIMENTAIS E REPRESENTATIVAS DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO.....	8
2.3 MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO SEMI-ÁRIDO	11
2.3.1 <i>Trabalhos anteriores</i>	11
2.3.2 <i>Modelo Kineros2</i>	14
2.3.2.1 Modelagem da infiltração.....	16
2.3.2.2 Modelagem do escoamento superficial no plano.....	19
2.3.2.3 Modelagem do escoamento superficial nos canais	20
2.3.2.4 Modelagem do armazenamento.....	21
2.3.2.5 Consideração da precipitação.....	22
2.3.2.6 Parâmetros utilizados no modelo Kineros2	22
3 APRESENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	26
3.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPANEMA	26
3.2 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO GRAVATÁ.....	29
3.2.1 <i>Caracterização Geral do Município de Santana do Ipanema</i>	31
3.2.2 <i>Relevo</i>	32
3.2.3 <i>Pedologia</i>	35
3.2.4 <i>Geologia</i>	38
3.2.5 <i>Geomorfologia</i>	38
3.2.6 <i>Cobertura vegetal e uso do solo</i>	41
3.2.7 <i>Caracterização climatológica histórica</i>	45
3.2.7.1 Histórico do monitoramento na região	45
3.2.7.2 Precipitação.....	46
3.2.7.3 Temperatura	47
3.2.7.4 Umidade relativa do ar	47

3.2.7.5	Evapotranspiração	48
3.2.7.6	Balanço hídrico	49
4	IMPLANTAÇÃO DA BACIA EXPERIMENTAL DE SANTANA DO IPANEMA ...	50
4.1	ESCOLHA DAS UNIDADES DE ESTUDO	50
4.1.1	<i>Critérios propostos</i>	50
4.1.2	<i>Dificuldades encontradas</i>	51
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES DE ESTUDO	53
4.2.1	<i>Sub-bacias</i>	53
4.2.2	<i>Microbacia</i>	61
4.3	IMPLANTAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	62
4.3.1	<i>Estação climatológica compacta</i>	62
4.3.2	<i>Pluviógrafos e pluviômetros</i>	64
4.3.3	<i>Tanques evaporimétricos</i>	65
4.3.4	<i>Linígrafos</i>	65
4.3.5	<i>Dificuldades encontradas</i>	66
5	APLICAÇÃO DO MODELO CHUVA-VAZÃO	68
5.1	DISCRETIZAÇÃO DAS BACIAS	68
5.1.1	<i>Bacia hidrográfica do riacho Gravatá</i>	69
5.1.2	<i>Sub-bacias</i>	71
5.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS	72
5.2.1	<i>Parâmetros relacionados ao tipo de solo</i>	72
5.2.2	<i>Parâmetros relacionados à cobertura vegetal e ao uso do solo</i>	76
5.2.3	<i>Outros parâmetros</i>	78
5.3	DETERMINAÇÃO DOS EVENTOS DE CHUVA A SEREM MODELADOS	78
5.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS	87
5.5	CENÁRIOS CONSIDERADOS	88
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
6.1	SIMULAÇÃO DOS EVENTOS	90
6.2	INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO DE DISCRETIZAÇÃO	95
6.3	INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO INICIAL DO SOLO	98
6.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS	100
6.5	CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	103
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	109
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
	Apêndice A	125
	Apêndice B	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Localização e delimitação do semi-árido brasileiro.....	6
Figura 02. Localização do ecossistema semi-árido em Alagoas.....	8
Figura 03. Diagrama representativo do Kíneros2.....	16
Figura 04. Localização da bacia hidrográfica do rio Ipanema.....	27
Figura 05. Isoietas médias anuais na bacia hidrográfica do rio Ipanema.....	28
Figura 06. Localização da bacia do riacho Gravatá na bacia do rio Ipanema.....	30
Figura 07. Modelo digital do terreno – bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	32
Figura 08. Visualização 3D da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	33
Figura 09. Freqüências altimétricas na bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	33
Figura 10. Curvas de nível da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	34
Figura 11. Curva hipsométrica da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	34
Figura 12. Histograma de declividades na bacia hidrográfica do riacho Gravatá...	35
Figura 13. Mapa pedológico da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	36
Figura 14. Exemplo de afloramentos de rocha na unidade RLe7.....	38
Figura 15. Mapa geológico da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	39
Figura 16. Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	40
Figura 17. Caatinga natural.....	41
Figura 18. Caatinga na época seca.....	41
Figura 19. Cobertura nativa restrita aos ambientes de serra.....	42
Figura 20. Região de mata ciliar antropizada.....	42
Figura 21. Mapa de cobertura vegetal da bacia hidrográfica do riacho Gravatá....	43
Figura 22. Associação da pastagem com a vegetação natural.....	44
Figura 23. Agricultura de subsistência na bacia.....	44
Figura 24. Precipitação média histórica em Santana do Ipanema.....	46
Figura 25. Valores médios de temperatura em Santana do Ipanema.....	47
Figura 26. Valores médios de umidade em Santana do Ipanema.....	48
Figura 27. Valores médios de evapotranspiração em Santana do Ipanema.....	48
Figura 28. Balanço hídrico em Santana do Ipanema.....	49
Figura 29. Planícies de inundação.....	52
Figura 30. Presença de rochas nos leitos de cursos d'água.....	52
Figura 31. Trechos das estradas suscetíveis à inundação.....	53
Figura 32. Localização das unidades de estudo na BHRG.....	54
Figura 33. MDT das sub-bacias.....	56

Figura 34. Curvas de nível das sub-bacias.....	56
Figura 35. Visão panorâmica do exutório da sub-bacia 01	57
Figura 36. Região aluvionar de monitoramento do aquífero	57
Figura 37. Dimensões da calha Parshall	59
Figura 38. Calha Parshall da sub-bacia 02.....	58
Figura 39. Visão da sub-bacia 02 (agosto de 2007)	60
Figura 40. Visão da sub-bacia 02 (janeiro de 2008)	60
Figura 41. Cobertura vegetal das sub-bacias	61
Figura 42. Fossa coletora de sedimentos.....	61
Figura 43. Microbacia ocupada com agricultura de subsistência.....	62
Figura 44. Estação climatológica compacta.....	63
Figura 45. Fotos do pluviômetro alternativo.....	64
Figura 46. Foto da instalação do tanque evaporimétrico alternativo	65
Figura 47. <i>Datalogger</i> do linígrafo	66
Figura 48. Discretização da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	70
Figura 49. Discretização da sub-bacia 01	71
Figura 50. Pontos de amostragem pedológica	74
Figura 51. Curvas granulométricas das amostras.....	75
Figura 52. Triângulo textural do solo	75
Figura 53. Localização dos pluviômetros.....	79
Figura 54. Evento 01	82
Figura 55. Evento 02	83
Figura 56. Evento 03	83
Figura 57. Evento 04	84
Figura 58. Evento 05	84
Figura 59. Evento 06	85
Figura 60. Evento 07	85
Figura 61. Evento 08	86
Figura 62. Evento 09	86
Figura 63. Análise estatística dos eventos.....	87
Figura 64. Relação de C com a intensidade média da chuva - BHRG.....	91
Figura 65. Relação de C com a duração do evento - BHRG	91
Figura 66. Relação de C com o total precipitado por evento - BHRG.....	92
Figura 67. Relação de C com a intensidade média da chuva - BESI.....	93
Figura 68. Relação de C com a duração do evento - BESI	94

Figura 69. Relação de C com o total precipitado por evento - BESI	94
Figura 70. Coeficiente de deflúvio por evento.....	96
Figura 71. Vazões de pico por evento	97
Figura 72. Hidrogramas observados para o evento 09	97
Figura 73. Relação entre C e a umidade inicial do solo – BHRG.....	99
Figura 74. Relação entre C e a umidade inicial do solo – BESI.....	99
Figura 75. Influência da umidade inicial no hidrogramas simulado	100
Figura 76. Variação do hidrograma alterando o grau de capilaridade	101
Figura 77. Variação do hidrograma alterando a condutividade hidráulica.....	101
Figura 78. Variação do hidrograma alterando o coeficiente de Manning	102
Figura 79. Coeficientes de deflúvio dos cenários propostos - BHRG	104
Figura 80. Hidrograma do evento 09 para os cenários propostos –BHRG	105
Figura 81. Hidrograma do evento 05 para os cenários propostos – BHRG	105
Figura 82. Coeficientes de escoamento dos cenários propostos - BESI.....	107
Figura 83. Hidrograma do evento 09 para os cenários propostos – BESI	108
Figura 84. Hidrograma do evento 05 para os cenários propostos – BESI	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Bacias experimentais implantadas no projeto IBESA	11
Tabela 02. Características da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.....	29
Tabela 03. Classes de solo da unidade de mapeamento SXe1	36
Tabela 04. Classes de solo da unidade de mapeamento RRq2	37
Tabela 05. Classes de solo da unidade de mapeamento RLe7.....	37
Tabela 06. Coordenadas dos exutórios das unidades de estudo	53
Tabela 07. Características morfológicas da BESI.....	57
Tabela 08. Sensores presentes na estação climatológica compacta.....	63
Tabela 09. Relação entre a textura e os parâmetros de infiltração	73
Tabela 10. Parâmetros do modelo por unidade de mapeamento pedológica	73
Tabela 11. Classificação textural das amostras.....	76
Tabela 12. Parâmetros relacionados à cobertura vegetal e uso do solo.....	77
Tabela 13. Taxas de Ks por cobertura vegetal e uso do solo	77
Tabela 14. Pluviometria mensal.....	80
Tabela 15. Características dos eventos.....	82
Tabela 16. Cenários considerados	88
Tabela 17. Simulação dos eventos – BHRG.....	90
Tabela 18. Simulação dos eventos – BESI.....	93
Tabela 19. Simulação dos eventos – BESI com resolução espacial menor.....	96
Tabela 20. Influência da umidade inicial do solo	98
Tabela 21. Sensibilidade dos parâmetros.....	102
Tabela 22. Escoamentos simulados nos diferentes cenários – BHRG	103
Tabela 23. Vazões de pico nos diferentes cenários – BHRG	103
Tabela 24. Escoamentos simulados nos diferentes cenários – BESI	106
Tabela 25. Vazões de pico nos diferentes cenários – BESI.....	106

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

O semi-árido nordestino ocupa uma área de quase um milhão de quilômetros quadrados (BRASIL, 2005) e apresenta uma distribuição temporal e espacial de precipitação bastante irregular, assim como solos rasos e altas taxas de evaporação. Estes fatores são determinantes para que grande parte dos seus rios seja intermitente e os recursos hídricos sejam escassos.

Essa escassez limita o desenvolvimento da região, e para suprir as demandas durante o período de estiagem são necessárias técnicas de gestão que envolvam um detalhado conhecimento dos seus processos hidrológicos.

A rede de estações pluviométricas existente cobre boa parte do nordeste brasileiro e tem séries razoavelmente longas. Porém, as demais informações necessárias para o desenvolvimento da maioria dos estudos hidrológicos acabam sendo insuficientes, principalmente quando se trata de dados de vazão e evaporação. Estes fatores resultam em elevada incerteza na avaliação da disponibilidade hídrica da região (RIGHETTO et al., 2004b).

O que se percebe hoje, portanto, é a necessidade de desenvolver e aplicar modelos de base física, que se adequem bem e possam representar de uma forma eficiente e precisa os processos hidrológicos do semi-árido, visto que, por ser uma região carente de dados, modelos que envolvam calibração são difíceis de ser utilizados.

Uma forma de desenvolver esses modelos é por meio da implantação de bacias experimentais, que possibilitam um estudo detalhado tanto quantitativo como qualitativo da realidade hídrica de uma bacia hidrográfica, podendo, ainda, serem utilizadas também para transmitir informações às bacias vizinhas.

Além disso, essas bacias permitem também propor e testar novas metodologias para estimar os processos dentro do sistema, assim como monitorar o ambiente em diversas escalas.

Com o advento da Rede de Hidrologia do Semi-Árido (REHISA), em 2001, foram implantadas oito bacias experimentais no semi-árido nordestino, em seis estados, que possibilitaram o aprimoramento do conhecimento em relação aos processos hidrológicos das regiões estudadas.

No semi-árido alagoano, que possui uma área de aproximadamente 12.600 km², a implantação de bacias experimentais se iniciou com a inserção do Estado na segunda etapa de estudos da REHISA, que começou em 2005. Em 2007, foi iniciado o processo de implementação da Bacia Experimental de Santana do Ipanema, inserida na bacia hidrográfica do riacho Gravatá.

O padrão de escoamento das bacias da região e sua relação com a precipitação é pouco conhecido, pois, além da ausência de dados fluviométricos suficientes, há poucos trabalhos desenvolvidos com esse intuito, dificultando significativamente a modelagem do processo.

Além disso, é freqüente o manejo inadequado do solo provocado pela ação humana, em virtude da necessidade de se buscar alternativas de subsistência devido à própria variabilidade climática e hidrológica encontrada na região.

Conforme Tucci & Clarke (1997), o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é influenciado pelas modificações naturais e artificiais na cobertura vegetal, que produzem os mais variados impactos sobre o meio ambiente e a disponibilidade dos recursos hídricos.

Ao se modificar abusivamente e inadequadamente o solo, desmatando a caatinga para plantações sazonais ou para facilitar a pecuária, por exemplo, cria-se uma dificuldade para a infiltração da água que alimentaria o lençol freático e serviria como reserva hídrica para a população, aumentando o pico e diminuindo o intervalo de escoamento superficial em determinada bacia.

Dessa forma, importante também é analisar como o escoamento superficial varia com o uso e ocupação do solo na região, através da proposição de diferentes cenários.

Nesse sentido, o modelo KINEROS2, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos EUA (USDA), vem sendo utilizado para modelar o escoamento e a erosão em bacias experimentais do semi-árido.

Uma vantagem desse modelo é permitir de maneira eficiente a simulação de uma grande variedade de cenários, que servem de base para caracterizar os impactos causados por modificações antrópicas no uso e ocupação do solo.

Diante do exposto, esse trabalho visa, em um primeiro momento, apresentar o processo de implantação da bacia experimental de Santana do Ipanema, desde a escolha do local de implementação até a análise dos dados iniciais oriundos da mesma.

Posteriormente, através de modelagem precipitação-vazão, é analisado o potencial de escoamento na região para diferentes ordens de grandeza e de acordo com diversos cenários de uso e ocupação do solo.

Para tal, é utilizado o modelo Kineros2, que simula os processos de escoamento superficial e erosão em bacias hidrográficas. Este modelo foi aplicado na bacia hidrográfica do riacho Gravatá, de 125 km² e em uma sub-bacia implementada na Bacia Experimental de Santana do Ipanema, de aproximadamente 3,5 km².

A escolha desse modelo se deu, além dos motivos já mencionados, pelo fato de ser necessária a utilização de um modelo que pudesse ser parametrizado através de dados físicos, visto que a região estudada não tem uma série histórica de dados de escoamento que permita calibração.

Ressalta-se ainda que os estudos compreendidos no desenvolvimento dessa dissertação estão inseridos no Projeto de Pesquisa BEER (Bacia Experimental e Representativa) da REHISA, que tem como um dos objetivos padronizar as metodologias para os estudos hidrológicos no semi-árido, sendo este um outro fator considerado na escolha do Kineros2 como modelo a ser utilizado neste trabalho, visto que já é empregado também em diversos estudos pertencentes à Rede.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desse trabalho é simular o escoamento superficial, para diferentes cenários de uso e ocupação do solo, na Bacia Experimental de Santana do Ipanema, localizada na bacia hidrográfica do riacho Gravatá, afluente do rio Ipanema, através de informações obtidas em campo e modelagem chuva-vazão.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral, serão trabalhados os seguintes objetivos específicos:

- Implantação da Bacia Experimental de Santana do Ipanema;
- Aplicação de modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica do riacho Gravatá e na bacia experimental;
- Simulação e análise do escoamento para diferentes cenários de uso e ocupação do solo;

2 ESTUDOS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

A partir de uma breve descrição do semi-árido brasileiro e da utilização de bacias experimentais para monitoramento e estudos na região, esse capítulo apresenta um histórico do uso de modelos hidrológicos para a caracterização e simulação dos processos hidrológicos neste tipo de ambiente. Além disso, é apresentado o modelo Kineros2, que foi utilizado nesse trabalho.

2.1 Semi-árido brasileiro e alagoano

Aproximadamente 40% da superfície terrestre é composta por zonas áridas (RASOOL, 1984, apud MALTCHIK, 1999), contendo quase 20% da população humana (GRAF, 1988, apud MALTCHIK, 1999).

O Brasil é um país com certa abundância de recursos hídricos, porém a distribuição desses é bastante irregular. Um trabalho realizado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2007), que analisou o balanço hídrico nas diversas regiões do país, apresentou um valor médio de 34,2 L/s/km² para o escoamento superficial na bacia Amazônica, e um valor equivalente a 8,2% desse valor, apenas 2,81 L/s/km², para a região semi-árida.

O Polígono das Secas brasileiro foi delimitado pelo Governo Federal através da lei nº. 1348 de 1951, como uma área de 936.993km² (REBOUÇAS, 1997). Essa região é caracterizada como “sujeita a períodos críticos de estiagem”, e não corresponde efetivamente ao semi-árido brasileiro, pois apresenta diferentes zonas geográficas, com algumas áreas de seca e outras com balanço hídrico positivo (PICCIN et al., 2005).

O semi-árido brasileiro propriamente dito ocupa uma área de aproximadamente 880.000 km² no nordeste e outros 104.000 km² em Minas Gerais (BRASIL, 2005), equivalentes a quase 10% do território nacional, conforme a Figura 01. O semi-árido brasileiro é um dos mais populosos do mundo, com quase 21 milhões de pessoas (BRASIL, 2005). Sua densidade populacional também é uma das maiores dentre as regiões áridas e semi-áridas, com aproximadamente 21,3 hab/km² (DUARTE, 2000).



Figura 01. Localização e delimitação do semi-árido brasileiro

Fonte: BRASIL (2005)

O semi-árido nordestino também é um dos mais úmidos do planeta, apresentando um valor precipitado anual médio entre 300 e 800 mm, considerável quando comparado às outras regiões semi-áridas, que em sua maioria apresentam totais precipitados anuais entre 80 e 250 mm (MELO FILHO & SOUZA, 2006).

O índice de aridez (relação entre precipitação e evapotranspiração potencial) do semi-árido nordestino é de 0,35. A concentração de precipitação pode chegar a até 95% na estação chuvosa e varia muito entre anos consecutivos (BRASIL, 1999). Além disso, essa estação chuvosa dura apenas de 2 a 4 meses durante o ano.

O clima da região semi-árida é tropical e a alta insolação (2800 h/ano), aliada às altas temperaturas (entre 22 e 28°C), é responsável por evaporar cerca de 90% do total precipitado (LIMA, 1992).

O outro fator primordial contribuinte para a escassez de água na região, é a baixa capacidade de armazenamento do solo, que é raso em sua maior parte. Segundo Salati & Lemos (2002), 52% do sub-solo do nordeste semi-árido é de formação cristalina, abrigando água infiltrada nas fissuras das rochas.

A caatinga é o principal ecossistema da região, ocorrendo sobre solos rasos, ocupando uma área de quase 900.000 km², equivalente a quase 11% do território brasileiro (IBAMA, 2002). Essa caatinga, diferente da maioria das outras regiões do mundo, não é resultado da degradação antrópica, mas natural (MELO FILHO & SOUZA, 2006).

Em virtude da grande heterogeneidade existente no semi-árido nordestino, dois tipos de caatinga se desenvolvem, dependendo da região. Nas áreas em que o balanço hídrico é acentuadamente negativo se desenvolve a caatinga hiperxerófila, que possui grande capacidade de armazenamento de água. Nos locais em que o balanço hídrico é ligeiramente negativo, desenvolve-se a caatinga hipoxerófila, que não tem tanta capacidade de armazenamento de água (MONTENEGRO et al., 2004).

Em Alagoas o semi-árido corresponde a 12.686,9 km² (45,6% do Estado), com uma população de 838.740 habitantes (29,7%) e insere total ou parcialmente 38 municípios, de 101 existentes no Estado (BRASIL, 2005). A

Figura 02 apresenta a localização do semi-árido em Alagoas, com destaque para o município de Santana do Ipanema, onde foi implementada a bacia experimental de Santana do Ipanema, conforme será exposto adiante.

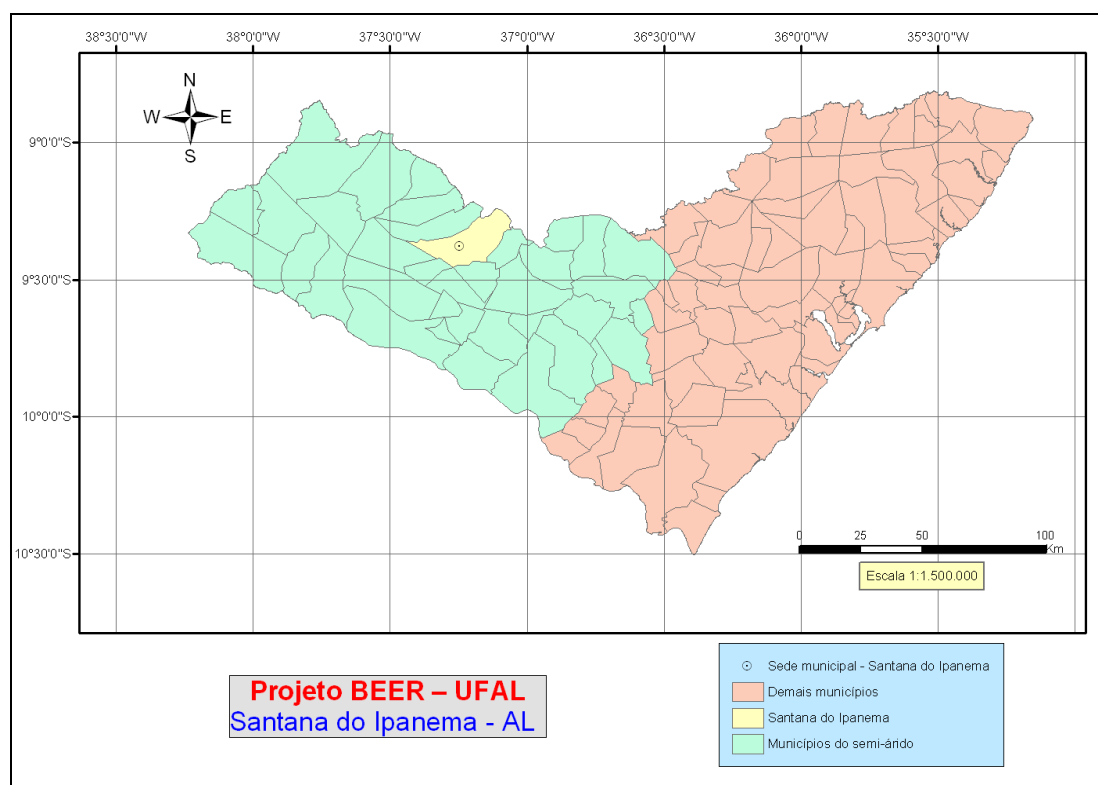


Figura 02. Localização do ecossistema semi-árido em Alagoas

2.2 Bacias experimentais e representativas do semi-árido brasileiro

A descontinuidade de eventos na região semi-árida, ora com períodos de chuvas intensas ora com grandes períodos sem precipitação, dificulta bastante o trabalho de monitoramento e aquisição de dados que possam representar bem a hidrologia da região.

Uma das soluções para minimizar essa dificuldade é a implantação de bacias experimentais e representativas na região, que visam a uma avaliação mais detalhada dos processos hidrológicos e, conseqüentemente, fornecem resultados com um nível de incerteza menor.

As bacias experimentais são pequenas bacias que funcionam como uma espécie de laboratório, onde relações entre solo, planta, água e atmosfera podem ser caracterizadas. Se a região experimental é representativa dessas

características, as informações podem ser extrapoladas para regiões maiores, denominadas bacias representativas (PIMENTEL DA SILVA et al., 2005).

Há um grande grau de subjetividade no que diz respeito à definição de “bacia pequena”. Ponce (1989) admite como pequena uma bacia onde as seguintes considerações podem ser feitas:

- A precipitação é uniformemente distribuída no espaço, sobre toda bacia, e também no tempo;
- A duração das chuvas geralmente excede o tempo de concentração da bacia;
- A geração de água e sedimentos se dá principalmente pelo escoamento nas vertentes;
- Os processos de armazenamento e fluxo concentrado na calha dos cursos d’água são pouco importantes.

Quanto à bacia representativa, segundo Silans et al. (2004), deve ter ordem de grandeza entre 100 e 250 km², dependendo dos objetivos do estudo, não ultrapassando 1000 km². Conforme Medeiros et al. (2004), há trabalhos, ainda, em que as bacias experimentais são utilizadas para extrapolar informações para bacias representativas bem maiores, da ordem de milhares de quilômetros.

O uso de bacias experimentais permite que o monitoramento de determinada região seja feita a um custo mais baixo, pois o aparato experimental necessário para um bom monitoramento da rede é menor, já que estes precisam cobrir uma área pequena (SILANS et al., 2004).

Essas unidades de estudo fornecem, ainda, um bom indicativo dos processos hidrológicos em uma região com poucas informações, como o semi-árido, visto que o controle dos parâmetros necessários aos estudos hidrológicos pode ser feito de uma maneira mais eficaz.

Assim, essas bacias permitem entender o comportamento hidroclimatológico de uma região maior a partir do monitoramento em uma escala menor, desde que as áreas sejam homogêneas no que diz respeito a fatores como a fisiografia, o clima e os regimes pluviométricos e fluviométricos.

As primeiras bacias experimentais e representativas implantadas no nordeste semi-árido datam da década de 1960. Em 1962 foram implantadas as bacias representativas de Batateira, Missão Velha, Quixabinha e Jardim, todas no Ceará. Todas elas foram desativadas em 1964. Nesse mesmo ano foi implantada a bacia de Juatama, no mesmo Estado, que, após ser desativada em 1965, foi reativada de 1974 a 1977 (CADIER, 1994).

Na década de 70 foram implantadas outras seis bacias representativas no semi-árido, a começar pela Bacia Experimental do Riacho do Navio (PE), que funcionou de 1970 a 1977. Em 1972 foi implantada a Bacia de Sumé (PB) e em 1975 a Bacia de Escada, que funcionou até 1977 (CADIER, 1994).

A Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), em parceria com o Instituto Francês de Pesquisa Científica para o Desenvolvimento em Cooperação (ORSTOM), no programa intitulado “Bacias Hidrográficas Representativas” (BHR), foi responsável por implantar as outras três bacias que passaram a funcionar nesta década: Tauá, no Ceará, em 1977; Ibipeba, na Bahia, que funcionou de 1976 a 1981, e Assu, no Rio Grande do Norte, que colaborou com a rede entre 1978 e 1980. Ainda dentro do mesmo projeto houve a implantação da Bacia Representativa de Angelim (PE), em 1989 (SERAPHIM & CADIER, 1994).

Na década de 80, ainda com a assessoria da ORSTOM, a SUDENE e universidades locais do nordeste lançaram o programa “Bacias Experimentais”. Esse programa foi responsável pela implantação da Bacia Experimental de Sumé, em 1981. Em 1985, foi instalada a Bacia Experimental de Tauá, também com a assessoria da SUDENE e ORSTOM e com financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Esses estudos foram reiniciados no nordeste brasileiro em 2001, quando foi criado o Projeto de Implantação das Bacias Experimentais do Semi-Árido – IBESA, pela rede REHISA, com a implantação de sete bacias experimentais, todas contidas em bacias representativas do semi-árido e bacias de grande importância dentro de cada estado ou da região.

As sete bacias experimentais implantadas no projeto IBESA são apresentadas na Tabela 01.

Tabela 01. Bacias experimentais implantadas no projeto IBESA (Adaptado de Righetto et al., 2004a)

Denominação da bacia	Universidade Responsável	Área (km ²)
Bacia Experimental de Serra Negra do Norte, RN	UFRN	4,32
Bacia Experimental do Rio Guaraíra, PB	UFPB	5,84
Bacia Experimental de São João do Cariri, PB	UFCG	13,6
Bacia Experimental de Aiuaba, CE	UFC	11,53
Bacia Experimental do Rio do Cedro, BA	UFBA	20,53
Bacia Experimental do Riacho Gameleira, PE	UFPE	18,77
Bacia Experimental do Riacho Jatobá, PE	UFRPE	13,50

Em 2005, foi aprovado pela FINEP o projeto BEER (Bacias Experimentais e Representativas). Esta segunda fase de estudos da REHISA contemplou também o Estado de Alagoas, com a implantação da Bacia Experimental de Santana do Ipanema, que é descrita neste estudo, sob responsabilidade da UFAL.

2.3 Modelagem do escoamento superficial no semi-árido

Este tópico apresenta uma síntese do uso de modelos hidrológicos em regiões semi-áridas e descreve o Kineros2, utilizado na modelagem chuva-vazão desse estudo.

2.3.1 Trabalhos anteriores

O estudo do escoamento no semi-árido brasileiro se iniciou com a avaliação de lâminas escoadas médias por evento e anuais em várias das bacias representativas que foram monitoradas entre as décadas de 60 e 80 no nordeste Brasileiro.

Cavalcante et al. (1990) apresentam o coeficiente de deflúvio médio e máximo para 12 bacias experimentais monitoradas na década de 80 na bacia representativa de Tauá (Ceará). Analisando os dados, verifica-se que o coeficiente de escoamento médio anual foi de 11,88% (variando de 6,5% a

25% de acordo com a bacia) e a média dos coeficientes de escoamento máximos anuais de 29,07% (variação entre 15,7% e 54,7%).

Cadier (1994) apresenta valores do coeficiente de deflúvio para várias das bacias representativas que foram monitoradas entre as décadas de 60 e 80 no nordeste Brasileiro. Os dados evidenciam a grande variação da lâmina escoada em uma mesma região durante o ano. Para a Bacia Representativa de Juatama, nos anos de 1964, 1965 e 1974, verifica-se que coeficiente de deflúvio médio variou entre 1,2% a 30%, com média anual de 15,5%. Para a Bacia Representativa do Riacho do Navio, a média anual do coeficiente, para 7 anos de dados, ficou em 39,6%, e para a Bacia Representativa de Ipípeba a média anual variou entre 0,15% e 3,8% durante 5 anos de monitoramento.

Costa (2007), a partir de monitoramento na Bacia Experimental de Aiuaba, entre os anos de 2003 e 2007, calculou valores médios anuais variando de 0,13% a 31,08% para o coeficiente de escoamento, com média de 6,54%

Essa tendência de alta variação para o coeficiente de deflúvio em uma mesma bacia se repete em outras regiões semi-áridas mundiais. Grayson et al. (1992), durante três eventos, acharam um valor entre 9% e 28% para este coeficiente em uma bacia na Austrália. Na Arábia Saudita, Wheeler & Brown (1989) encontraram um coeficiente variando de 6% a 80% em 11 eventos.

A modelagem do escoamento em relação à precipitação e às características físicas das pequenas bacias foi o foco dos trabalhos de Cadier (1994), que propôs um método de transposição das lâminas anuais escoadas e avaliou o processo chuva-vazão em várias escalas para diversas bacias do semi-árido, através de modelagem da lâmina superficial escoada, e Doherty et al. (1994), que ajustou dados de 43 pequenas bacias do Nordeste Brasileiro ao modelo SUDENE/ORSTOM.

Lanna & Schwarzbach (1989, apud GUIMARÃES JR et al., 2002) aplicaram o modelo MODHAC, conceitual, para geração de escoamento nas bacias hidrográficas do Ceará, nas análises técnicas que subsidiaram a elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos. J. Medeiros et al. (2005) utilizaram o mesmo modelo para avaliar o escoamento superficial no trecho da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açú, localizada no Rio Grande do Norte.

O estudo do escoamento na região semi-árida nordestina, com a utilização principalmente de modelos de base física, fortaleceu-se desde a implantação da Bacia Experimental de Sumé, e, posteriormente, da rede REHISA.

Guimarães Jr. et al. (2002) aplicaram o MODHISA na geração de vazões para rios do semi-árido nordestino. Y. Medeiros et al. (2005) aplicaram o CHDM na bacia experimental de Serra Negra do Norte (RN), de 4,17 km². Moura et al. (2006) aplicaram o MODHISA na mesma bacia.

Diversos outros modelos são utilizados para avaliar o escoamento e erosão em bacias do semi-árido, tais como o HIDROSED2 (FARIAS, 2008) na Bacia Experimental de Aiuaba e MODFIPE (SOUSA, 2007), que utilizou as bacias de Sumé e Tauá em sua análise.

Nas bacias experimental e representativa de Sumé e bacias do Cariri paraibano, também foram aplicados diversos modelos para tentar simular o escoamento a partir dos dados precipitados, quase sempre utilizados também para quantificar a erosão do solo. Destacam-se, nesse sentido os trabalhos de Lacerda Júnior (2002) e Batista (2006) com o NAVMO; de Alexandre et al. (2005) e Barbosa et al. (2006) com o SMAP; de Galvão (1990), Srinivasan & Galvão (1995) e Aragão (2000) com o WESP; de Cruz et al. (2004) e Srinivasan & Cruz (2005), com o WEPP; e de Figueiredo & Bathurst (2006) com o SHETRAN.

Nestas bacias, referências mundiais na modelagem do processo chuva-vazão em regiões semi-áridas, o modelo Kineros2 e seu antecessor, Kineros, também são amplamente utilizados.

Os trabalhos de Lopes (2003) e Aragão et al. (2006) avaliaram o efeito de escala nos parâmetros do modelo Kineros2 a partir da calibração e simulação de dados em parcelas de erosão, microbacias e sub-bacias. Lopes (2003) concluiu que o Kineros2 superestima os picos de vazão nas escalas maiores, e que existe efeito de escala sobre o parâmetro que representa potencial de capilaridade no modelo.

Aragão et al. (2006) concluíram que há um decréscimo na saturação inicial relativa do solo com o aumento da escala. Paiva et al. (2007), apesar de

identificarem algumas mudanças na tendência geral dos parâmetros devido à escala, afirmam ser necessário mais estudos para comprovar essa tendência.

Diversos outros trabalhos nessa bacia (SANTOS et al., 2007; PAIVA et al., 2004; ALBUQUERQUE et al., 2002) reforçam o papel da cobertura vegetal nativa da região na diminuição do escoamento superficial e a preocupação com o crescimento do total escoado, e, conseqüentemente, das perdas de água, devido ao desmatamento.

No exterior, o Kineros2 é aplicado principalmente nas regiões semi-áridas dos Estados Unidos, Austrália e Oriente Médio.

Al-Qurashi et al. (2008) aplicaram o Kineros2 para 27 eventos na bacia de Wadi Ahin, região árida de Omã, visando estudar a sensibilidade, incertezas e performance do modelo. O modelo se mostrou eficaz em simular o tempo de pico, o pico e o volume do diagrama de escoamento superficial para eventos individuais, porém o conjunto de parâmetros utilizado em um evento não se mostrou adequado quando transferido para simular outro evento.

Hernandez et al. (2000), considerando 10 classes diferentes de uso e cobertura do solo para aplicação do Kineros2, na Bacia Experimental de Walnut Gulch, encontrou uma diferença de 180% no volume escoado e 170% no pico do escoamento em um evento. Para o volume médio escoado anual, os autores encontraram um valor variando de 0,07 mm para 59,71 mm.

2.3.2 Modelo Kineros2

Rennó & Soares (2001) conceituam modelo matemático como “um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros”, que busca representar de forma simplificada a realidade e auxiliar o entendimento dos processos envolvidos na mesma.

O modelo hidrológico chuva-vazão-erosão Kineros2, Kinematic Runoff and Erosion Model (SMITH et al., 1995), é orientado a eventos, do tipo distribuído, determinístico e constituído por uma base física. Este modelo foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos EUA (USDA), sendo uma modificação do Kineros (WOOLHISER et al., 1990).

Um modelo é dito determinístico quando não considera a lei das probabilidades em seu equacionamento (TUCCI, 1998). Segundo Oliveira

(2003), diferente dos modelos estocásticos, que “não se preocupam em explicitar os fenômenos hidrológicos, mas apenas em estabelecer uma relação de causa-efeito”, os modelos determinísticos se baseiam no entendimento conceitual dos fenômenos físicos para, assim, tentar explicar e reproduzir as condições de geração das variáveis hidrológicas.

Os modelos físicos utilizam as principais equações diferenciais que descrevem o fenômeno na representação dos processos e seus parâmetros possuem um significado físico, podendo ser, portanto, estimados através de medidas reais.

Um modelo é dito como distribuído quando considera a variabilidade espacial de seus parâmetros e variáveis, e concentrado quando não o faz.

Os modelos distribuídos permitem que se aumente a eficácia da representação de determinados fenômenos físicos, devido a uma descrição mais detalhada da variação espacial dos parâmetros de entrada do mesmo, porém, para isso, necessitam de um maior número de dados de entrada, a serem estimados e medidos (KALIN et al., 2003).

Além disso, esse tipo de modelo é preferencial quando se quer estudar cenários de modificações ao longo de uma bacia hidrográfica, por possibilitar que se mudem os valores dos parâmetros representativos apenas daquelas regiões da bacia que venham a apresentar alterações.

No Kineros2 a bacia é representada por uma cascata de planos e canais, cada um deles descrito por um conjunto de parâmetros. As equações que descrevem o fluxo nos planos e canais, a erosão e o transporte de sedimentos são equações diferenciais parciais, que utilizam a aproximação cinemática e são resolvidas pelo método das diferenças finitas.

Outra característica do modelo é permitir a representação dos processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão em eventos ocorrentes em bacias urbanas e rurais, de pequeno tamanho a partir de determinada condição inicial.

Uma vantagem do Kineros2 é apresentar parâmetros que podem, em muitos casos, ser relacionado às classificações de solo (MICHAUD & SOROOSHIAN, 1994), possibilitando representar bem bacias nas quais há uma grande variação nas características do solo

Além disso, o modelo também permite que se simule com facilidade os efeitos de mudanças nas características da bacia estudada, por exemplo mudanças antrópicas como a construção de reservatórios ou variações naturais como a sazonalidade da própria vegetação de caatinga no caso do semi-árido brasileiro.

O equacionamento básico do Kineros2 é realizado a partir de equações cinemáticas unidimensionais que simulam o fluxo nos planos, considerados retangulares, e nos canais, considerados trapezoidais, conforme a Figura 03.

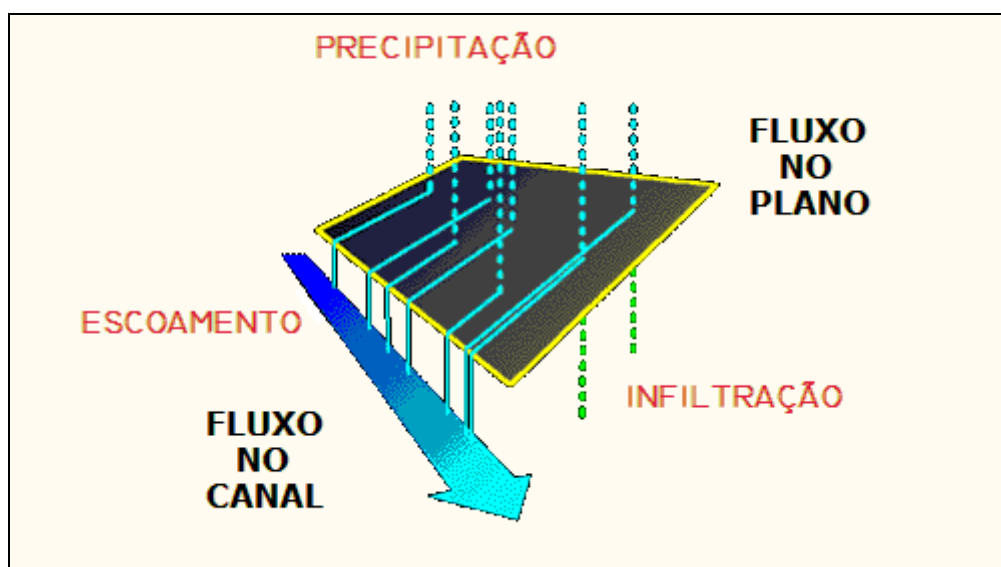


Figura 03. Diagrama representativo do Kineros2
Adaptado de USDA (2007)

2.3.2.1 Modelagem da infiltração

Modelos que buscam relacionar a infiltração com o hidrograma de escoamento superficial gerado por um evento são compostos por uma função que calcula a taxa de infiltração e sua variação com o tempo e outra função que transforma o excesso de precipitação em escoamento superficial (SILVA, 2002).

O Kineros2 representa o solo em duas camadas, com até cinco classes de tamanho de sedimento, e requer três parâmetros básicos para descrever as propriedades de infiltração: **Grau de Capilaridade** (G), **Condutividade Hidráulica Saturada** (K_s) e **Porosidade** (ϕ).

Para representar a redistribuição de água no solo, cuja formulação será apresentada adiante, outro parâmetro é necessário, o índice de distribuição do tamanho dos poros (λ) (BROOKS & COREY, 1964).

Dois outros parâmetros podem ser utilizados opcionalmente para tentar representar melhor a realidade física de cada elemento: **Varição Espacial** (C_v), que descreve a variação espacial das características hidráulicas do solo, e **Fração de Rochas** (*Rock*), relacionado ao conteúdo de rochas.

Ao simular um evento, o modelo parte de uma condição inicial, sintetizada no parâmetro S_i , **Saturação Inicial**, que representa a fração dos espaços dos poros que estão preenchidos com água.

O modelo de infiltração do Kineros2 descreve a capacidade de infiltração (f_c), também denominada infiltrabilidade, em metros por segundo, como função da profundidade infiltrada (I), segundo a equação de Parlange et al. (1982) (Equação 01).

$$f_c = K_s \left(1 + \frac{\alpha}{e^{\frac{\alpha I}{\beta}} - 1} \right) \quad \text{Equação 01}$$

Nesta equação, K_s é o valor da condutividade hidráulica efetiva em m/s, α representa o tipo de solo (a partir de uma escala contínua começando com o valor 0 para areia e finalizando em 1 para solo franco) e β é um parâmetro que relaciona os efeitos do potencial de capilaridade (G), profundidade do fluxo (h_w) e capacidade de armazenamento unitária no solo ($\Delta\theta_i$), de acordo com a Equação 02.

$$\beta = (G + h_w) \cdot \Delta\theta \quad \text{Equação 02}$$

No Kineros2, α é considerado como 0,85, e a capacidade de armazenamento unitária $\Delta\theta$ é descrita como $\phi \cdot (S_{\max} - S_i)$, sendo S_{\max} a saturação relativa máxima.

A capilaridade é relacionada ao potencial matricial do solo (ψ), conforme a Equação 03 (BRAKENSIEK, 1977).

$$G = \frac{1}{K_s} \int_0^{\psi_i} K(\psi).d\psi \quad \text{Equação 03}$$

Essa equação pode ser subdividida em duas partes, da seguinte forma:

$$G = \frac{1}{K_s} \int_0^{\psi_i} K(\psi).d\psi = \frac{1}{K_s} \int_0^{\psi_b} K(\psi).d\psi + \int_{\psi_b}^{\psi_i} K(\psi).d\psi \quad \text{Equação 04}$$

Nesta equação, ψ_b é a pressão de borbulhamento e ψ_i é o potencial matricial na interface crosta/subcrosta. Segundo a equação de Brooks & Corey, de 1964 (Equação 05).

$$K(\psi) = K_s \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^{2+3\lambda} \quad \text{Equação 05}$$

Unindo a Equação 04 e a Equação 05, tem-se a Equação 06, para cálculo da capilaridade.

$$G = \psi_b \left[1 + \frac{1 - \left(\frac{\psi_b}{\psi_i} \right)^{(1+3\lambda)}}{(1+3\lambda)} \right] \quad \text{Equação 06}$$

O modelo considera que o potencial matricial correspondente à umidade inicial do solo (ψ_i) é nulo, ou seja, que o mesmo está extremamente seco. Com isso, chega-se à Equação 07, que é a utilizada no modelo.

$$G = \psi_b \frac{2+3\lambda}{1+3\lambda} \quad \text{Equação 07}$$

Hantush & Kalin (2003) constatam que a Equação 07 pode superestimar os valores de infiltração, subestimando, conseqüentemente, o escoamento superficial, quando utilizada em condições de alta umidade antecedente.

O modelo de infiltração implementado para o Kineros2 permite que se represente a redistribuição de água no solo durante a estiagem, devido à recuperação da capacidade de infiltração na mesma. Essa representação é realizada através da Equação 08.

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\Delta\theta_{i0}}{I} \left[r - K_i - \left(K(\theta_0) + \frac{\beta \cdot p \cdot K_s \cdot \Delta\theta_{i0} \cdot G(\theta_i, \theta_0)}{I} \right) \right] \quad \text{Equação 08}$$

onde,

$\Delta\theta_{i0}$ = conteúdo de água na porção redistribuída, ou seja, a diferença de umidade do solo acima e abaixo da frente de molhamento, equivalente a $\theta_0 - \theta_i$;

r = taxa de entrada de água na superfície durante a redistribuição, que pode ser negativa, inclusive, quando há evaporação;

β = fator de forma;

p = fator efetivo de profundidade;

$G(\theta_i, \theta_0)$ = valor efetivo do potencial de capilaridade na frente de distribuição de água;

2.3.2.2 Modelagem do escoamento superficial no plano

O escoamento superficial no Kineros2 é considerado como sendo proveniente apenas do mecanismo Hortoniano (HORTON, 1933 apud SMITH & GOODRICH, 2005), ou seja, a geração do escoamento superficial acontece quando a capacidade de infiltração do solo é atingida.

O escoamento superficial nos planos é descrito pelas equações de Saint Venant simplificadas através do modelo de onda cinemática, resolvidas a partir de diferenças finitas, utilizando um esquema implícito de quatro pontos, definidos em relação ao tempo e espaço.

O fluxo superficial em um plano pode ser representado como um processo unidirecional na direção da maior declividade, e a descarga por

unidade de largura (Q) pode ser relacionada ao volume armazenado por unidade de área (h) através de coeficientes que estão relacionados à declividade, rugosidade e ao regime de fluxo, conforme a Equação 09.

$$Q = \alpha h^m \quad \text{Equação 09}$$

O coeficiente α é dado por $\frac{S^{\frac{1}{2}}}{n}$, onde S é a declividade e n o coeficiente de rugosidade de Manning, enquanto o coeficiente m tem um valor de 5/3.

A Equação 11, que descreve o escoamento superficial no modelo, é obtida a partir da Equação 09, em conjunto com a equação da continuidade (Equação 10).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad \text{Equação 10}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \cdot m \cdot h^{m-1} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = q(x,t) \quad \text{Equação 11}$$

Para estas equações, t é o tempo, x é a distância na direção da declividade e $q(x,t)$ a taxa de escoamento lateral.

O modelo apresenta dois parâmetros relacionados à microtopografia do relevo. Considera-se que a microtopografia possui uma **Elevação Máxima** (*relief*) e que a área coberta pela superfície de água varia linearmente até esse valor máximo, enquanto o parâmetro *spacing* representa o **Espaçamento** médio entre dois elementos de relevo máximo.

2.3.2.3 Modelagem do escoamento superficial nos canais

O modelo de escoamento nos canais também utiliza o modelo de onda cinemática, e a equação da continuidade para o fluxo em canais, representada pela Equação 12.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x,t) \quad \text{Equação 12}$$

onde,

A = a área da seção transversal;

Q = vazão no canal;

x = distância na direção da declividade;

$q_c(x,t)$ = fluxo lateral por unidade de comprimento do canal;

A descarga no canal (m^3/s) pode ser relacionada à área da sua seção transversal (m^2), através da Equação 13, onde R é o raio hidráulico.

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad \text{Equação 13}$$

As equações cinemáticas para os canais são resolvidas com a mesma técnica de diferenças finitas utilizada para calcular o fluxo no plano, com a diferença que ao invés de h , é utilizado a área da seção transversal, e, conseqüentemente, as características geométricas da mesma.

2.3.2.4 Modelagem do armazenamento

O modelo também apresenta procedimentos de cálculo para uma bacia com elementos de detenção, que possibilitam o armazenamento de determinado volume na bacia hidrográfica após o evento.

A dinâmica desses reservatórios é descrita por uma equação de balanço de massa (Equação 14) e por outra equação, de fluxo (Equação 15), resolvidas pelo método da bisseção entre dois intervalos de tempo consecutivos.

$$\frac{dV}{dt} = q_I - q_0 - A_p \cdot f_c \quad \text{Equação 14}$$

$$q_0 = C_1 \cdot (h_r - h_z)^{c_2} \quad \text{Equação 15}$$

onde,

$V(h_r)$ = volume armazenado;

h_r = altura do nível d'água;

q_I = vazão de entrada;

q_0 = vazão de saída;

A_p = área do reservatório;

f_c = taxa de infiltração no reservatório;

h_z = nível correspondente ao fluxo de saída nulo;

C_1 e c_2 = coeficientes do orifício ou da barragem;

2.3.2.5 Consideração da precipitação

O modelo pode considerar a precipitação como uniforme em toda a bacia ou variando espacialmente. Se há mais de um pluviógrafo na bacia, pode-se, a partir dos dados pontuais de cada um deles, obter automaticamente, por interpolação, uma superfície representando a precipitação em cada elemento da bacia.

O modelo considera os valores dos três pluviógrafos mais próximos para efetuar a interpolação e gerar o valor representativo da precipitação em determinado elemento. Da mesma forma, a saturação inicial do solo também pode ser interpolada.

Para considerar a interceptação vegetal são utilizados dois parâmetros. O parâmetro denominado **Interceptação** (*Interception*) representa a altura de interceptação e o parâmetro **Cobertura Vegetal** (*Canopy Cover*) a fração da superfície coberta pela vegetação.

2.3.2.6 Parâmetros utilizados no modelo Kineros2

Para a aplicação do modelo, é necessária a divisão da bacia em elementos de canal e de fluxo, a partir das informações topográficas da mesma. Posteriormente, de acordo com características como vegetação, declividade e tipo de solo, entre outras, cada elemento pode ser subdividido em vários, refinando a rede básica montada com o intuito de aproximá-la da realidade física.

As limitações impostas pelo Kineros2 são a possibilidade de apenas duas contribuições laterais e dez elementos chegando a cada canal.

Os arquivos de entrada do modelo apresentam os valores apropriados para os parâmetros de cada elemento, descritos como geométricos, hidráulicos, característicos da infiltração e característicos da erosão, e suas conexões com os elementos próximos.

A primeira parte do arquivo de entrada se refere aos parâmetros globais do modelo, e define, além do **Sistema de Unidades** que será utilizado (*Units*), os seguintes parâmetros:

- **Comprimento Característico** (*Clen*) – Define o comprimento característico. Seu valor é dado pelo comprimento do maior canal ou pela soma do comprimento da maior cascata de planos existentes.
- **Temperatura** (*Temperature*)– Define a temperatura da água, em °C ou °F.
- **Diâmetros** (*Diameters*) – Define os diâmetros representativos das partículas do solo, limitado a cinco classes, em milímetros.
- **Densidades** (*Densities*)– Define os valores das massas específicas de cada classe de diâmetro representativo.

Esses três últimos parâmetros são utilizados em simulações que envolvem o processo de erosão na bacia, o que não será o caso deste trabalho.

Os parâmetros a serem definidos para simular o escoamento no plano são os seguintes:

- **Comprimento** (*Length*) – Define o comprimento do plano (metros ou pés).
- **Largura** (*Width*) – Define a largura do plano (metros ou pés).
- **Declividade** (*Slope*) – Define a declividade do plano.
- **Manning** (*Manning*)– Equivale ao coeficiente de rugosidade de Manning, e pode ser substituído pelo parâmetro **Chezy**.
- **Chezy** (*Chezy*)– Equivale ao coeficiente de Chezy e pode ser utilizado como alternativa ao parâmetro **Manning**.
- **Altura Média** (*Relief*) – Representa a altura média do relevo da microtopografia (milímetros ou polegadas).

- **Espaçamento** (*Spacing*) – Representa o espaçamento médio do relevo da microtopografia (metros ou pés).

- **Interceptação** (*Interception*) – Equivale à interceptação vegetal (milímetros ou polegadas).

- **Cobertura Vegetal** (*Canopy Cover*) – Define a fração da superfície ocupada por cobertura vegetal, utilizada no cálculo da interceptação.

Para uma a superfície permeável, os seguintes parâmetros definem as características de infiltração do solo:

- **Saturação Inicial** (*Saturation*) – Equivale à saturação inicial relativa do solo, definida como a razão entre sua umidade inicial e sua porosidade.

- **Coeficiente de Variação** (C_v) – Equivale ao coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva (mm/h ou polegadas/h).

O parâmetro **Espessura** (*Thickness*), que representa a espessura da camada superficial do solo, é utilizado apenas quando o solo considerado possui duas camadas.

Os outros parâmetros utilizados na modelagem da infiltração do solo são os seguintes:

- **Condutividade Hidráulica Saturada** (K_s) – Equivale à condutividade hidráulica saturada efetiva.

- **Grau de Capilaridade** (G) – Equivale ao potencial de capilaridade efetivo (mm ou polegadas).

- **Distribuição** (*Distribution* (λ)) – Equivale ao índice de distribuição do tamanho dos poros, utilizado no cálculo da redistribuição da água no solo durante estiagem.

- **Porosidade** (*Porosity*) – Equivale à porosidade do solo.

- **Fração de Rochas** (*Rock*) – Define a fração volumétrica de rochas no solo.

Na simulação da erosão do solo, outros três parâmetros devem ser definidos:

- **Coeficiente de Erosão** (*Splash* (cf)) – Representa a erosão causada pelas gotas da chuva no solo.

- **Coesão** (*Cohesion* (co)) – Equivale ao coeficiente de coesão do solo.

- **Frações** (*Fractions*) – Define a fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

Além dos parâmetros citados, as seguintes informações também são incluídas em cada elemento de plano:

- **Identificador** (*Identifier*) – Define o número de identificação do plano.
- **Plano a Montante** (*Upstream*) – Define o número de identificação do plano a montante.
- **Impressão** (*Print*) – Define o tipo de impressão a ser realizada na simulação.

Para definir um elemento de canal, devem ser também caracterizados os parâmetros **Comprimento**, **Largura** (agora definindo a largura de base do canal), **Declividade**, **Manning**, **Chezy**, **Saturação Inicial**, **Coefficiente de Variação**, **Espessura**, **Condutividade Hidráulica Saturada**, **Grau de Capilaridade**, **Distribuição**, **Porosidade**, **Fração de Rochas**, **Coesão** e **Frações**.

No caso de seção trapezoidal, como considerado nesse trabalho, são definidas também as **Declividades Laterais** do canal, *SS1* e *SS2*.

Além dos parâmetros citados, as seguintes informações também são necessárias para um elemento de canal:

- **Identificador** (*Identifier*) – Define o número de identificação do canal.
- **Elemento a Montante** (*Upstream*) – Define o número de identificação do elemento à montante.
- **Elemento Lateral** (*Lateral*) – Define o número de identificação dos planos que contribuem lateralmente ao canal.
- **Tipo de Canal** (*Type*) – Define se o canal é simples ou composto.
- **Impressão** (*Print*) – Define o tipo de impressão a ser realizada na simulação

3 APRESENTAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Ipanema foi escolhida para a realização dos estudos em virtude de já haver um experimento implantado a montante, pela Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, na mesma bacia, no município de Pesqueira - PE. A partir daí, foi avaliado e escolhido o melhor local para a implantação da bacia experimental, dentro da bacia hidrográfica do rio Ipanema.

A área escolhida está localizada na bacia hidrográfica do riacho Gravatá (BHRG), inserida no município de Santana do Ipanema. Os critérios que levaram à escolha dessa região são apresentados no Item 3.2.

Neste tópico será apresentada a caracterização da bacia hidrográfica do rio Ipanema, seguida da caracterização da bacia hidrográfica do riacho Gravatá e alguns dados socioeconômicos referentes ao município de Santana do Ipanema.

A caracterização da bacia hidrográfica do rio Ipanema foi realizada a partir de informações apresentadas em seu Plano Diretor de Recursos Hídricos (ALAGOAS, 1998) e em mapas temáticos do IBGE e da ANA.

A bacia hidrográfica do riacho Gravatá foi caracterizada através de informações extraídas do Modelo Digital do Terreno (MDT) disponibilizado pela United States Geological Survey (USGS, 2007), imagens de satélite da Embrapa (MIRANDA & GOUVEIA, 2004) e visitas a campo realizadas durante o ano de 2007.

3.1 Bacia hidrográfica do rio Ipanema

A bacia hidrográfica do rio Ipanema nasce em território pernambucano, atravessa o território alagoano e deságua na margem esquerda do rio São Francisco, conforme a Figura 04, que apresenta sua localização no estado de Alagoas.

A bacia do rio Ipanema está compreendida entre as coordenadas extremas 8°18'04" e 9°52'24" de latitude sul, e 36°36'28" e 37°27'54" de longitude oeste. Sua área total é de cerca de 8.800 km² e engloba 34 municípios, sendo 18 alagoanos e 16 pernambucanos, com uma população de cerca de 754 mil habitantes. Seus limites são a bacia do rio Ipojuca, ao norte, o

rio São Francisco, ao Sul, as bacias dos rios Capiá e Moxotó, ao oeste, e a bacia do rio Traipú, ao leste.

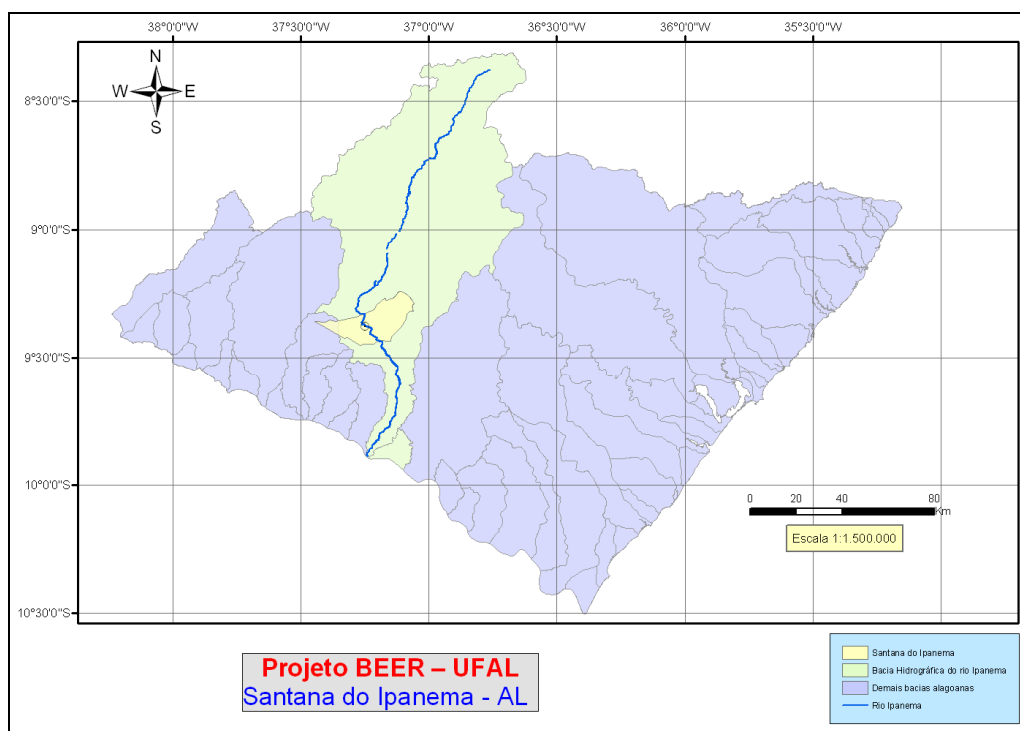


Figura 04. Localização da bacia hidrográfica do rio Ipanema

O rio Ipanema tem 239 km de extensão e nasce a uma altitude de 950m, na serra do Ororoba, próximo ao município pernambucano de Pesqueira. Até a cidade de Poço das Trincheiras, em Alagoas, seu curso é orientado no sentido sudoeste e a partir daí segue orientação para sudeste até sua confluência com o rio Dois Riachos, quando ruma para o sul até a foz, próximo à cidade de Belo Monte.

Segundo as informações do Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia (Alagoas, 1998), a estação seca e a chuvosa são bem definidas, e o trimestre mais chuvoso ocorre em cinco períodos distintos, dependendo da localização. Na parte sul da bacia ele ocorre entre setembro e novembro, na parte central entre abril e junho e na parte norte em três períodos distintos: entre fevereiro e abril, entre março e maio, e entre maio e julho.

A precipitação média anual na bacia é de 750 mm/ano, variando de níveis menores que 400 mm/ano na porção sudoeste até 1100 mm/ano na

porção noroeste. A Figura 05 apresenta as isoietas médias anuais para a bacia hidrográfica do rio Ipanema.

O déficit hídrico na bacia hidrográfica do rio Ipanema é elevado, atingindo valores máximos no extremo sudoeste, da ordem de 965 mm anuais, e mínimo no extremo nordeste, da ordem de 300 mm anuais. Há excedente hídrico nos meses de junho a agosto, na região nordeste da bacia, entre outubro e novembro no sudoeste e no mês de maio na parte noroeste. No sudeste, em nenhum momento há excedente hídrico.

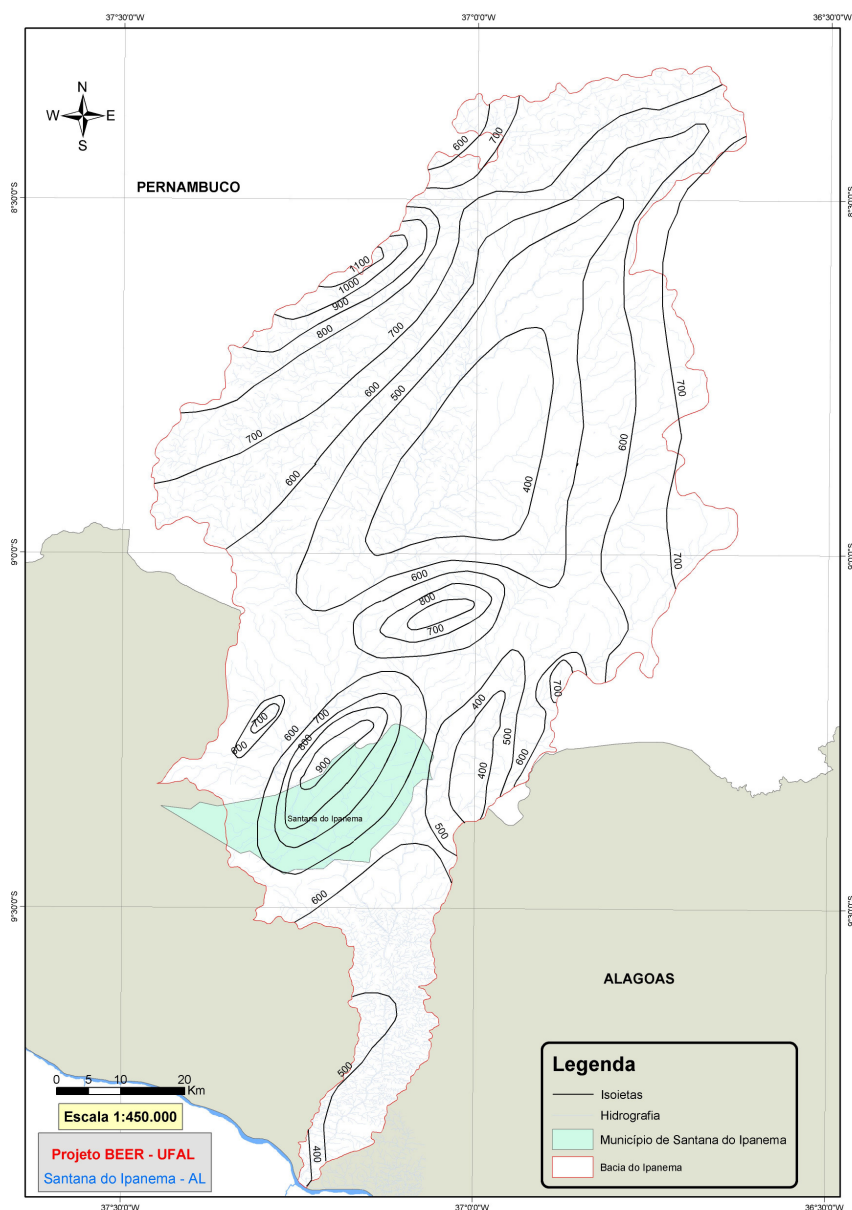


Figura 05. Isoietas médias anuais na bacia hidrográfica do rio Ipanema
Adaptado de Alagoas (1998)

As temperaturas são sempre superiores a 18° C, com amplitude térmica mensal menor que 5° C. A média anual varia entre 26° C no extremo sul até 21° C no extremo norte.

3.2 Bacia hidrográfica do riacho Gravatá

A bacia hidrográfica do riacho Gravatá possui área total de aproximadamente 125 km², e os critérios que levaram a mesma a ser definida como local de implementação da bacia experimental foram os seguintes:

- Facilidades de acesso ao local, devido à proximidade da zona urbana do município de Santana do Ipanema;
- Atendimento às condições características de bacia experimental, conforme citadas anteriormente;
- Possibilidade de monitoramento de processos hidrológicos em diferentes escalas, devido à presença de inúmeras sub-bacias de diferentes ordens de grandeza;
- Conhecimento de lideranças locais que auxiliaram nas negociações com os proprietários de terra;

A bacia do riacho Gravatá cobre boa parte do município de Santana do Ipanema, sendo este riacho um contribuinte pela margem esquerda do rio Ipanema, conforme a Figura 06.

As características morfológicas da bacia hidrográfica do riacho Gravatá estão expressas na Tabela 02.

Tabela 02. Características da bacia hidrográfica do riacho Gravatá

Área	125,46 km ²
Perímetro	61,84 km
Fator de forma	0,15
Índice de compactidade	1,55
Densidade de drenagem	0,59 km/km ²
Comprimento do rio principal	29,39 km
Extensão da rede de drenagem	74,54 km
Sinuosidade do rio principal	1,30

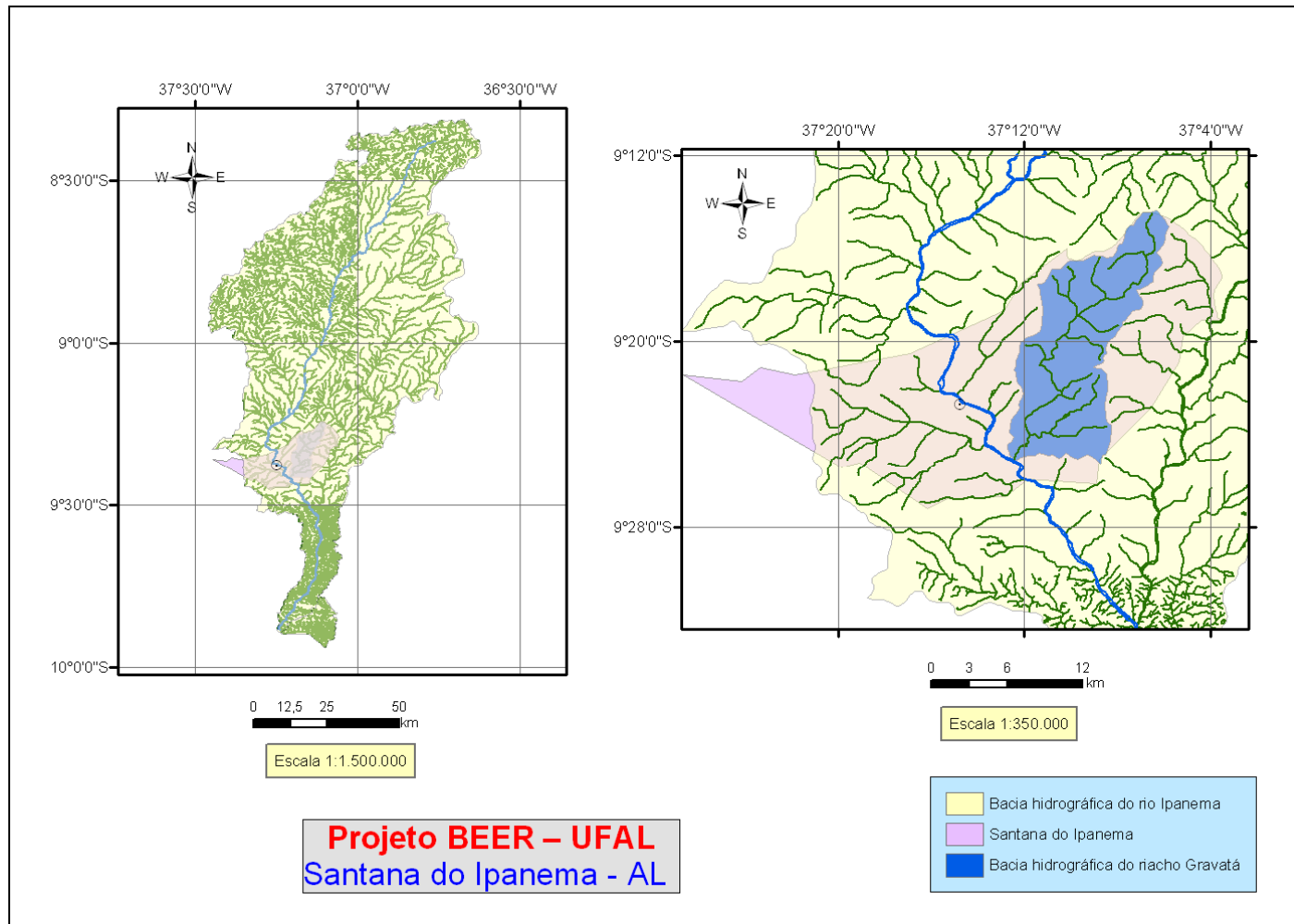


Figura 06. Localização da bacia do riacho Gravatá na bacia do rio Ipanema.

3.2.1 Caracterização Geral do Município de Santana do Ipanema

Quando se trata de análise hidrológica, a unidade de estudo é a bacia hidrográfica. Porém, é importante saber qual o perfil socioeconômico da população presente na região de estudo, a fim de poder visualizar que tipo de alterações aquela população pode propiciar na região, principalmente nos aspectos de uso e ocupação do solo. Assim, esse item apresenta uma breve caracterização geral do município de Santana do Ipanema, no qual está inteiramente contida a bacia hidrográfica do riacho Gravatá.

O município de Santana do Ipanema localiza-se na região centro-oeste do Estado de Alagoas, conforme a Figura 04. Seus limites são o município de Dois Riachos a leste, os municípios de Senador Rui Palmeira e Poço de Trincheiras a oeste, novamente o município de Poço de Trincheiras e o estado de Pernambuco ao norte, e os municípios de Carneiros, Olho d' Água das Flores e Olivença, ao Sul.

Santana do Ipanema está contida na mesorregião Sertão Alagoana, na microrregião Santana do Ipanema, possuindo uma área de 437,85 km², equivalente a 1,6% do estado de Alagoas. Mais de 95% do município (422,34 km²) está inserido na bacia do rio Ipanema (LOPES et al., 2005).

Sua sede está a aproximadamente 250 metros de altitude e coordenadas geográficas de 9°22'42" de latitude sul e 37°14'43" de longitude oeste. Santana do Ipanema dista de Maceió 207 km, sendo o acesso a partir da capital alagoana feito através da rodovia BR-316.

A população do município, de acordo com a última Contagem Populacional (IBGE, 2007), é de 42.296 habitantes, sendo 57,82% residentes na zona urbana e 42,18% na zona rural. A densidade demográfica de Santana do Ipanema é de 96,60 hab/km².

Com relação à classificação por sexo, de acordo com o último censo populacional (IBGE, 2000), há predominância de mulheres, que correspondem a 51,34% da população, enquanto 48,66% dos habitantes são do sexo masculino.

Ainda segundo o mesmo censo, dos 9.639 domicílios particulares permanentes existentes em Santana do Ipanema, 6.687 (69,4%) tem banheiro e sanitário, e deste universo apenas 209 (2,2%) possuem banheiro e

esgotamento sanitário via rede geral. O sistema de coleta de lixo atende 5.199 domicílios (53,9%).

Com relação ao abastecimento de água da população, 5.701 domicílios (59,1%) são abastecidos pela rede geral de água, 202 (2,1%) por poços ou nascentes e 3.376 (38,8%) por outras formas de abastecimento.

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do município é de 0,616 e a taxa de analfabetismo é alta, correspondente a 45,53% da população com 25 ou mais anos de idade. (PNUD, 2000).

3.2.2 Relevo

Para caracterizar o relevo da BHRG foi utilizado o Modelo Digital do Terreno do USGS (2007), obtido pela Missão Topográfica por Radar (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM) da NASA. Este modelo tem resolução espacial de 90 m x 90 m. O MDT utilizado é apresentado na Figura 07.

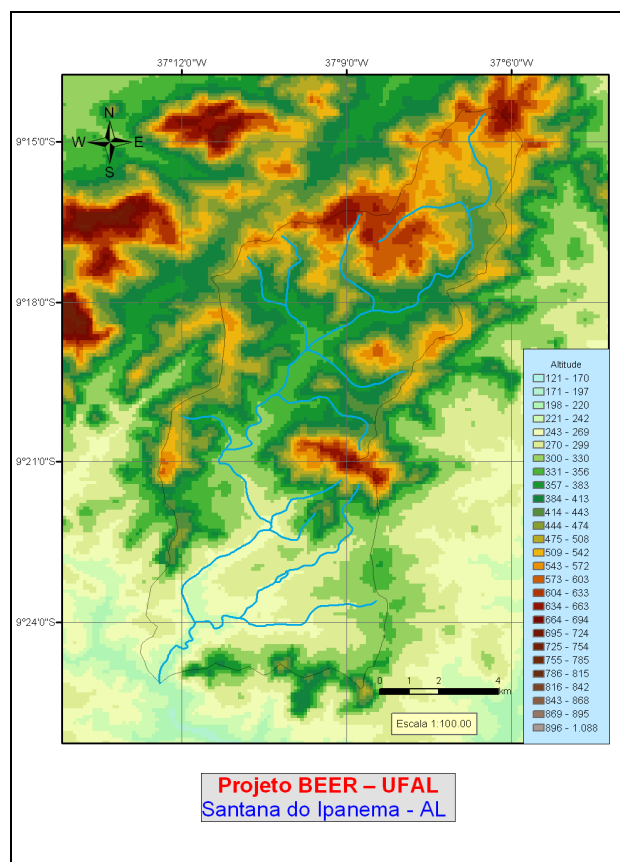


Figura 07. Modelo digital do terreno – bacia hidrográfica do riacho Gravatá

Para extrair as informações de relevo, hidrografia e características fisiográficas a partir deste modelo, foram utilizadas ferramentas de SIG (Arcgis e Idrisi) e rotinas específicas. A Figura 08 apresenta a visualização em 3D da bacia hidrográfica do riacho Gravatá, a Figura 09 apresenta a distribuição de freqüências altimétricas na bacia e a Figura 10 as curvas de nível a cada 40 metros na bacia.

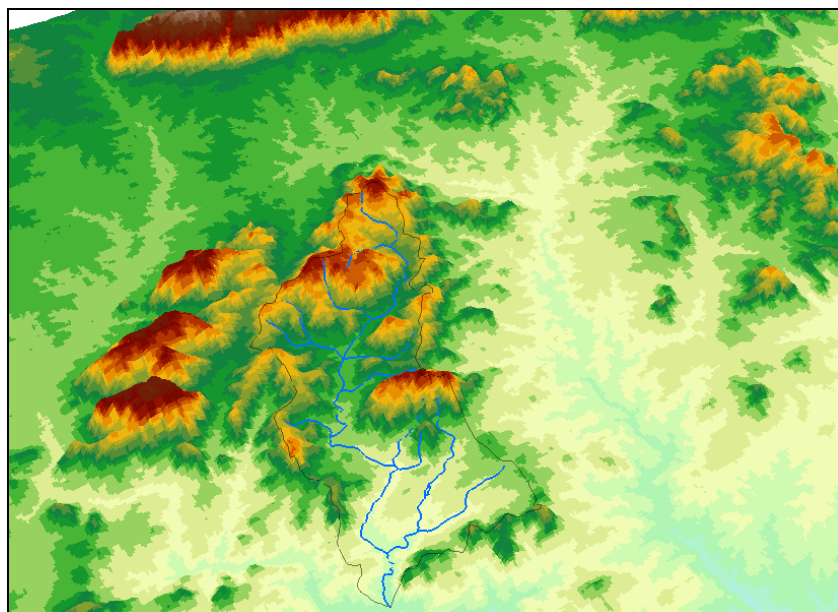


Figura 08. Visualização 3D da bacia hidrográfica do riacho Gravatá

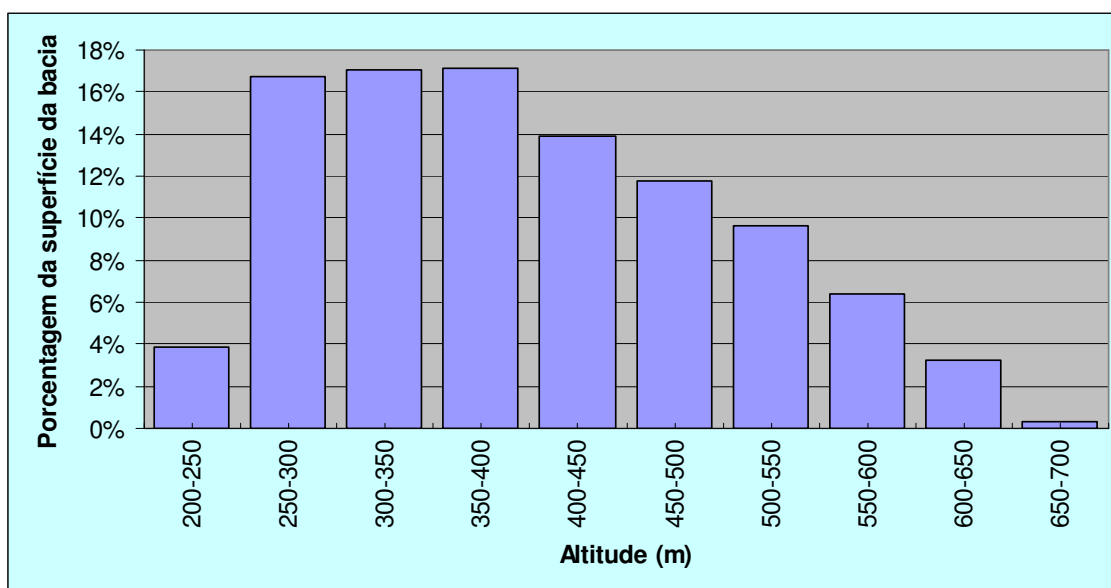


Figura 09. Freqüências altimétricas na bacia hidrográfica do riacho Gravatá

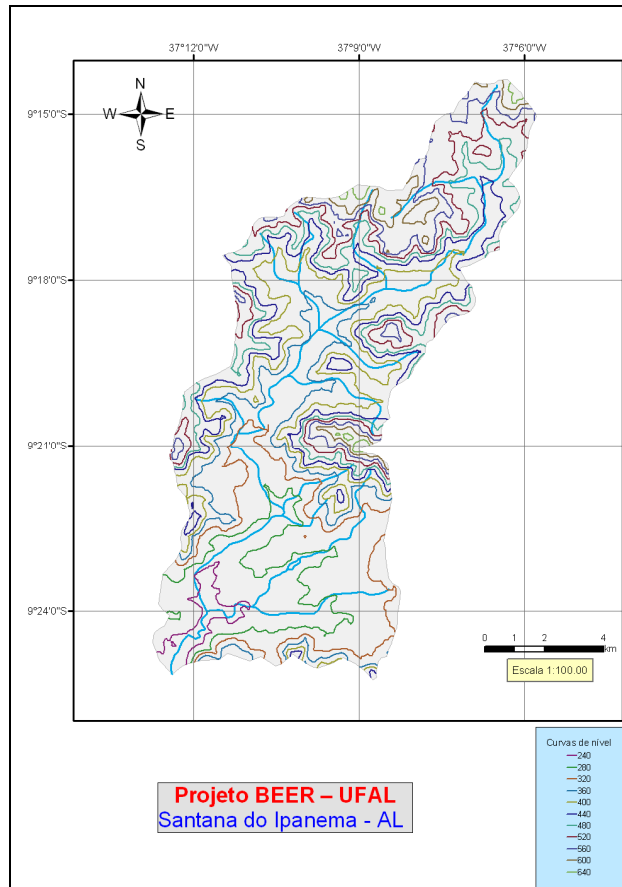


Figura 10. Curvas de nível da bacia hidrográfica do riacho Gravatá

A altitude na bacia varia entre 208 e 672 metros, com valor médio de 398,6 metros. A curva hipsométrica da bacia do riacho Gravatá é apresentada na Figura 11.

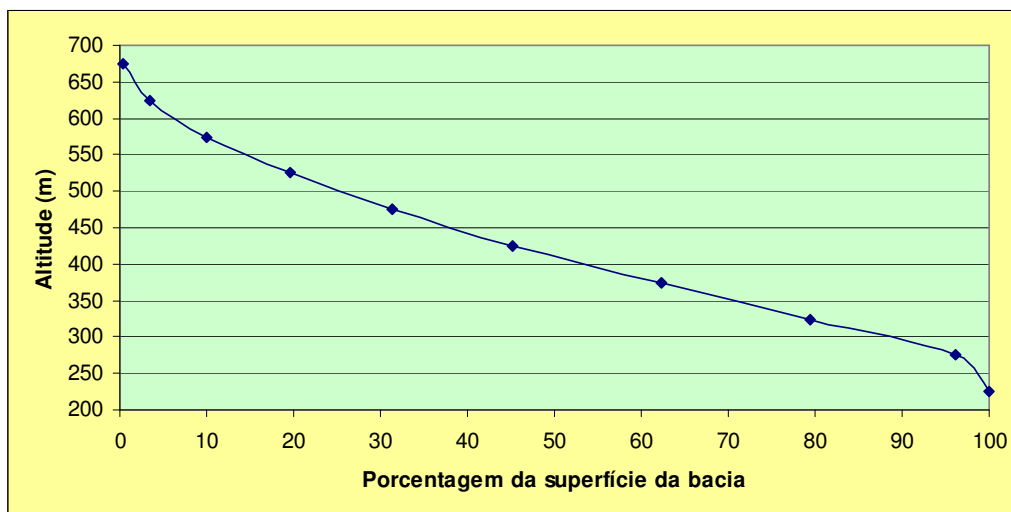


Figura 11. Curva hipsométrica da bacia hidrográfica do riacho Gravatá

A declividade média na bacia é de 13,03% mas aproximadamente metade de sua superfície (49,76%) tem declividade menor que 10%, conforme a Figura 12.

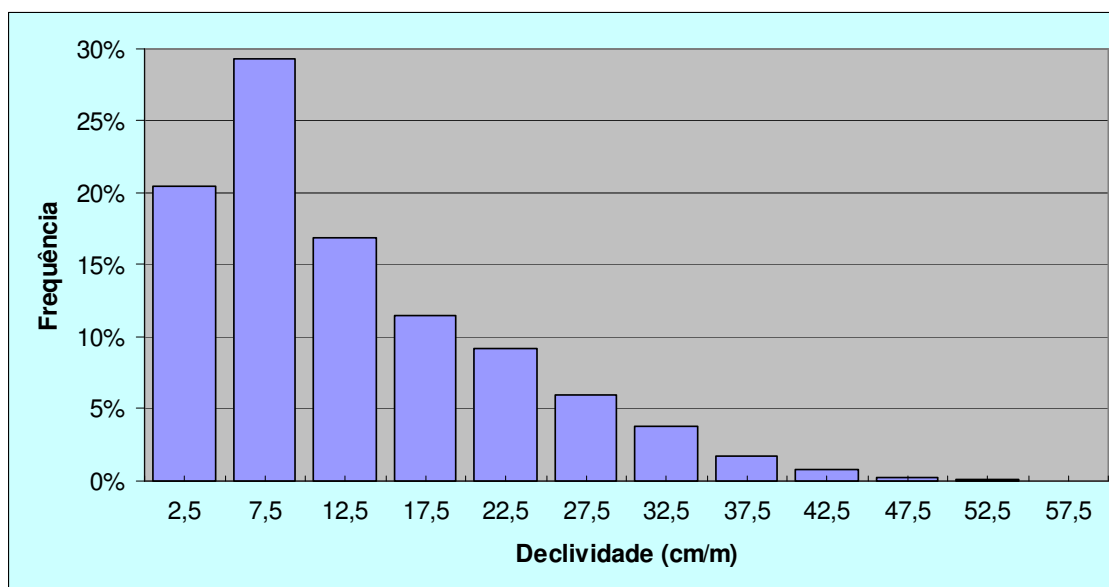


Figura 12. Histograma de declividades na bacia hidrográfica do riacho Gravatá

3.2.3 Pedologia

Para o levantamento das unidades de mapeamento e classes de solo, foram consideradas as informações do Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do rio Ipanema, em escala 1:100.000, e as informações obtidas foram reclassificadas de acordo com o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).

A bacia do riacho Gravatá apresenta três unidades de mapeamento principais, apresentadas na Figura 13.

A primeira unidade de mapeamento, denominada SXe1, é composta por 35% de planossolo háplico, 25% de argissolo vermelho, 20% de neossolo litólico e 20% de neossolo flúvico. As características de cada classe que compõe essa unidade estão descritas na Tabela 03.

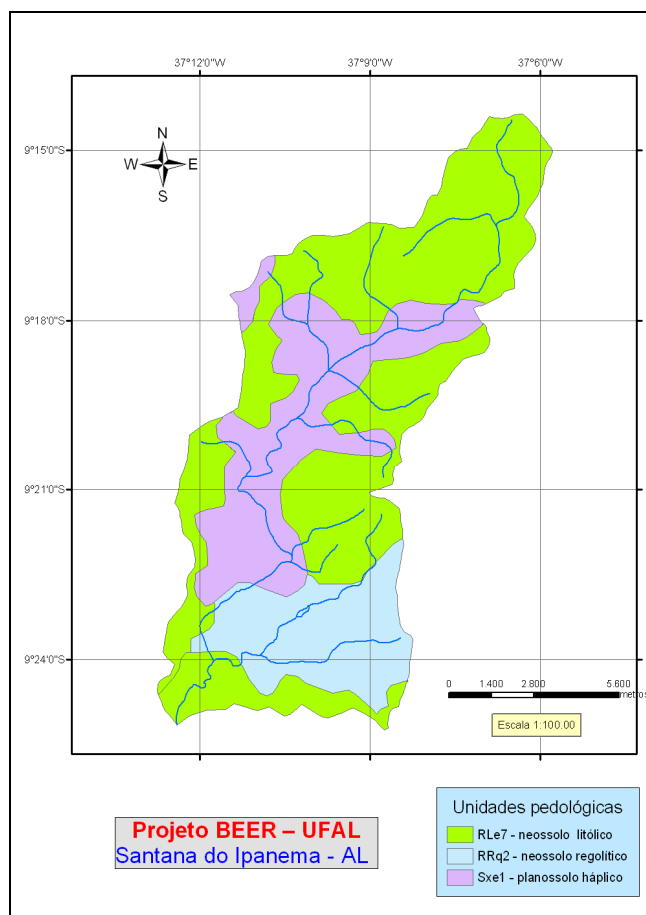


Figura 13. Mapa pedológico da bacia hidrográfica do riacho Gravatá
Adaptado de Alagoas (1998)

Tabela 03. Classes de solo da unidade de mapeamento Sxe1

Unidade de mapeamento – Sxe1				
Ordem	Planossolo	Argissolo	Neossolo	Neossolo
Subordem	Háplico	Vermelho	Litólico	Flúvico
Grande grupo	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Grupo	Solódico	Típico e léptico	Típico	Solódico e típico
Perfil	A moderado e fraco	A moderado	A moderado e fraco	A moderado
Textura	Média	Média / Média e argilosa	Média	Arenosa e média
Fase	Não-pedregosa e pedregosa II	Não-pedregosa e pedregosa II	Pedregosa	x
Tipo de caatinga	Hipoxerófila	Hipoxerófila	Hipoxerófila	Hipoxerófila de várzea
Porcentagem	35%	25%	20%	20%

A unidade de mapeamento denominada RRq2 é composta por 50% de neossolo regolítico, 30% de neossolo litólico e 20% de grupamento indiscriminado de planossolo háptico e planossolo nátrico, conforme a Tabela 04.

Tabela 04. Classes de solo da unidade de mapeamento RRq2

Unidade de mapeamento – RRq2				
Ordem	Neossolo	Neossolo	Planossolo	Planossolo
Subordem	Regolítico	Litolítico	Nátrico	Háptico
Grande grupo	Psamítico	Eutrófico	Órtico	Eutrófico
Grupo	Típico e léptico	Típico	Típico	Solódico
Perfil	A fraco	A moderado e fraco	x	A moderado e fraco
Textura	Arenosa	Média	Média	Média
Fase	x	Pedregosa	Pedregosa	Não-pedregosa e pedregosa II
Tipo de caatinga	Hipoxerófila	Hipoxerófila	Hipoxerófila	Hipoxerófila de várzea
Porcentagem	50%	30%	20%	

A unidade de mapeamento RLe7 é composta por 50% de neossolo litólico, 20% de argissolo vermelho e 30% de afloramentos de rocha, conforme a Tabela 05. A Figura 14 apresenta afloramentos de rocha encontrados nessa unidade.

Tabela 05. Classes de solo da unidade de mapeamento RLe7

Ordem	Neossolo	Argissolo
Subordem	Litolítico	Vermelho
Grande grupo	Eutrófico	Eutrófico
Grupo	Típico	Típico e léptico
Perfil	A moderado e fraco	A moderado
Textura	Média	Média / Média e argilosa
Fase	Pedregosa e rochosa	Não-pedregosa e pedregosa II
Tipo de caatinga	Hipoxerófila	Hipoxerófila
Porcentagem	50%	20%



Figura 14. Exemplo de afloramentos de rocha na unidade RLe7

3.2.4 Geologia

O patrimônio litoestratigráfico da área da bacia hidrográfica do riacho Gravatá é constituído por rochas do Embasamento Arqueano Retrabalhado e cobertura proterozóica de três unidades litológicas (ALAGOAS, 1998), conforme a Figura 15.

- Granitóides tipo Águas Belas – Constituídos fundamentalmente por hornblenda granito, piroxênio-granito, quartzo-sienito e sienito, este, algumas vezes, encerrando lentes de metacarbonatos.
- Granitóides tipo Mata Grande – Constituídos por granitos leucocráticos róseos a creme de granulação fina a média, contendo lentes de metacarbonatos.
- Rochas porfiroblásticas – Constituem associações representadas por sienitos, monzonitos e quartzo-dioritos.

3.2.5 Geomorfologia

O domínio morfoestrutural principal presente na região se refere aos Maciços Remobilizados, e a unidade geomorfológica encontrada é a Pediplano do Baixo São Francisco (ALAGOAS, 1998).

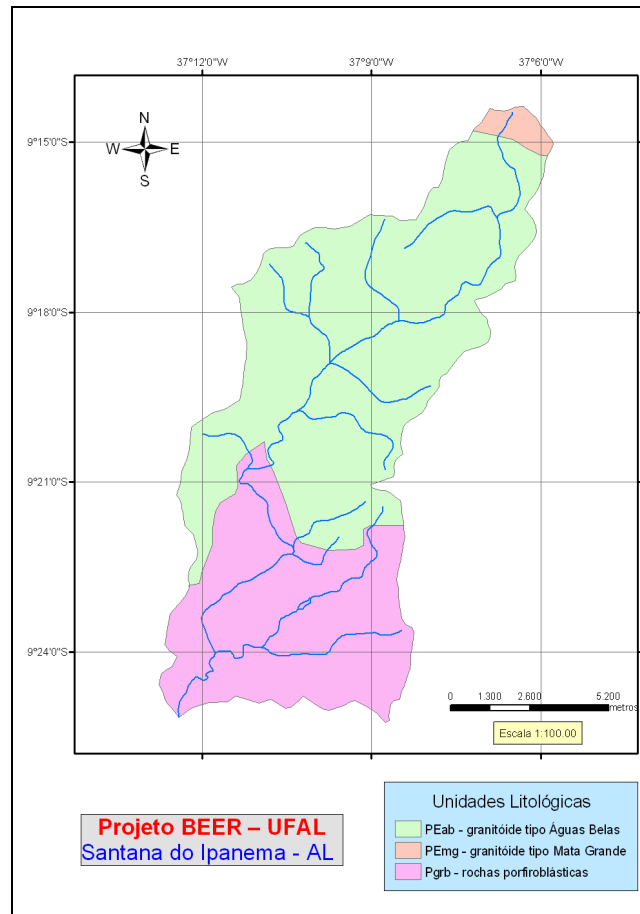


Figura 15. Mapa geológico da bacia hidrográfica do riacho Gravatá
Adaptado de Alagoas (1998)

O Pediplano do Baixo São Francisco apresenta áreas aplanadas e entalhadas pelo rio São Francisco. Caracteriza-se por apresentar grande homogeneidade de feições, basicamente vastos planos intercalados por elevações residuais (*inselbergues*), resultantes de diferenças de resistência, sendo constituídas principalmente por granitóides e quartzitos.

Os pedimentos que compõem a unidade são divididos em dois níveis distintos: o nível superior, situado nos sopés das elevações, apresenta-se retocado, dissecado em lombas largas e alterados, e é recoberto por solos argilosos e de cor avermelhada, enquanto o nível inferior é constituído por um plano irregular convergindo para o rio São Francisco e apresenta uma cobertura arenosa de cor creme.

Nesta unidade, os cursos d'água apresentam margens escarpadas, formando *canyons*, adaptados à rede de fraturas e falhas que cortam a área. A

montante, seus vales são fracamente entalhados na superfície de aplanamento, possuindo trechos arenosos e pedregosos. Na chegada desses riachos, na base das vertentes escarpadas, existem acumulações de materiais pedregosos e arenosos.

A geomorfologia da bacia, apresentada na Figura 16, possui as seguintes características:

- Pediplano Exumado – Superfície aplanada, irregularmente exumada, devido a retoques sucessivos. Predominância de processos de erosão aureolar, truncando rochas sãs e alteradas.
- Pediplano Homogêneo – Superfície aplanada, retocada, intercalada por inselbergs. Depressão limitada por bordas escarpadas.
- Pediplano Dissecado – Superfície aplanada, diferencialmente dissecada por processos erosivos controlados pelas estruturas.

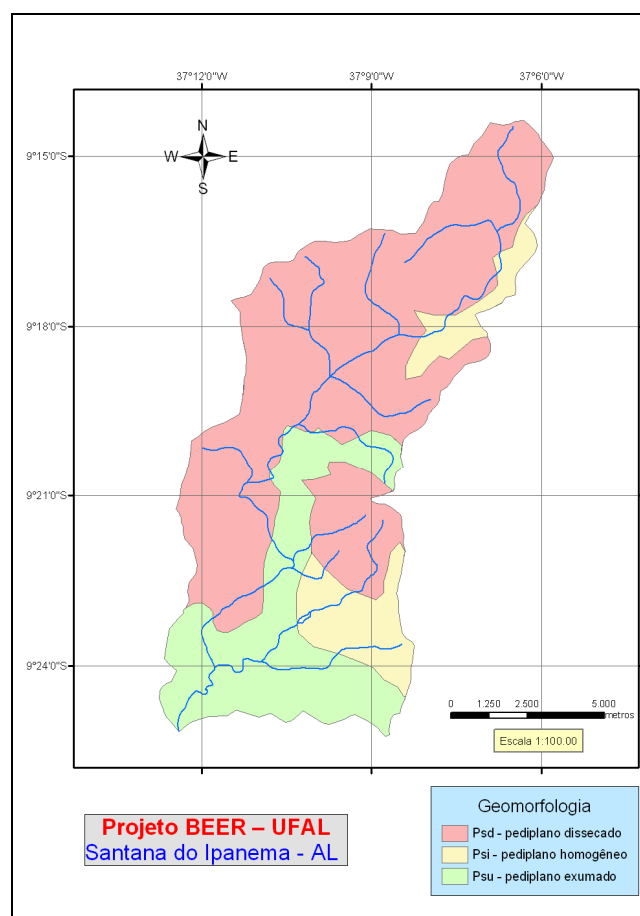


Figura 16. Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do riacho Gravatá
Adaptado de Alagoas (1998)

3.2.6 Cobertura vegetal e uso do solo

A cobertura vegetal predominante ao longo da bacia do riacho Gravatá é a caatinga (Figura 17), que se caracteriza por apresentar folhas durante um curto período de tempo, geralmente no período chuvoso. Esta característica faz com que os troncos e galhos de grande parte das espécies adquiram uma coloração branca e/ou acinzentada, devido ao ressecamento, conforme apresentado na Figura 18.



Figura 17. Caatinga natural



Figura 18. Caatinga na época seca

A cobertura vegetal primária da bacia já foi quase que totalmente desmatada, estando restrita a ambientes de serra (LOPES et al., 2005). Este aspecto pode ser observado nas fotos da Figura 19.



Figura 19. Cobertura nativa restrita aos ambientes de serra

A região de mata ciliar ao longo dos rios possui espécies adaptadas às condições aluvionares dos cursos d'água, e boa parte dela já tem características de antropismo (Figura 20), com desmatamento nas margens dos cursos d'água e nos terrenos de encosta e interflúvio.



Figura 20. Região de mata ciliar antropizada

A Figura 21 apresenta o mapa da cobertura vegetal na bacia do riacho Gravatá.

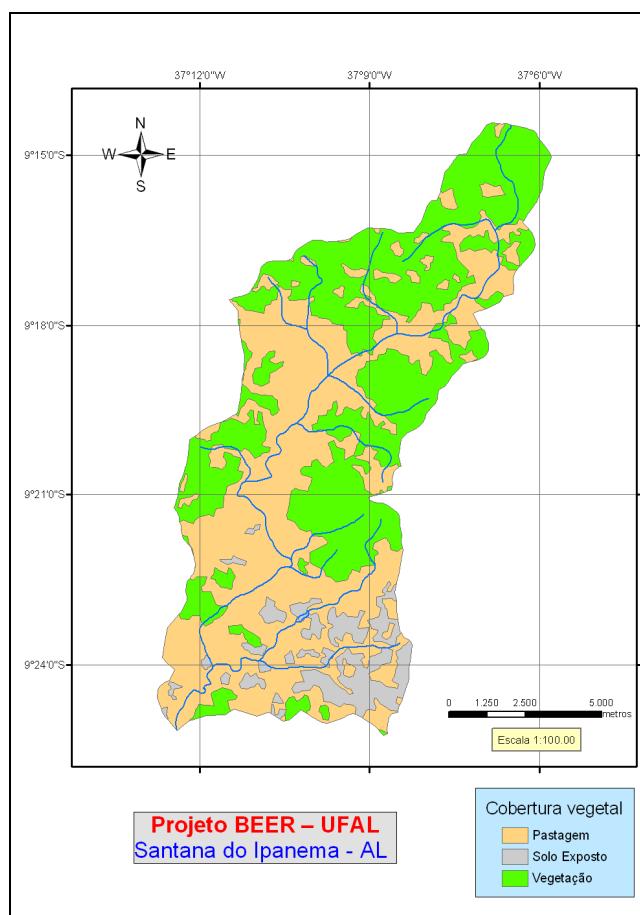


Figura 21. Mapa de cobertura vegetal da bacia hidrográfica do riacho Gravatá
Adaptado de Alagoas (1998)

Quanto ao uso do solo, é caracterizado pela pecuária em toda a bacia, com predomínio de pastagem plantada visando ao abastecimento do rebanho, principalmente bovino.

A pastagem plantada é associada também à própria vegetação natural (Figura 22) e a parcelas cultivadas com forrageiras, tais como milho e palma, essa utilizada na alimentação animal durante os períodos de seca. A Figura 22 exemplifica a agricultura de subsistência na bacia.



Figura 22. Associação da pastagem com a vegetação natural

Na bacia se destaca também a agricultura familiar de subsistência, destacando-se como culturas o feijão e o milho, havendo espaço também, em menor escala, para o algodão, amendoim e mandioca. Há também algumas pequenas culturas frutíferas, como o caju, a pinha, a manga, a jabuticaba e a laranja (LOPES et al., 2005). A Figura 23 exemplifica a agricultura de subsistência na bacia.



Figura 23. Agricultura de subsistência na bacia

3.2.7 Caracterização climatológica histórica

A seca na região de Santana do Ipanema é atenuada, quando comparada a outras regiões nordestinas, devido à sua posição geográfica, com o Planalto Borborema ao norte, o vale do São Francisco ao Sul e o Oceano Atlântico ao leste. O vento que vem do oceano passa pelo vale do São Francisco, choca-se com massas de ar frio vindos do pólo sul e é impulsionado para cima em contato com as serras da região, condensando-se e formando nuvens que beneficiam algumas regiões (LIMA, 1992).

A região apresenta clima do tipo BSh, semi-árido quente, com temperaturas do mês mais frio superiores a 18°C, de acordo com a classificação climática de Köppen, e do tipo 3bTh, mediterrâneo quente ou nordestino de seca média de verão, com índice xerotérmico entre 100 e 150, com 5 a 6 meses secos, e com o mês mais frio apresentando temperaturas superiores a 15°C, pela classificação bioclimática de Gaussen (CPRM, 2005).

3.2.7.1 Histórico do monitoramento na região

A rede de observação hidrometeorológica do Estado apresenta inúmeros problemas desde a criação do Centro Estadual de Meteorologia de Alagoas, antes denominado Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos (NMRH-AL). Possuiu, nestes anos de existência, inúmeros parceiros, como a antiga Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE, que disponibilizou para o estado de Alagoas inúmeros pluviômetros convencionais (Ville de Paris), formando, por muitos anos, a sua rede de monitoramento.

Atualmente, a Diretoria de Meteorologia (DMET) da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH) monitora também neste município uma estação meteorológica automática pertencente ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com sensores de vento, pressão, temperatura e umidade, com dados desde 2005.

Um pluviômetro remanescente desta época (Figura 53) ainda se encontra em funcionamento na cidade de Santana do Ipanema, na Fazenda Barroso, com dados desde 1912 (código 937006), antes pertencentes ao também extinto Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE).

A partir do ano de 2005, passaram a ser coletados e compartilhados pelo Sistema de Monitoramento Agrometeorológico – Agritempo (COLTRI et al., 2007), dados diários de temperatura máxima, temperatura mínima, pluviometria e DAAS (disponibilidade atual de água no solo).

A caracterização climatológica histórica aqui apresentada, portanto, refere-se aos dados coletados em apenas um ponto, localizado na parte urbana do município de Santana do Ipanema, um pouco fora da bacia hidrográfica do riacho Gravatá, porém únicos dados disponíveis para se ter uma tendência do clima na bacia.

3.2.7.2 Precipitação

A partir dos dados da estação 937006, de Santana do Ipanema, mantida durante 77 anos pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), foram calculadas as médias pluviométricas mensais e seus respectivos desvios padrões, conforme a Figura 24. A estação citada tem uma latitude de 9° 22' e 37° 15' de longitude, e está localizada em uma altitude de 250 metros, porém deixou de funcionar em 2000.

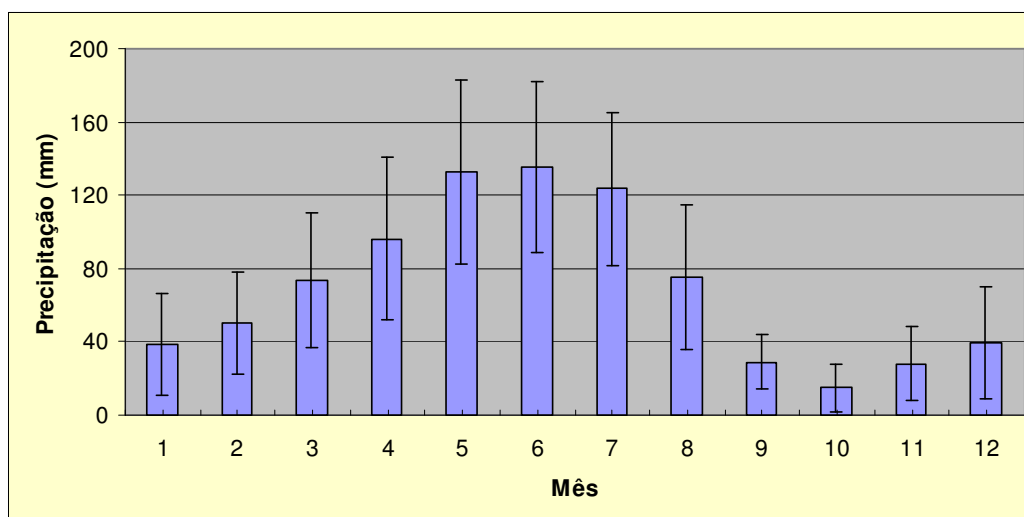


Figura 24. Precipitação média histórica em Santana do Ipanema

Observa-se que o trimestre chuvoso ocorre de maio a julho, com médias superiores a 120 mm mensais, e o período de setembro a fevereiro apresenta uma precipitação normalmente inferior a 50 mm mensais.

A média anual dos dados observados é de 853,9 mm, com desvio-padrão de 403 mm.

3.2.7.3 Temperatura

Os dados históricos de temperatura foram obtidos pela mesma estação, de código 937006, também a partir de 77 anos de dados. A temperatura média, assim como a média das temperaturas máximas e mínimas mensais, são apresentadas na Figura 25.

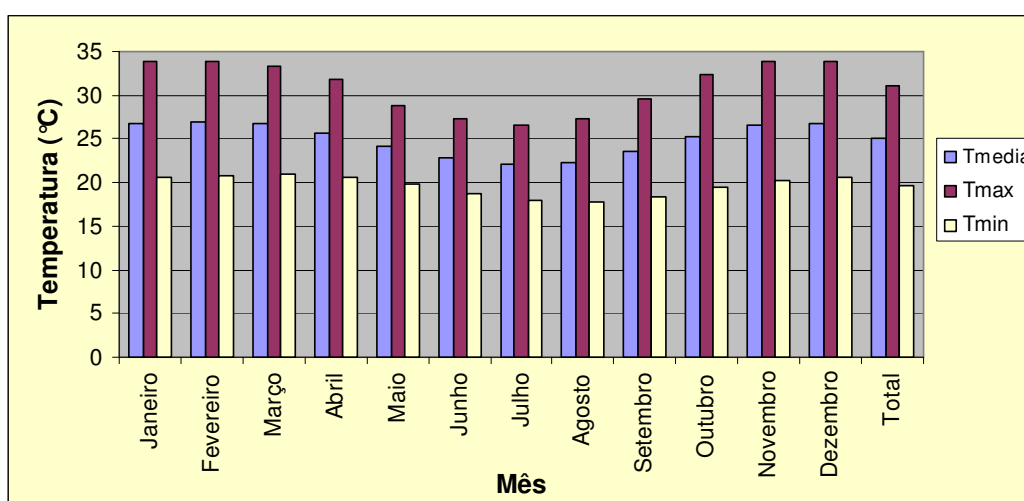


Figura 25. Valores médios de temperatura em Santana do Ipanema

A amplitude térmica diária média é menor nos meses de maio a agosto, com valores médios entre 8,5°C e 9,6°C. As maiores amplitudes térmicas diárias são encontradas nos meses de novembro a fevereiro, sempre ultrapassando os 13°C em média. A amplitude térmica diária média durante o ano é de 11,4°C.

3.2.7.4 Umidade relativa do ar

As médias mensais das umidades relativas do ar para três horários diários, em 13 anos de medição da estação 937006, são apresentadas na Figura 26.

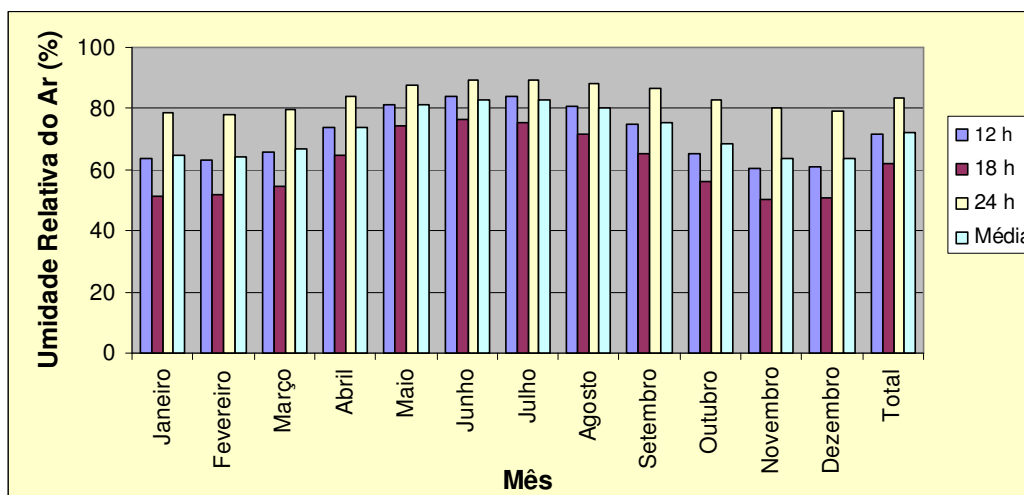


Figura 26. Valores médios de umidade em Santana do Ipanema

3.2.7.5 Evapotranspiração

Os dados históricos de evapotranspiração consultados para Santana do Ipanema foram calculados no Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio Ipanema (ALAGOAS, 1998), equivalentes a dados coletados durante 71 anos. As médias mensais de evapotranspiração potencial e evapotranspiração real são apresentadas na Figura 27.

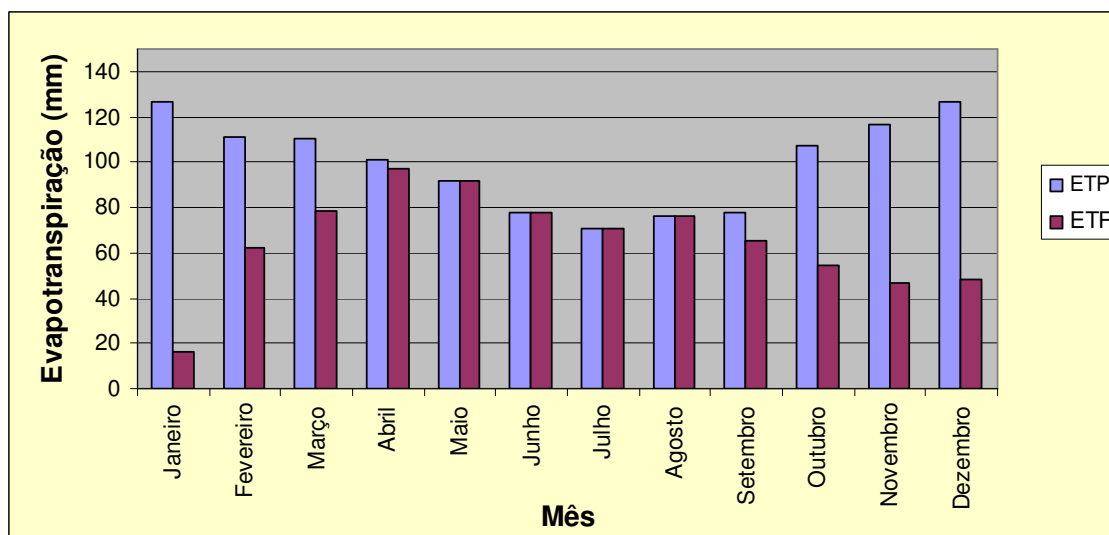


Figura 27. Valores médios de evapotranspiração em Santana do Ipanema

3.2.7.6 Balanço hídrico

Utilizando-se os dados de valores médios de precipitação, temperatura, umidade e evapotranspiração, pode-se estimar o balanço hídrico histórico para a região, conforme mostrado na Figura 28, adaptada de Alagoas (1998).

Nota-se, a partir do gráfico representado na Figura 28, que há déficit hídrico em quase todo o ano, excetuando-se os meses de junho e julho, além de parte do mês de agosto. O maior déficit ocorre no mês de janeiro, equivalente a 130 mm, e o maior excesso de água, 32 mm, no mês de agosto.

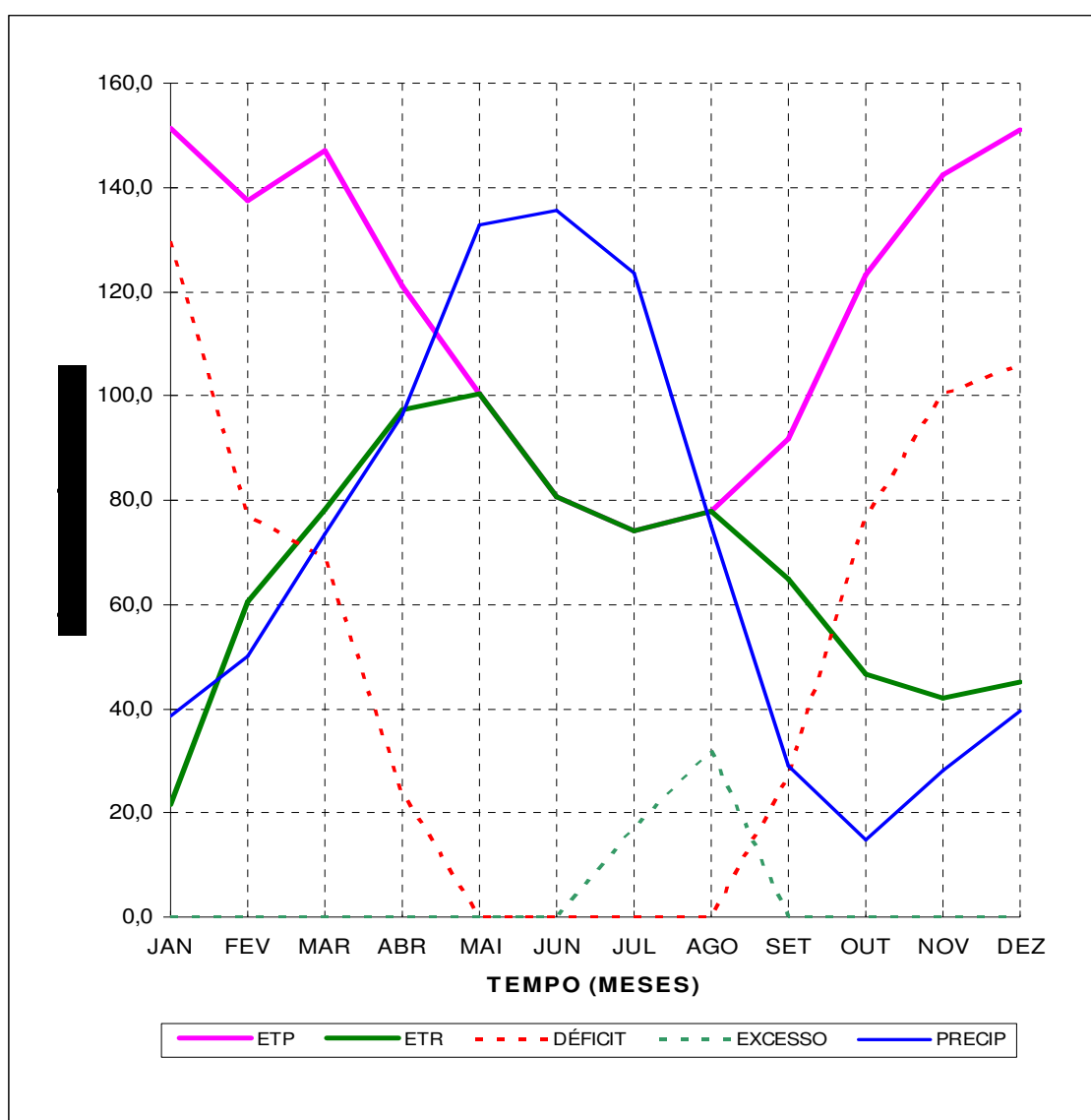


Figura 28. Balanço hídrico em Santana do Ipanema
Adaptado de Alagoas (1998)

4 IMPLANTAÇÃO DA BACIA EXPERIMENTAL DE SANTANA DO IPANEMA

A Bacia Experimental de Santana do Ipanema (BESI) foi implantada na bacia hidrográfica do riacho Gravatá, inserida no município de Santana do Ipanema.

A escolha do local para implantação da bacia experimental e unidades de estudo, além da construção de estruturas de monitoramento e aquisição e instalação de aparelhos, foi conduzida durante o período de realização deste estudo, e, portanto, contemplada na metodologia deste trabalho.

4.1 Escolha das unidades de estudo

O processo de escolha dos locais de implantação das unidades de estudo (microbacias, sub-bacias, parcelas e bateria de piezômetros), dentro da bacia hidrográfica do riacho Gravatá, onde seriam instalados os equipamentos e construídas estruturas com o intuito de avaliar os aspectos hidroclimatológicos da região, aconteceu durante boa parte do ano de 2007, através de visitas periódicas a campo para reconhecimento da região.

4.1.1 Critérios propostos

Dentro do projeto BEER em Santana do Ipanema, foi previsto o monitoramento não só dos processos hidrológicos superficiais, foco deste trabalho, mas também de águas subterrâneas e processos hidrossedimentológicos. Por este motivo buscou-se implantar a bacia experimental em uma região que possibilitasse os diversos estudos dentro do projeto.

Foram realizadas diversas visitas, desde a nascente à foz do riacho Gravatá, à procura de áreas que melhor pudessem atender aos seguintes critérios:

- Segurança para a implantação dos equipamentos;
- Capacidade de concentração dos diversos estudos da bacia experimental;

- Viabilidade de construção das estruturas de monitoramento;
- Facilidade de acesso ao local;
- Possibilidade de monitoramento constante de todos os processos e durante todo o ano;

Além disso, outro aspecto que mereceu relevância durante a escolha das áreas de monitoramento do escoamento superficial na bacia experimental foi a possibilidade de estudo dos processos hidrológicos em diferentes escalas, definindo-se, assim, o monitoramento de sub-bacias aninhadas, variando de 0,1 km² a 3 km², e também de uma microbacia da ordem de 0,5 ha.

Essas sub-bacias escolhidas para estudo precisaram também estar localizada em áreas que facilitassem a construção de estruturas de monitoramento do escoamento superficial, com seções totalmente encaixadas em um leito de rio, descartando-se áreas que pudessem ser planície de inundação por grande parte do tempo.

4.1.2 Dificuldades encontradas

Durante todo o processo de escolha dos locais de instrumentação da bacia experimental, diversas dificuldades foram encontradas.

Com relação à escolha de sub-bacias, a maior dificuldade foi encontrar seções nas quais pudessem ser construídas estruturas medidoras de vazão que pudessem funcionar eficientemente durante todo o ano.

Essa dificuldade se deveu ao fato que, na maioria dos casos, as seções principais dos corpos d'água da região, devido à grande variabilidade no regime de escoamento durante o ano, não conseguem drenar toda a água, e isso forma seções secundárias que funcionam como uma larga planície de inundação, impossibilitando a construção de estruturas que propiciem um adequado monitoramento dos processos hidrológicos.

Exemplos de regiões com essas características, fotografadas em período cujo escoamento atingia apenas a calha principal, são mostradas na Figura 29.



Figura 29. Planícies de inundação

Os leitos da região, em grande parte cheios de rochas (Figura 30), também impuseram dificuldades na escolha de áreas, visto que as estruturas de medição de vazão não poderiam ser construídas nesses locais, devido à perda de precisão na medição que poderia ser ocasionado pela variação brusca do formato da seção antes e depois da eventual estrutura.



Figura 30. Presença de rochas nos leitos de cursos d'água

Sob o ponto de vista logístico, procurou-se áreas em que o acesso pudesse ser feito durante todo o ano, pois nem todos os aparelhos são automáticos, necessitando a visita diária de uma pessoa instruída para medição. Isso excluiu diversas áreas em que se passava por estradas que eram inundadas pelo rio em épocas de chuvas médias da região, como mostrado na Figura 31.



Figura 31. Trechos das estradas suscetíveis à inundação

4.2 Caracterização das unidades de estudo

A partir dos critérios propostos, foram definidas duas sub-bacias e uma microbacia como unidades de estudo da bacia experimental de Santana do Ipanema. Elas estão concentradas em duas fazendas da região, e localizadas na bacia do riacho Gravatá conforme a Figura 32 e a Tabela 06.

Tabela 06. Coordenadas dos exutórios das unidades de estudo

Unidade	Latitude	Longitude	Área
Microbacia	-37°10'56,33"	9°21'20,49"	5.000 m ²
Sub-bacia	-37°11'02,64"	9°20'31,20"	3,35 km ²
Sub-bacia	-37°11'17,06"	9°20'08,29"	0,09 km ²

4.2.1 Sub-bacias

As duas sub-bacias escolhidas estão localizadas em propriedades particulares. A sub-bacia 01 tem uma área de 3,35 km² e a sub-bacia 02, aninhada a esta, tem uma área de 0,09 km², conforme a Figura 32.

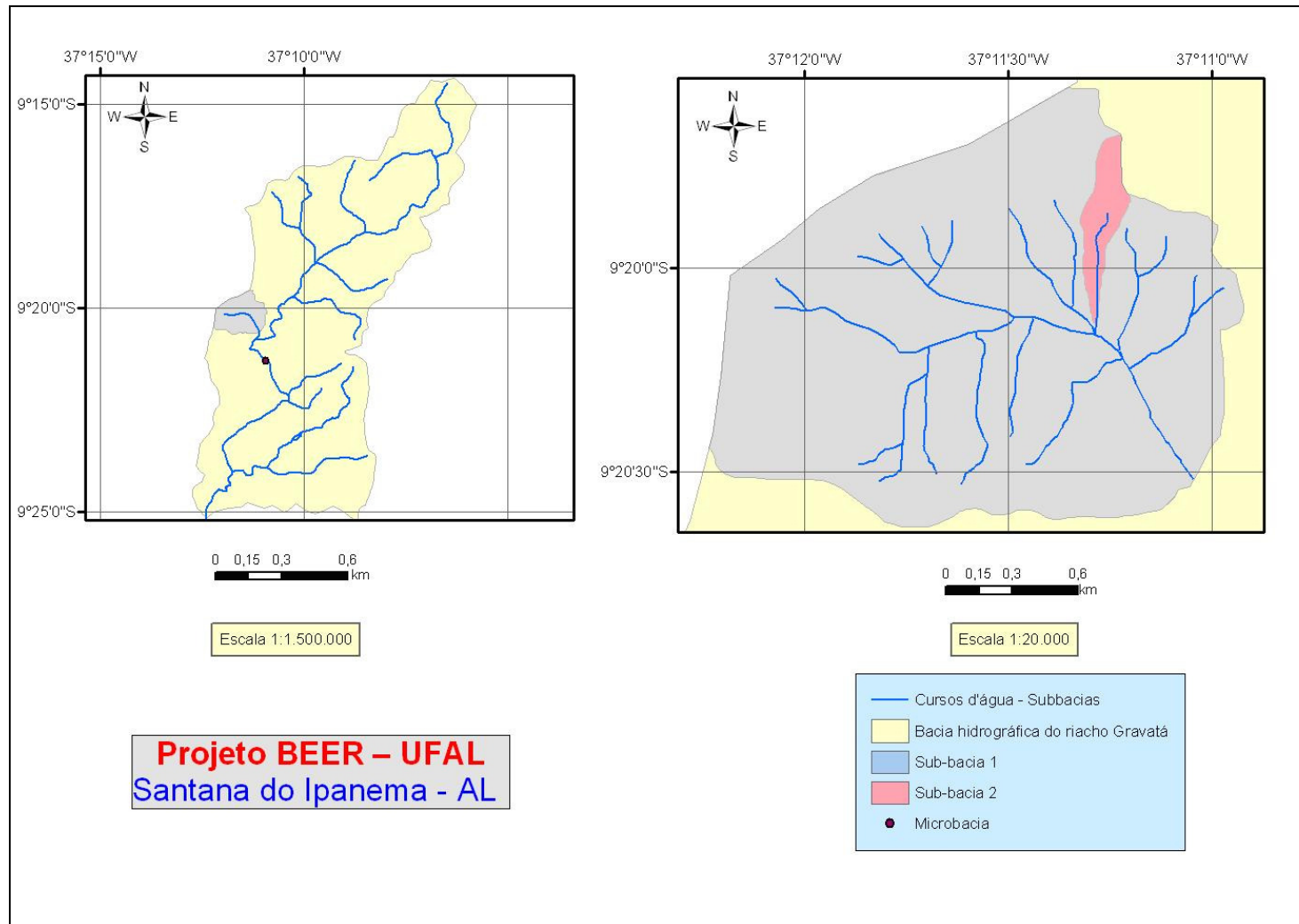


Figura 32. Localização das unidades de estudo na BHRG

Para a caracterização das sub-bacias foi feito um refinamento no modelo digital do terreno original utilizando a técnica de Krigagem através do software Arcgis. Segundo Valeriano (1999), a utilização deste tipo de interpolação nos dados originais do USGS permite sua utilização em escalas um pouco mais detalhadas, principalmente em ambientes agrícolas.

Bloschl & Sivapalan (1995) e Bruneau et al. (1995) constataram, comparando hidrogramas de escoamento superficial para diferentes discretizações em uma mesma bacia, que quando os processos em pequena escala são dominantes na bacia hidrográfica, modelos digitais de elevação com maior grau de detalhamento são necessários para uma representação mais coerente da realidade. No mesmo sentido, Miller et al. (1999) concluíram que a sensibilidade à resolução espacial do modelo digital do terreno é maior nas bacias pequenas.

A Figura 33 apresenta o modelo digital do terreno gerado pelo refinamento do MDT inicial, que alterou a resolução espacial para 8 x 8 metros, e a curva hipsométrica da mesma.

Em um processo como esse, é necessário que as novas informações geradas sejam compatíveis com a realidade a ser retratada. Dessa forma, após o refinamento do MDT foram realizadas visitas a campo que permitiram concluir que houve uma boa representação da sub-bacia com o refinamento adotado, permitindo a identificação de elementos topográficos característicos da bacia e sua rede de drenagem principal.

Foram geradas, então, as curvas de nível a cada 20 metros, de acordo com a Figura 34. Os parâmetros morfológicos das sub-bacias são apresentados na Tabela 07.

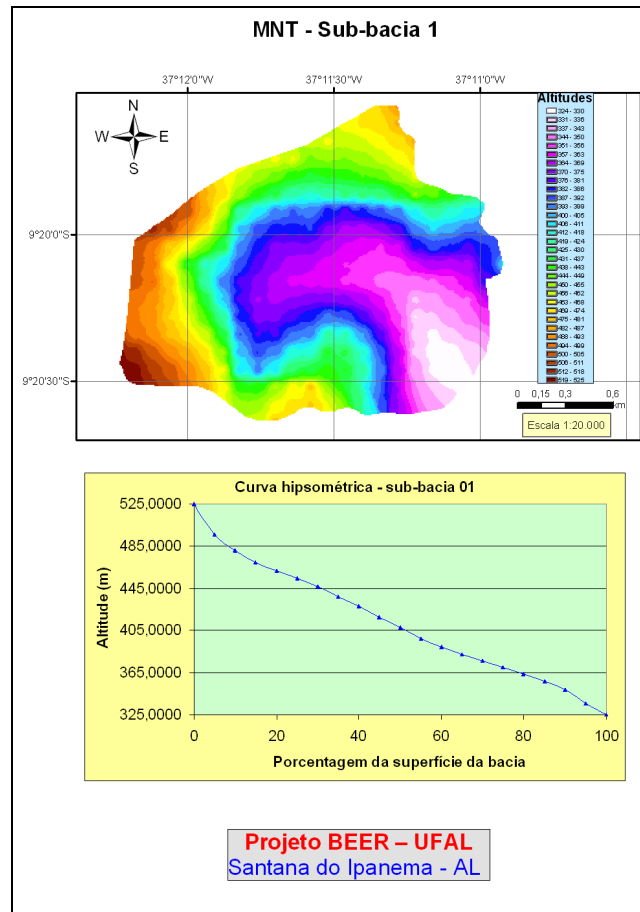


Figura 33. MDT das sub-bacias

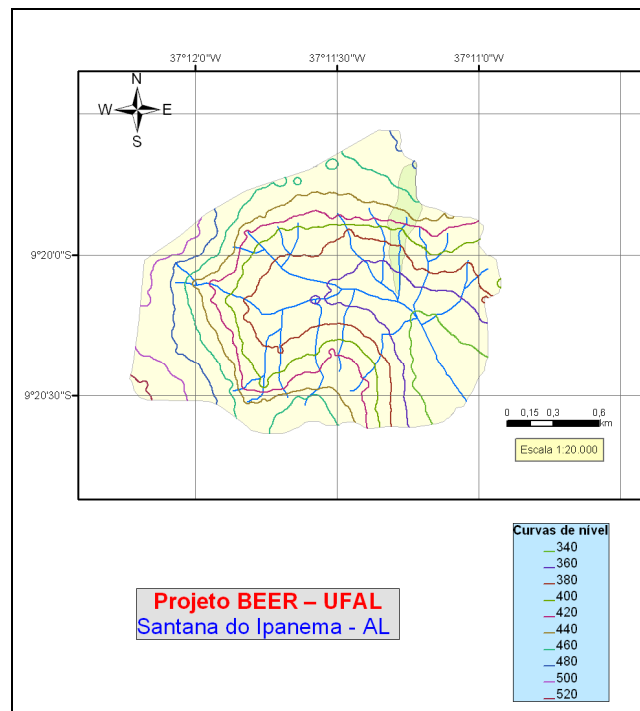


Figura 34. Curvas de nível das sub-bacias

Tabela 07. Características morfológicas da BESI

	Sub-bacia 01	Sub-bacia 02
Área	3,35 km ²	0,09 km ²
Perímetro	7,55 km	1,86 km
Fator de forma	0,57	0,28
Índice de compactidade	1,16	1,74
Densidade de drenagem	3,29 km/km ²	6,34 km/km ²
Comprimento do rio principal	2,43 km	0,57 km
Extensão da rede de drenagem	11,02 km	0,57 km
Sinuosidade do rio principal	1,16	1,05

A sub-bacia 01 possui, próximo ao seu exutório (Figura 35), uma região aluvionar (Figura 36) onde, inclusive, é feito um trabalho, dentro do mesmo projeto, referente ao monitoramento do aquífero da região.



Figura 35. Visão panorâmica do exutório da sub-bacia 01



Figura 36. Região aluvionar de monitoramento do aquífero

A sub-bacia 02 está aninhada na sub-bacia 01 e em seu exutório foi construída uma calha Parshall (Figura 37) de garganta de 24 polegadas. Essa estrutura mede vazões na faixa de 11,9 L/s a 937,3 L/s. As dimensões da estrutura estão apresentadas na Figura 38.



Figura 37. Calha Parshall da sub-bacia 02

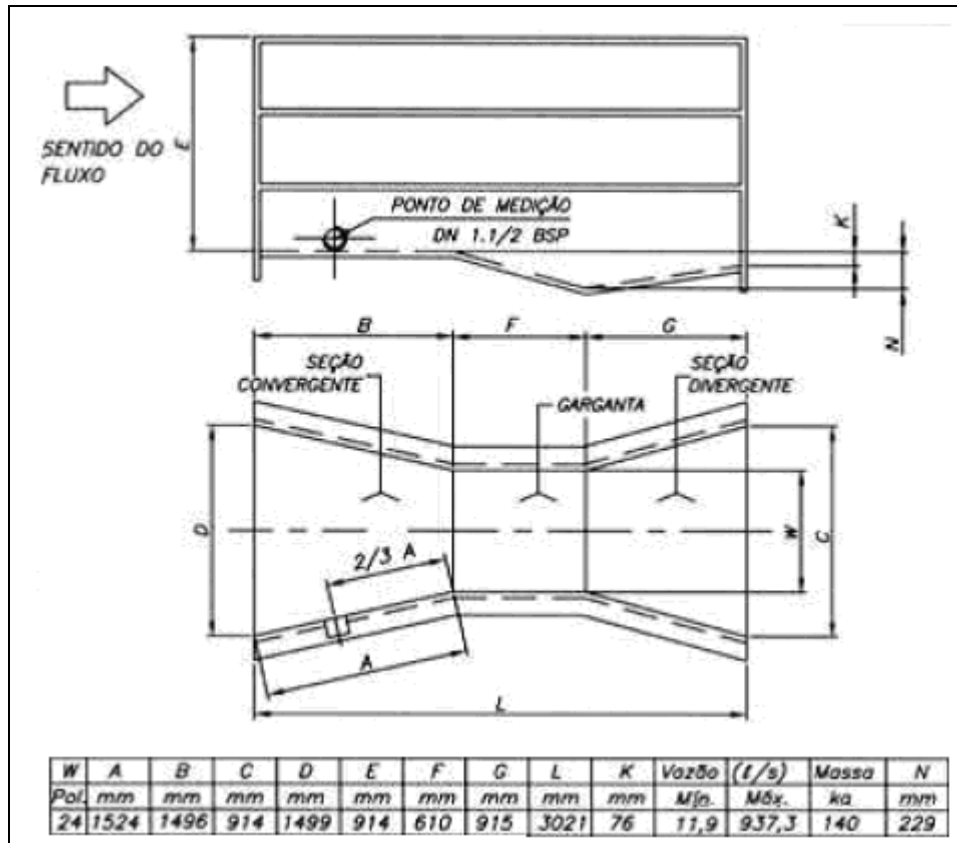


Figura 38. Dimensões da calha Parshall

A sub-bacia 02 tem um relevo acidentado à montante, onde coexistem regiões já desmatadas e regiões de caatinga natural, e é plana em seu trecho inicial, predominantemente desmatado para a pecuária. A sub-bacia 01 possui uma predominância de áreas utilizadas para pastagem na sua região central, cercada por caatinga, principalmente nas partes mais altas. Além disso, possui também uma região aluvionar perto do seu exutório e algumas regiões de caatinga ainda conservada ao longo de alguns cursos d'água.

Conforme dito anteriormente, a vegetação de caatinga se caracteriza por uma grande variação em seu regime foliar durante o ano. Pode-se perceber, através de duas fotos tiradas na mesma direção e quase na mesma posição, a diferença entre a vegetação em agosto de 2007 (Figura 39) e janeiro de 2008 em parte da sub-bacia 02 (Figura 40).



Figura 39. Visão da sub-bacia 02 (agosto de 2007)



Figura 40. Visão da sub-bacia 02 (janeiro de 2008)

A Figura 41 apresenta a caracterização de uso e ocupação do solo das sub-bacias.

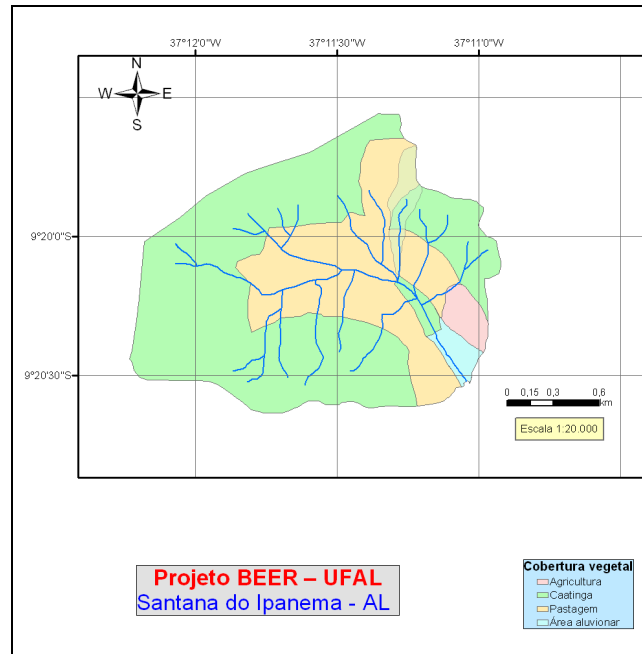


Figura 41. Cobertura vegetal das sub-bacias

4.2.2 Microbacia

A microbacia está localizada na Fazenda Gravatá, na propriedade do Sr. Amâncio Leobino, e tem uma área de 0,5 ha.

Foi construída nessa unidade de estudo uma fossa coletora de sedimentos, utilizada para o monitoramento hidrossedimentológico, foco de outros trabalhos do projeto (Figura 42).



Figura 42. Fossa coletora de sedimentos

Esta microbacia é utilizada para a agricultura de subsistência no período chuvoso, sendo ocupada por plantações de milho e feijão, conforme a Figura 43.



Figura 43. Microbacia ocupada com agricultura de subsistência

4.3 Implantação do aparato experimental

O aparato experimental previsto para a bacia experimental de Santana do Ipanema é composto pelos seguintes itens.

- 1 (uma) estação climatológica compacta
- 2 (dois) pluviômetros de báscula
- 5 (cinco) sensores de pressão para medição de nível
- 5 (cinco) pluviômetros
- Bateria de piezômetros
- 2 (dois) tanques evaporimétricos

4.3.1 Estação climatológica compacta

A estação climatológica compacta, da marca *Campbell Scientific*, foi instalada na Bacia Experimental de Santana do Ipanema (Figura 44) no mês de novembro, próximo à calha Parshall construída na sub-bacia 02. Ela é composta por sensores de medição de temperatura do ar, chuva, velocidade e

direção do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, conforme a Tabela 08.

Tabela 08. Sensores presentes na estação climatológica compacta

Variável	Sensor	Precisão	Faixa de medição
Chuva	TE525	± 1% de 0 a 10 mm/h -3% de 10 a 20 mm/h -5% de 20 a 30 mm/h	x
Velocidade do vento	Anemômetro 03001	± 0,5 m/s	0 a 50 m/s
Direção do vento	Vane 03001	± 5°	0 a 360°
Umidade	CS 215	± 2%	0 a 100%
Temperatura	CS 215	± 0,4°C	-40°C a 70°C
Radiação solar	Piranômetro CS 300	± 5% p/ valores diários	0 a 2000 W/m ²



Figura 44. Estação climatológica compacta

Os dados da estação climatológica são registrados a cada 10 segundos e armazenados a cada 2 minutos (chuva) ou 60 minutos (temperatura, pressão, radiação, velocidade e direção do vento – valores médios, máximos e mínimos)

em um datalogger CR800, conforme definido em sua programação. Esses registros armazenados são coletados em campo mensalmente.

4.3.2 Pluviógrafos e pluviômetros

Foi instalado um pluviógrafo de báscula, da marca *Global Water*, próximo à microbacia. Cada basculada equivale a 0,200 mm, e a instalação ocorreu em julho de 2007.

Foi instalado um pluviômetro “alternativo” (MELO et al., 2006) ao lado do pluviógrafo da microbacia, conforme a Figura 45, com o intuito de comparar os valores diários de lâmina precipitada. Se confirmada uma relação coerente entre os dados observados em ambos os medidores, a idéia é instalar diversos pluviômetros do mesmo tipo em outras partes da bacia experimental, para estudar a precipitação na região de forma mais completa e confiável.



Figura 45. Fotos do pluviômetro alternativo

O limitante, por enquanto, é o fato do projeto não contar com uma pessoa em campo continuamente que possa coletar os dados diariamente, Foi feita uma tentativa de incumbir alguém da própria família do proprietário do terreno para fazer as medições, mas ela se mostrou sem sucesso, devido às inconsistências observadas nos dados que foram apresentados à equipe.

4.3.3 Tanques evaporimétricos

Está prevista ainda no projeto a instalação de dois tanques classe A, um na microbacia e um na sub-bacia 02. Foram instalados dois tanques alternativos denominados “classe B” (SANTOS, 2004) nos mesmos locais (Figura 46), porém a medição não está sendo feita, devido ao mesmo fator limitante citado no item anterior: a falta de uma pessoa em campo que possa fazer as medições diárias de nível do tanque.



Figura 46. Foto da instalação do tanque evaporimétrico alternativo

4.3.4 Linígrafos

Para a medição de nível d'água, foram instalados dois linígrafos, sendo um na calha Parshall da sub-bacia 02 e um na fossa de sedimentos construída na microbacia. Está prevista ainda no projeto a instalação de no mínimo mais

dois linígrafos, para medição de vazão no exutório das sub-bacias 01 e 03, a ser implantada.

O sensor do linígrafo é da série KPSI 500, da marca *Pressure System*, com acurácia de 1% do nível d'água. Os registros são feitos a cada 10 segundos e armazenados a cada 1 minuto, em um *datalogger* CR200, da marca *Campbell Scientific* (Figura 47)



Figura 47. *Datalogger* do linígrafo

4.3.5 Dificuldades encontradas

Para a instalação dos aparelhos e construção de estruturas auxiliares diversas dificuldades foram encontradas durante o processo de implantação da BESI. Mesmo tendo adotado como um dos critérios para escolha do local de implantação da BESI a facilidade de acesso, as estradas em alguns momentos do ano se tornavam quase que inviáveis à passagem de veículos para transporte de materiais e equipamentos

Da mesma forma, a compra de material para instalação dos equipamentos esbarrou em dificuldades de disponibilidade no mercado local, forçando, muitas vezes, o deslocamento para localidades vizinhas.

Outra dificuldade se refere à qualificação da mão de obra local para execução dos serviços de instalação de equipamentos. Alguns serviços, como a execução da Calha Parshall e da fossa de sedimentos, exigem precisão nas

dimensões e no acabamento para permitir medições confiáveis das variáveis hidrológicas.

Combinando a dificuldade para encontrar pessoal competente para esta tarefa com o início do período chuvoso, houve atrasos no cronograma de instalação da BESI. Por diversas vezes, as fortes chuvas destruíram as estruturas montadas para o recebimento dos equipamentos antes que elas tivessem sido concluídas.

Algumas outras dificuldades foram latentes durante a implantação da BESI, tais como:

- Apesar do carro comprado pelo projeto ser eficiente para uso conjunto em campo e na cidade, a locomoção para alguns pontos durante o reconhecimento da bacia hidrográfica do riacho Gravatá foi prejudicada durante o período chuvoso;
- Foi necessário improvisar algum tipo de iluminação, quando instalações/construções se arrastavam até o término da luz natural;

Apesar de todas as dificuldades inerentes aos trabalhos de campo, a condução dos trabalhos de implantação da BESI ocorreu de forma harmoniosa, sobretudo com os moradores dos locais onde os equipamentos foram instalados.

5 APLICAÇÃO DO MODELO CHUVA-VAZÃO

O modelo Kineros2 foi aplicado à bacia hidrográfica do riacho Gravatá (BHRG) e à sub-bacia 01 da Bacia Experimental de Santana do Ipanema (BESI), para modelagem do escoamento superficial. Neste capítulo são descritas as metodologias e critérios de definição dos parâmetros do modelo para cada unidade de estudo, além dos cenários de simulação.

Nesta etapa, além da discretização das bacias, foram estimados os parâmetros do modelo a partir da caracterização do tipo e uso do solo, cobertura vegetal e relevo da bacia.

Foram propostos diversos cenários de uso e ocupação do solo, bem como efetuada a avaliação do escoamento na bacia hidrográfica do riacho Gravatá e na sub-bacia para esses cenários. Considerou-se, ainda, a influência das condições iniciais do solo da região.

Foi avaliada também a influência do grau de resolução espacial utilizado para a obtenção dos parâmetros de entrada do modelo, a partir da análise do escoamento para duas diferentes discretizações para a sub-bacia 01.

5.1 Discretização das bacias

A discretização da bacia hidrográfica do riacho Gravatá e da sub-bacia da BESI foi feita segundo os critérios adotados por Lopes (2003):

- Traça-se o sistema de canais;
- Delimita-se as áreas que contribuem para cada canal, cruzando-se as curvas de nível perpendicularmente;
- Divide-se as áreas em mais de um elemento se houver mudanças significativas na declividade ou uso do solo;
- Traça-se linhas de fluxo ao longo dos planos. O comprimento de cada linha determina o comprimento do plano, e a largura é definida pela divisão da área do elemento pelo seu comprimento;
- A declividade de cada elemento é determinada como a diferença de cota ao longo do elemento dividido pelo seu comprimento;
- O comprimento dos canais é equivalente ao medido nos mapas;

Foram trabalhados dois níveis de detalhamento diferentes. Primeiramente, foi realizada a discretização a partir de mapa em escala 1:100.000 da bacia hidrográfica do riacho Gravatá. Nesta discretização, a sub-bacia 01 corresponde a apenas seis elementos.

O segundo nível de detalhamento foi feito a partir da discretização da sub-bacia 01, com a utilização do modelo numérico do terreno refinado e curvas de nível a cada 10 metros.

5.1.1 Bacia hidrográfica do riacho Gravatá

A bacia hidrográfica do riacho Gravatá foi discretizada em 234 elementos, sendo 169 planos e 65 canais, conforme a Figura 48.

O Apêndice A apresenta as características geométricas de cada elemento discretizado na BHRG.

Nessa resolução de discretização, os elementos planos tiveram áreas variando de aproximadamente 76.980 m² (0,008 km²) a 4.250.000 m² (4,25 km²). Para exemplificar, o segundo elemento, de número 143, teve a área aproximadamente 55 vezes maior que o primeiro, número 76.

Os elementos planos tiveram comprimento variando de 101,88 m (elemento 88) a 1242,12 m (elemento 08). Para os canais, os comprimentos variaram de 265,27 m (elemento 161) a 2.792,45 m (elemento 130).

A declividade máxima de um elemento plano foi de 44,6% (elemento 12), enquanto a mínima foi de 1,1% (elemento 198). Para os canais, a declividade variou entre 0,3% (elemento 221) e 40,7% (elemento 112).

Para os elementos planos, a área média foi de aproximadamente 740.000 m² (0,74 km²), o comprimento médio de 669,81 m e a declividade média de 12,85 %. Para os canais, o comprimento médio foi de 942,18 m e a declividade média de 4,27%.

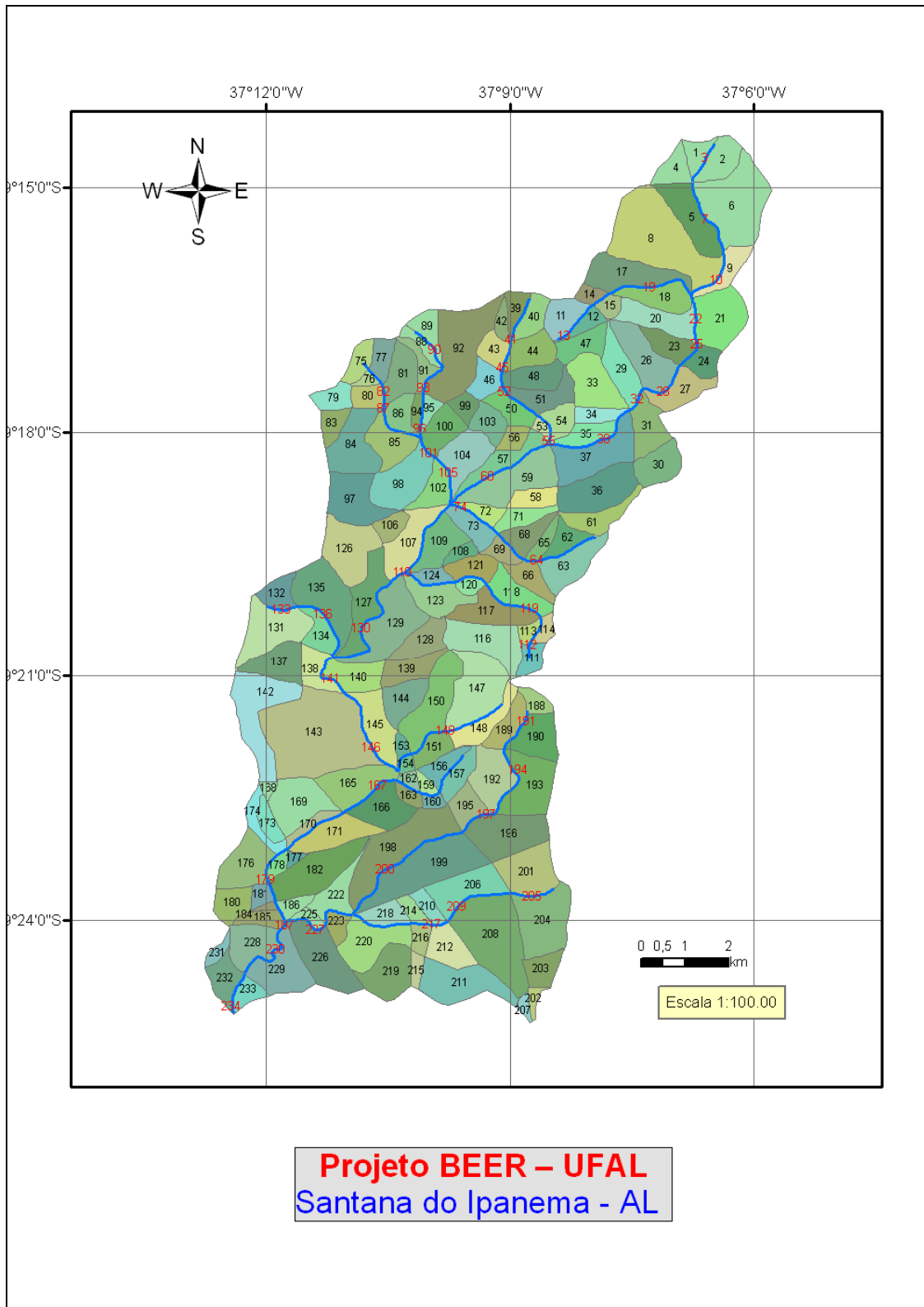


Figura 48. Discretização da bacia hidrográfica do riacho Gravatá

5.1.2 Sub-bacias

Utilizando o modelo refinado, a sub-bacia 01 foi discretizada em 147 elementos, sendo 44 canais e 103 planos, conforme a Figura 49. O Apêndice B apresenta as características geométricas de cada elemento discretizado nas sub-bacias.

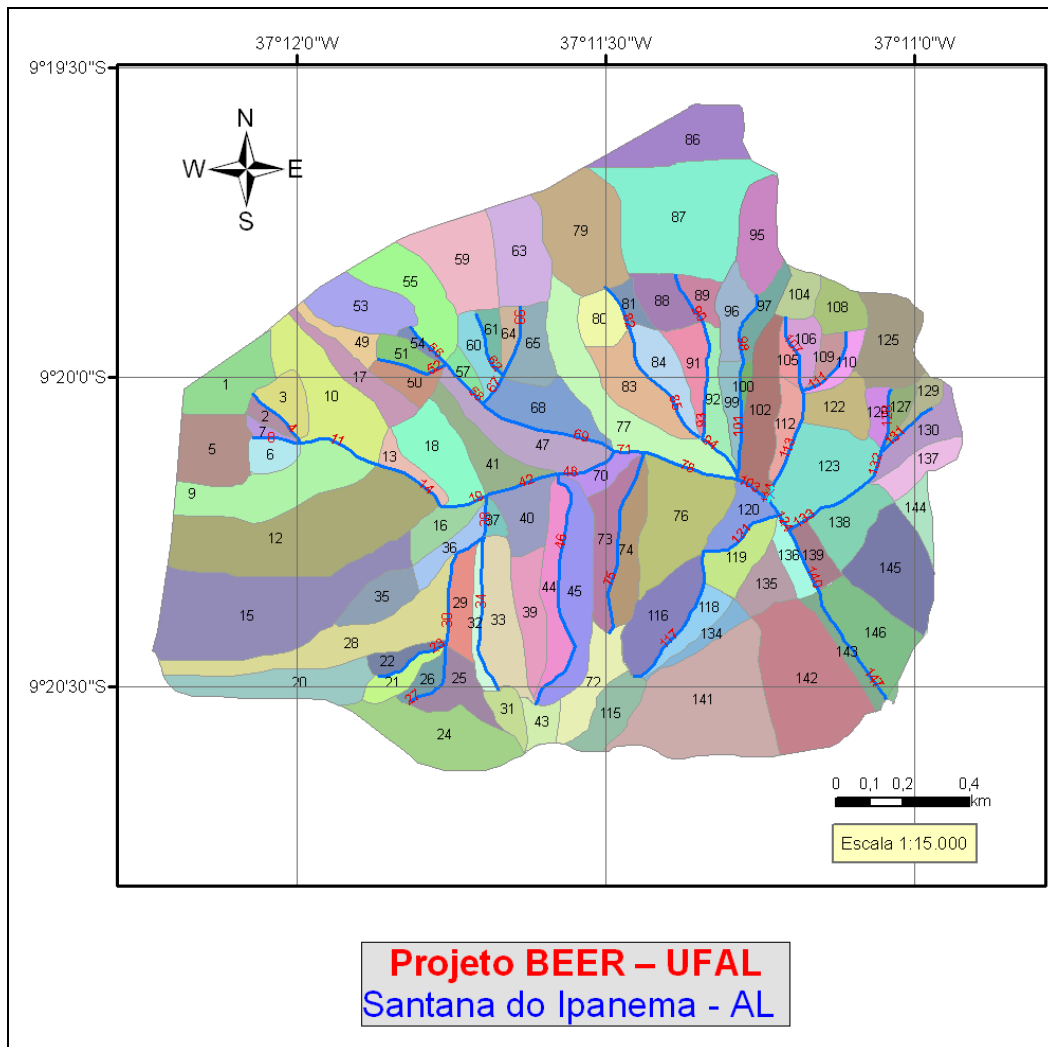


Figura 49. Discretização da sub-bacia 01

A sub-bacia 02 correspondeu a 07 elementos (05 planos e 02 canais) nessa discretização. A discretização dessa unidade de estudo não foi realizada de maneira particularizada pelo fato do modelo digital do terreno utilizado, mesmo refinado, não permitir tal grau de detalhamento, e os levantamentos topográficos em campo para a mesma não estarem finalizados.

Para esta segunda resolução de discretização, a área dos elementos planos variou entre 4.160 m² e 148.366 m². O elemento 12 foi o maior, cerca de 35,5 vezes o tamanho do elemento 54, o menor.

O comprimento dos elementos planos variou de 52,49 m (elemento 124) a 848,18 m (elemento 28). O comprimento dos canais variou entre 265,27 m (elemento 161) a 766,01 m (elemento 46).

Para os elementos planos, a declividade máxima foi de 29,2% (elemento 35), e a mínima de 1,3% (elemento 112). A declividade dos canais variou entre 0,1% (elemento 48) e 30,6% (elemento 82).

A área média dos elementos planos foi de aproximadamente 32.391 m², o comprimento médio de 208,25 m e a declividade média de 11,11 %. Para os canais, o comprimento médio foi de 250,4 m e a declividade média de 11,70%.

5.2 Determinação dos parâmetros

Devido à baixa profundidade dos solos da região, foi considerada apenas uma camada. A temperatura da água foi considerada como 25°C, que corresponde à temperatura média histórica de Santana do Ipanema.

O diâmetro representativo das partículas do solo foi considerado como aquele em que 50% da amostra em peso tem diâmetro maior. Este parâmetro não tem influência na modelagem do processo chuva-vazão, e seu valor foi definido a partir de análises granulométricas realizadas nas sub-bacias.

5.2.1 Parâmetros relacionados ao tipo de solo

A partir da textura do solo, foram estimados os valores para o **Grau de Capilaridade** (G), **Porosidade** (ϕ) e índice de distribuição do tamanho dos poros (parâmetro **Distribuição** - λ), conforme relações estabelecidas por Rawls et al. (1982). A Tabela 09 apresenta os valores desses parâmetros para cada um dos tipos de textura encontrados nos solos da bacia hidrográfica do riacho Gravatá.

Tabela 09. Relação entre a textura e os parâmetros de infiltração (RAWLS et al., 1982)

Textura do solo	ϕ	λ	G (cm)
Areia	0,437	0,7	5
Areia Franca	0,437	0,6	7
Franco arenoso	0,453	0,4	13
Franco	0,463	0,3	11
Franco argiloso	0,464	0,2	26

A partir desses valores, foi feita, em cada unidade de mapeamento, a média ponderada entre os valores dos parâmetros encontrados em cada classe de solo contida na mesma.

Para exemplificar o procedimento, far-se-á o cálculo da capilaridade na unidade de mapeamento RRq2. Essa unidade possui três classes de solo: os solos neossolos regolíticos tem textura arenosa ($G = 5$ cm) e ocupam 50% da unidade, os solos neossolos litólicos possuem textura franca ($G = 11$ cm) e ocupam 30% da unidade, e os planossolos também têm textura franca ($G = 11$ cm) e estão presentes em 20% da unidade. Portanto, a capilaridade para os elementos dessa unidade de mapeamento é $G = 5.0,5 + 11.0,3 + 11.0,2 = 8$ cm

Os valores calculados para esses parâmetros em cada unidade de mapeamento são descritos na Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros do modelo por unidade de mapeamento pedológica

Unidade de mapeamento	ϕ	λ	G (cm)
Sxe1	0,461	0,293	12,28
RRq2	0,450	0,470	8,00
RLe7	0,463	0,249	13,14

O conjunto de solos das unidades Sxe1 e RLe7 podem ser classificados, de acordo com a textura, em solos francos e francos arenosos. Já a unidade RRq2 se enquadra entre areia e areia franca.

Para estimar os valores desses parâmetros nas sub-bacias, foram coletadas amostras e feitas análises dos solos de quatro locais na sub-bacia, de acordo com a Figura 50. Embora esse número de pontos não seja

representativo de toda a bacia, o objetivo das análises de solo nesse estudo foi apenas verificar se as características obtidas para cada solo, principalmente a textura, eram equivalentes às descritas na classificação pedológica da região obtida na escala 1:100.000 (Figura 13).

As amostras foram submetidas aos ensaios de peneiramento e sedimentação no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA), do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT) da UFAL. A partir daí foram construídas as curvas granulométricas para cada uma delas (Figura 51). De acordo com a fração de cada classe de tamanho de partícula, e utilizando o triângulo textural do solo (Figura 52), as amostras foram classificadas de acordo com a textura (Tabela 11).

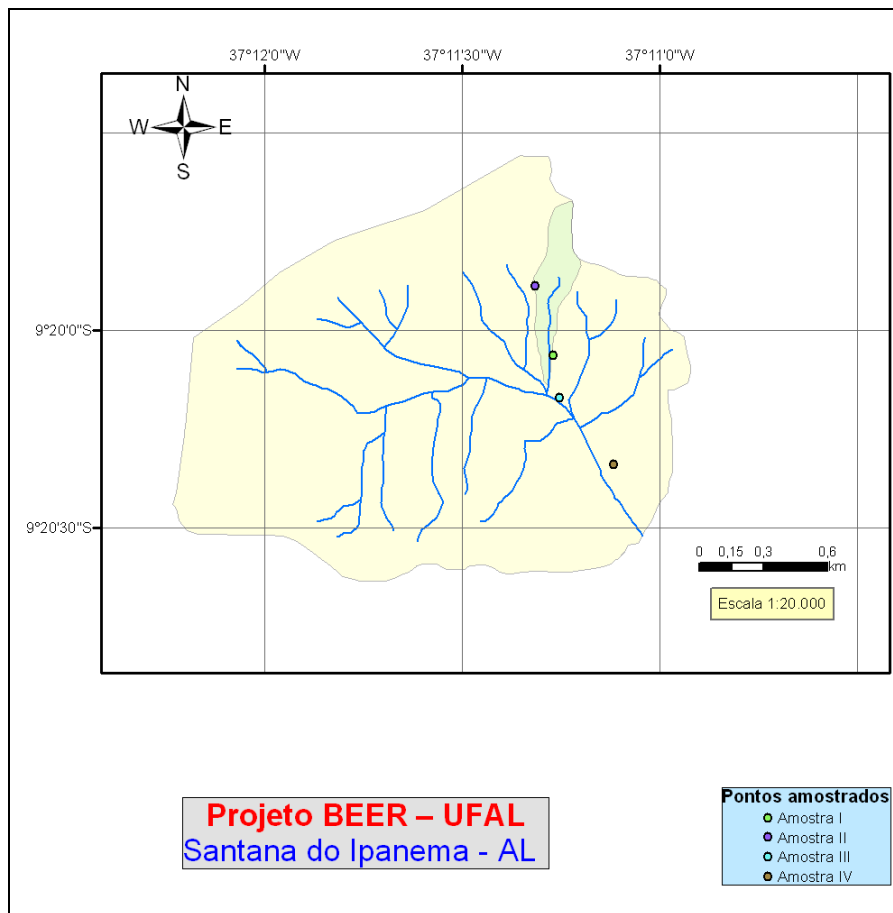


Figura 50. Pontos de amostragem pedológica

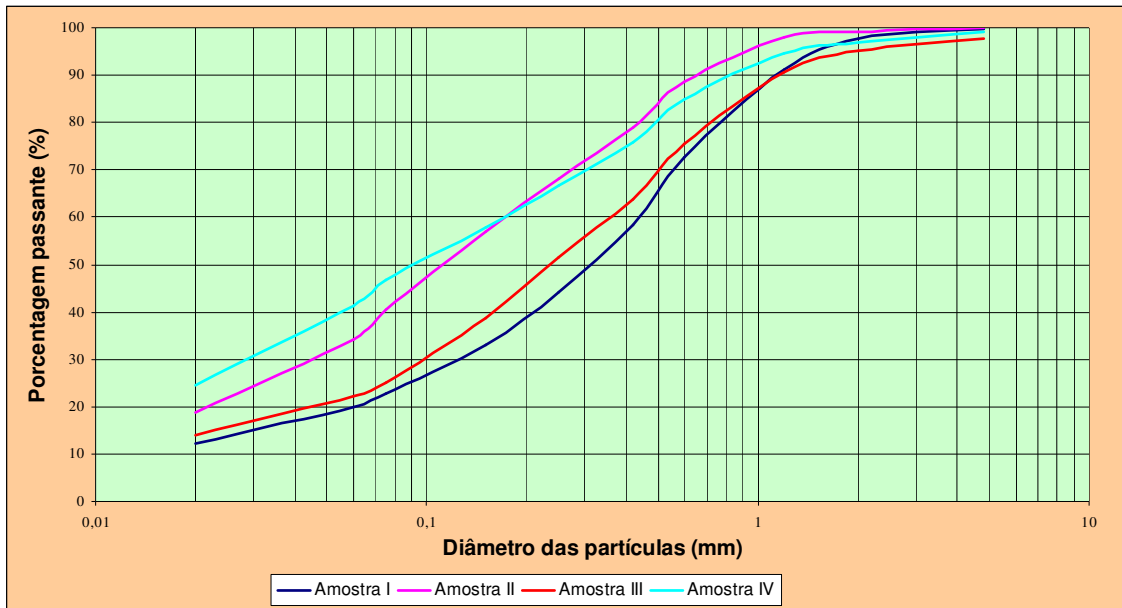


Figura 51. Curvas granulométricas das amostras

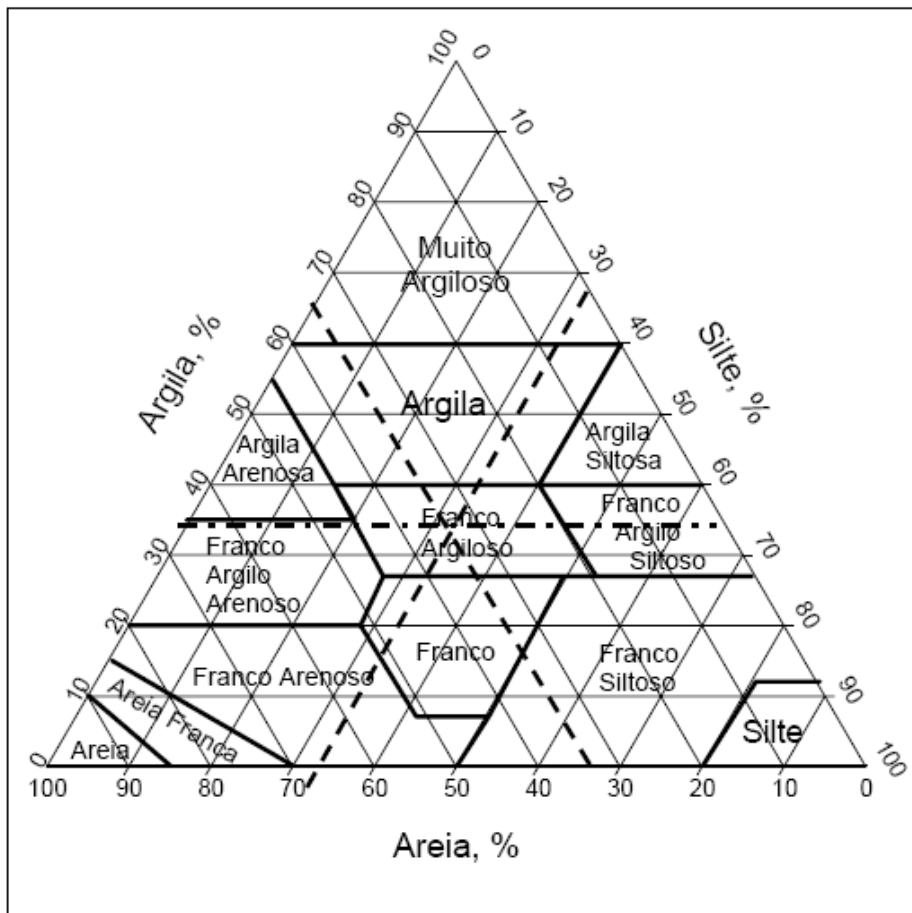


Figura 52. Triângulo textural do solo

Fonte: Reinert & Reichert (2006)

Tabela 11. Classificação textural das amostras

Amostra	Frações			Classificação textural
	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	
I	79,64	7,71	12,64	Solo franco arenoso
II	65,53	15,48	18,99	Solo franco arenoso
III	76,74	8,73	14,53	Solo franco arenoso
IV	57,44	17,24	25,31	Solo franco
Obs.: Frações relativas à soma areia+silte+argila				

De acordo com a amostragem, os solos das sub-bacias possuem textura variando de franca a franca arenosa e, portanto, enquadram-se dentro das unidades Sxe1 e RLe7, conforme o mapa pedológico apresentado na escala menor de detalhamento. Dessa forma, os parâmetros dependentes da textura do solo na região foram estimados da mesma maneira que para a bacia hidrográfica do riacho Gravatá.

O diâmetro representativo das partículas do solo (**Diâmetros**) foi considerado como 0,15 mm, intermediário entre os valores encontrados para as amostragens realizadas, mas não tem qualquer influência na modelagem do escoamento, apenas na modelagem da erosão.

O valor da massa específica do solo (**Densidade**) foi considerado como 2,65 g/cm³, referente ao valor da massa específica do grão de quartzo.

5.2.2 Parâmetros relacionados à cobertura vegetal e ao uso do solo

Os parâmetros do Kineros 2 relacionados à cobertura vegetal do solo são a **Interceptação**, a fração da superfície ocupada por cobertura vegetal (**Cobertura Vegetal**) e o coeficiente de rugosidade (**Manning**).

Os valores desses parâmetros comumente utilizados em trabalhos envolvendo Kineros2 no semi-árido (SEMMENS et al., 2008; MILLER et al., 2007; WAGENER et al., 2007; CANFIELD et al., 2005; MILLER et al., 2002; VENTURINI, 2001; HERNANDEZ et al., 2000) são baseados no bancos de dados americanos STATSGO (*State Soil Geographic Database*) e NALC (*North American Landscape Characterization*) de cobertura de solos (Tabela 12).

Tabela 12. Parâmetros relacionados à cobertura vegetal e uso do solo

Uso e cobertura do solo	Interceptação (mm/h)	Cobertura Vegetal	Manning
Caatinga nativa	3,00	0,25	0,08
Pastagem	2,00	0,10	0,05
Solo desmatado	0,00	0,00	0,02
Cultivo de milho	0,75	0,50	0,04
Regiões aluvionar	1,15	0,70	0,06

Como não se tem trabalhos anteriores de quantificação do coeficiente de rugosidade de Manning no semi-árido alagoano, este coeficiente foi considerado como 0,03 nos canais, conforme recomendações de Figueiredo (1998) para as sub-bacias da bacia representativa de Sumé.

A condutividade hidráulica saturada efetiva (K_s) também foi estimada a partir do uso do solo e cobertura vegetal, visto que esse parâmetro depende mais da estrutura que da textura do solo (MESQUITA & MORAES, 2004). A estrutura do solo, por sua vez, é extremamente dinâmica e dependente das condições naturais e práticas de manejo do solo (OLIVEIRA, 2005).

Este parâmetro é o mais relevante para a modelagem chuva-vazão em regiões semi-áridas, e o de determinação mais incerta para simulação do escoamento no Kineros2 (HERNANDEZ et al., 2000).

Foram feitos testes de infiltração na Bacia Experimental através do método do duplo anel, para os diferentes usos de solo e cobertura vegetal. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Taxas de K_s por cobertura vegetal e uso do solo

Uso e cobertura do solo	K_s (cm/h)
Caatinga nativa	12
Pastagem	3,5
Solo desmatado	2
Cultivo de milho	2
Região aluvionar	10

5.2.3 Outros parâmetros

Os parâmetros relacionados à microtopografia do terreno foram definidos como **Altura Média** = 2 mm e **Espaçamento** = 0,3 m, conforme recomendações de Lopes (2003), valores que se mostraram adequados também à região de estudo.

Apesar da unidade de mapeamento pedológica RLe7 possuir 30% de rochas, o parâmetro **Fração de Rochas** é nulo, pois este é utilizado apenas se K_s for estimado baseado na classe textural do solo. Como a estimativa de K_s foi feita a partir de dados de campo, este parâmetro de “correção” não precisou ser utilizado.

O **Coefficiente de Variação** da condutividade hidráulica saturada efetiva, C_v , também foi considerado nulo. Embora haja uma variação real na condutividade hidráulica saturada, são necessários estudos mais aprofundados para quantificar essa variação a partir de dados obtidos em campo.

Dessa forma, optou-se por considerar os valores pontuais de condutividade hidráulica saturada obtidos em campo como representativos de cada tipo de cobertura vegetal, sem qualquer coeficiente para tentar explicar a variação aleatória que pode haver nesse parâmetro ao longo da bacia.

5.3 Determinação dos eventos de chuva a serem modelados

A precipitação no semi-árido é extremamente variável, e para uma correta representação da precipitação média em determinada bacia, é necessária também uma distribuição regular e coerente da rede pluviométrica ao seu redor e em seu interior.

Hernandez et al. (2000), aplicando o Kinos2 a partir de duas configurações diferentes de pluviômetros na bacia experimental de Walnut Gulch, melhorou a eficiência do modelo de 60% para 90%.

Wheater (2002) demonstrou que a o coeficiente de correlação amostral entre pluviógrafos distantes 2 km é de 0,8, e quase nulo para pluviógrafos distantes entre 5 e 20 km, na bacia experimental de Walnut Gulch, Arizona, semi-árido dos Estados Unidos, que tem uma densidade de aproximadamente um pluviógrafo a cada 2 km².

No mesmo sentido, o trabalho de Osborn & Renard (1973, apud AL-QURASHI et al, 2008) recomendaram uma separação entre pluviógrafos de 300 e 500 metros para representar bem a distribuição espacial da precipitação nesse tipo de região.

Em Santana do Ipanema, além dos dois pluviógrafos instalados na bacia experimental, tem-se ainda medições diárias da rede hidrográfica da ANA/DNAEE (estação 397032) e registros a cada três horas da plataforma de coleta de dados (PCDs) do INPE. Essas duas estações estão localizadas na Universidade Estadual de Alagoas (UNEAL) e distam aproximadamente 7,5 km da microbacia e 8 km do ponto onde está localizado o pluviógrafo da sub-bacia 02, conforme a Figura 53.

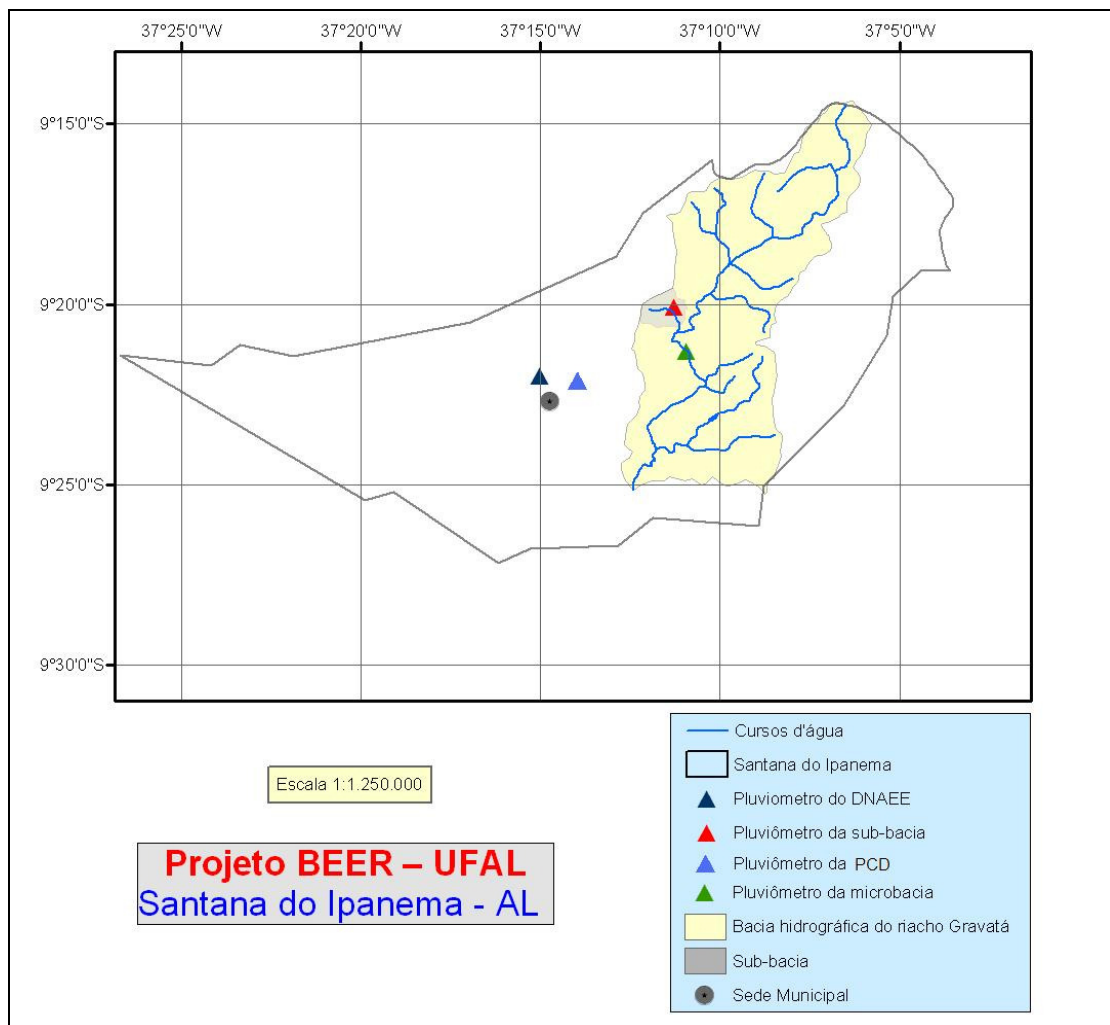


Figura 53. Localização dos pluviômetros

Os dados de 11 meses dessas quatro estações foram comparados e o total mensal de cada ponto de medição está mostrado na Tabela 14.

Tabela 14. Pluviometria mensal

	Sub-bacia	Microbacia	PCD	ANA
Agosto - 2007	-	111,6	87,5	126,0
Setembro - 2007	-	50,2	37,75	45,4
Outubro - 2007	-	7,0	0,25	4,2
Novembro - 2007	-	1,4	1,75	1,1
Dezembro -2007	2,5	3,2	5,0	4,4
Janeiro - 2008	20,1	45,2	-	-
Fevereiro - 2008	101,1	95	134,3	-
Março - 2008	187,2	207	246,3	-
Abril - 2008	42,7	35,4	106,5	-
Mai - 2008	254	249,2	150,3	-
Junho - 2008	114,8	110,01	-	-

De acordo com os dados apresentados, nota-se que os valores encontrados para a precipitação na sub-bacia são semelhantes àqueles da microbacia. O coeficiente de correlação amostral entre as medições mensais é de 98,92%. Entre os dados diários, esse coeficiente vale 91,89%.

Ao se comparar com os dados das PCDs, vê-se que, a depender do mês, os registros não se assemelham, em parte pela grande variação espacial da precipitação no próprio semi-árido. Apesar da pouca distância entre os pluviógrafos, há uma serra, denominada Serra do Gurgi, entre eles, que proporciona efeitos orográficos importantes que influenciam a distribuição espacial da precipitação na região.

O coeficiente de correlação amostral entre os dados mensais da sub-bacia e das PCDs é de 54,11%, e entre os dados da microbacia e das PCDs de 63,93%, para os meses de fevereiro a maio de 2008.

Os dados da estação pluviométrica da ANA de 2008 ainda não estão disponíveis, e por esse motivo não puderam ser comparados aos registros da sub-bacia e microbacia.

Cabe ressaltar que o número de meses estudados, porém, ainda é muito pequeno para se tirar qualquer conclusão definitiva sobre a variação do regime pluviométrico na região estudada.

Para a aplicação do Kineros2, considerou-se que a precipitação tem distribuição uniforme em toda a bacia hidrográfica do riacho Gravatá. Embora esse fato não seja verdade e, ainda, que tal incerteza possa ocasionar distorções nos valores de escoamento calculado, esta foi a alternativa adotada por falta de uma rede pluviométrica melhor distribuída na bacia.

Além disso, a intenção desse trabalho é obter relações entre chuva, vazão e condições iniciais da bacia, uma vez que ainda não existem eventos de escoamento medidos em campo para serem comparados com as simulações. Então, é válido trabalhar com esses eventos gerados, pois a relação que se busca simular é a resposta da bacia a um determinado evento chuvoso, seja ele qual for, considerando cenários pré-estabelecidos.

Foram caracterizados como evento, neste trabalho, séries contínuas de precipitações com registro de pelo menos 1 mm. Quando entre o final de uma série de precipitações e o início de outra série houve um intervalo de 40 minutos sem nenhum registro (0,1 mm), foi considerado que elas pertenceriam a eventos diferentes.

Os eventos considerados para simulação do escoamento superficial nesse trabalho foram aqueles medidos pelo pluviógrafo da sub-bacia. Fez-se a escolha em simular eventos maiores que aproximadamente 20 mm, perfazendo um total de nove eventos.

Os eventos considerados no estudo possuem características de duração, total precipitado e intensidade diferentes, permitindo que se faça comparações entre esses aspectos e a geração do escoamento superficial.

A Tabela 15 apresenta a duração, intensidade e total precipitado de cada um dos eventos considerados, em ordem cronológica.

Tabela 15. Características dos eventos

Evento	Data	Total precipitado (mm)	Duração (min)	Intensidade média (mm/h)
1	31/01 – 01/02/2008	20,60	230	5,37
2	01/02/2008	23,20	60	23,20
3	26/02 – 27/02/2008	33,30	380	5,26
4	29/02 – 01/03/2008	28,10	210	8,03
5	28/03/2008	35,30	180	11,78
6	30/03 – 31/03/2008	30,40	690	2,64
7	05/05/2008	19,90	100	11,94
8	09/05 – 10/05/2008	24,50	864	1,70
9	20/05/2008	26,00	240	6,50

As Figura 54 apresentam os eventos considerados na simulação do escoamento superficial.

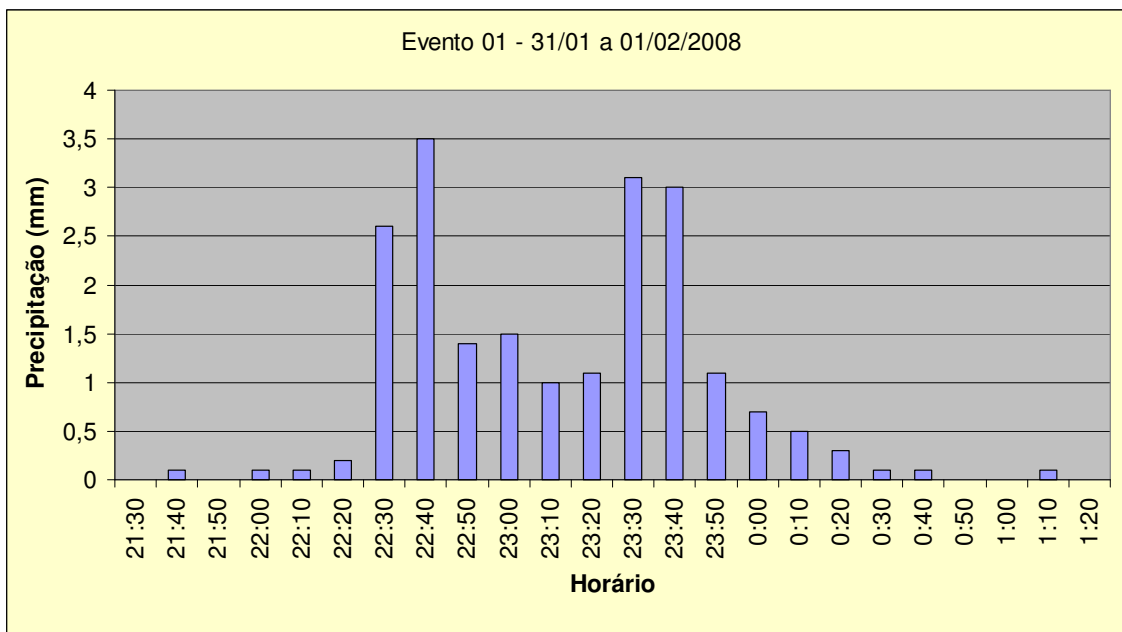


Figura 54. Evento 01

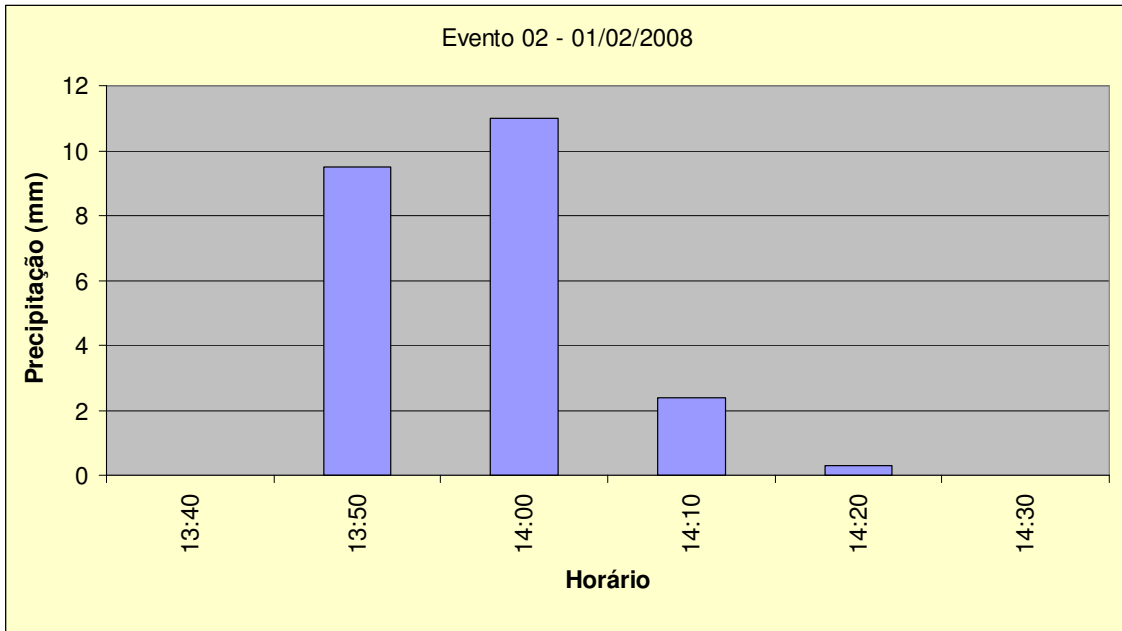


Figura 55. Evento 02

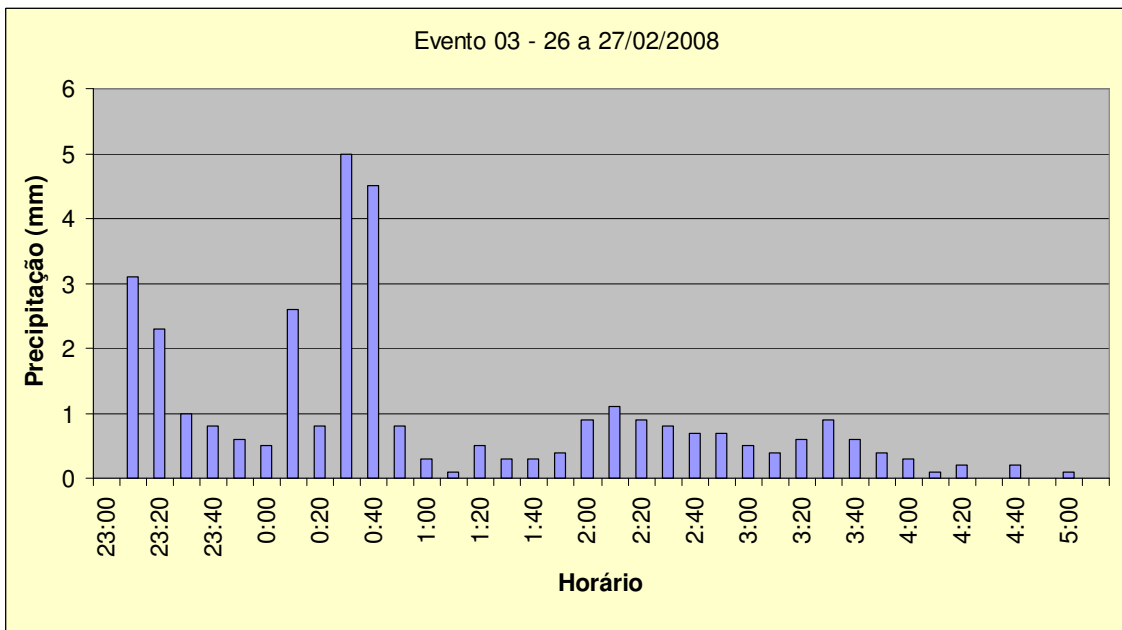


Figura 56. Evento 03

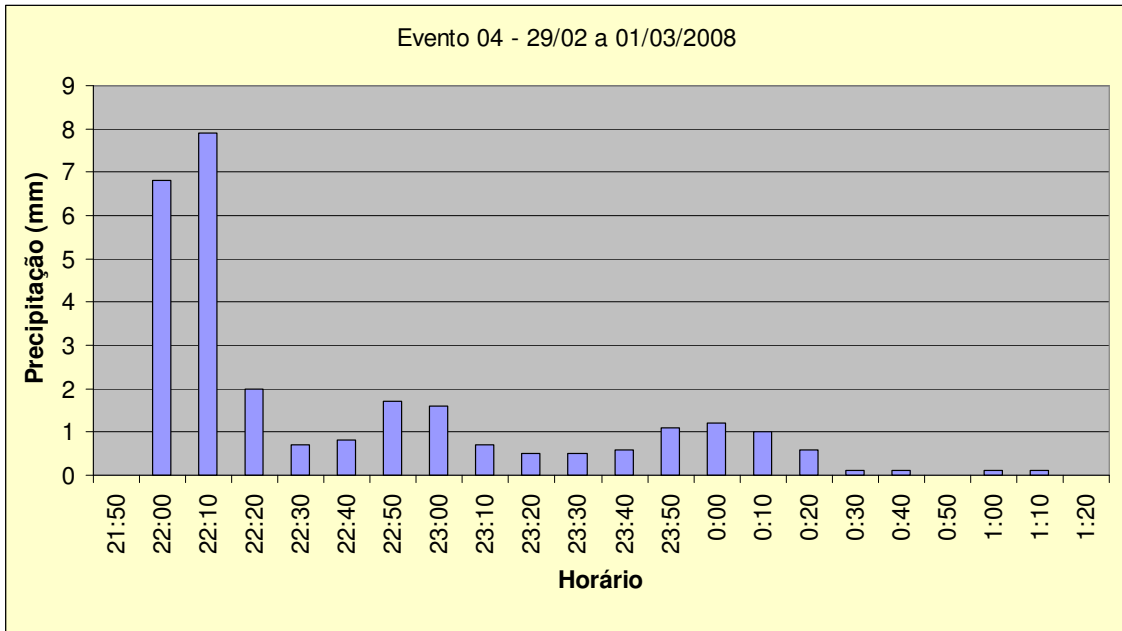


Figura 57. Evento 04

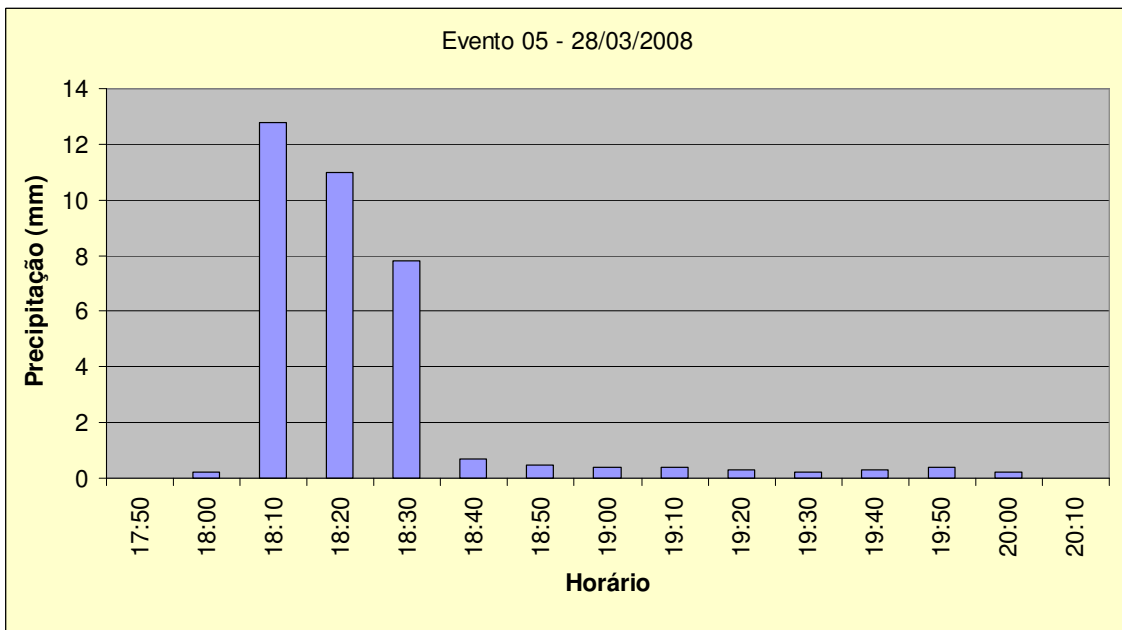


Figura 58. Evento 05

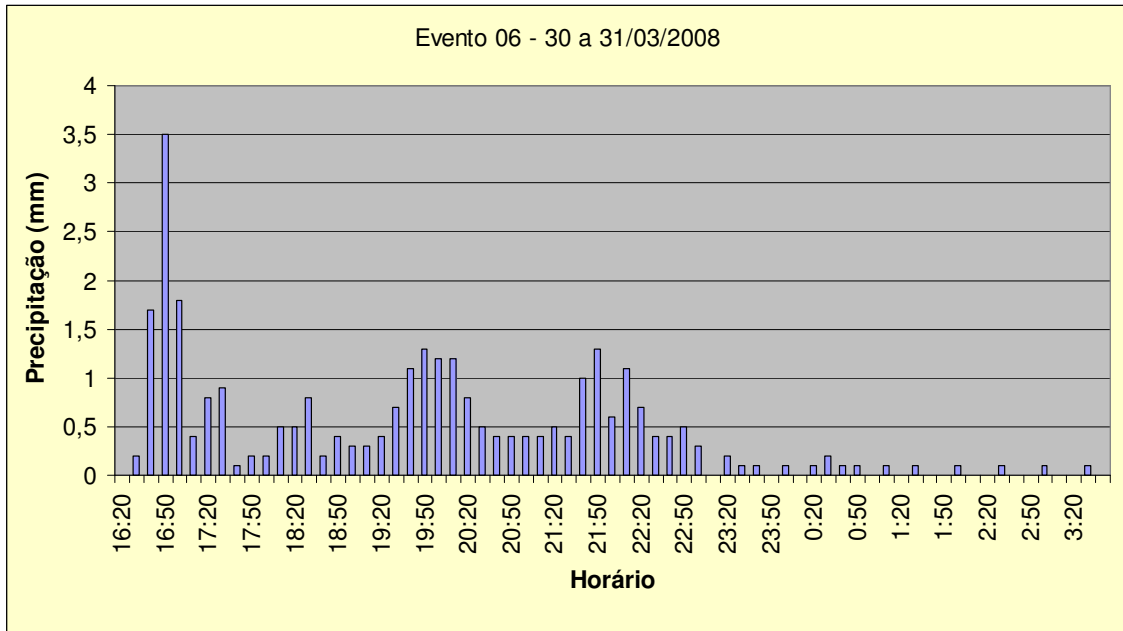


Figura 59. Evento 06

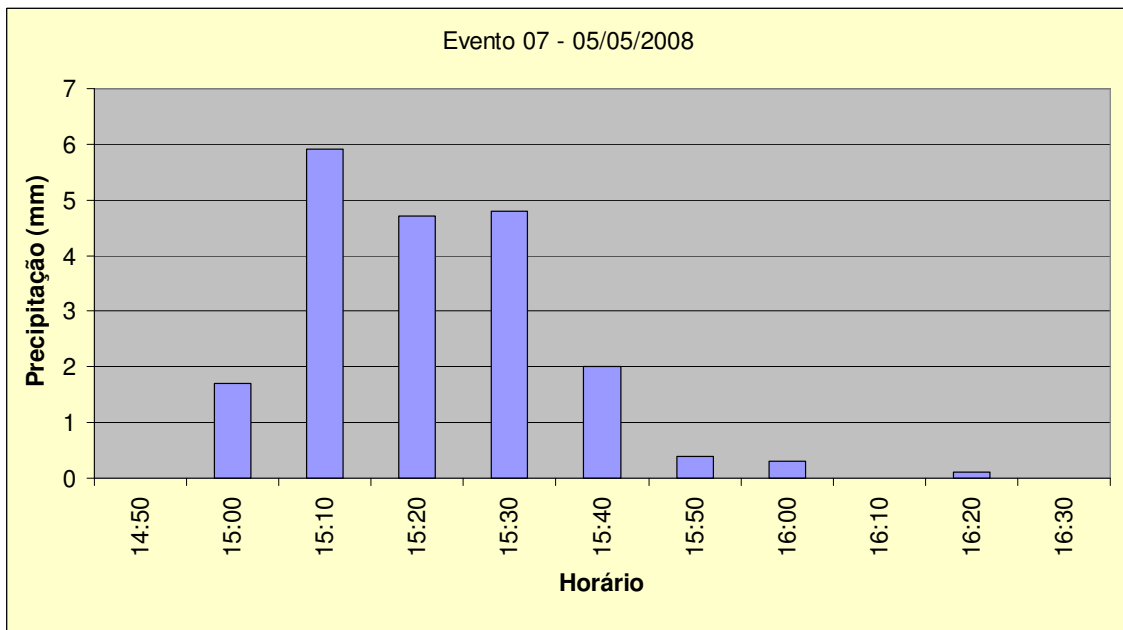


Figura 60. Evento 07

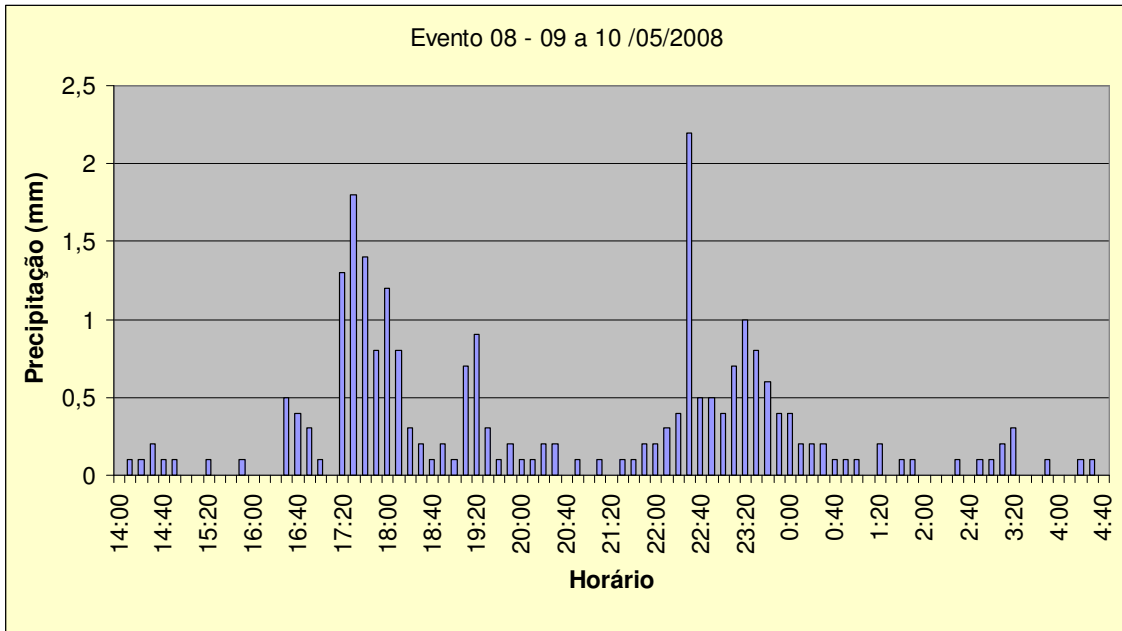


Figura 61. Evento 08

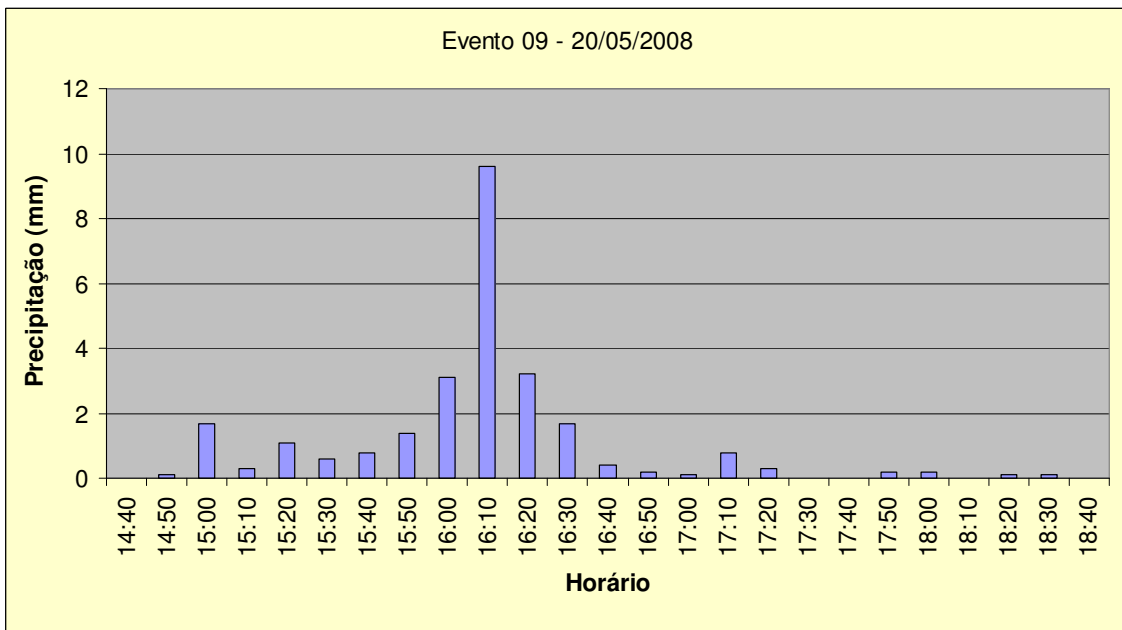


Figura 62. Evento 09

Para os eventos estudados, a distribuição temporal da precipitação em cada evento difere de maneira significativa. A Figura 63 apresenta, de maneira gráfica, a relação entre precipitação acumulada e a precipitação total de cada evento, por quartil, onde cada quartil corresponde a 25% do intervalo total de duração do evento.

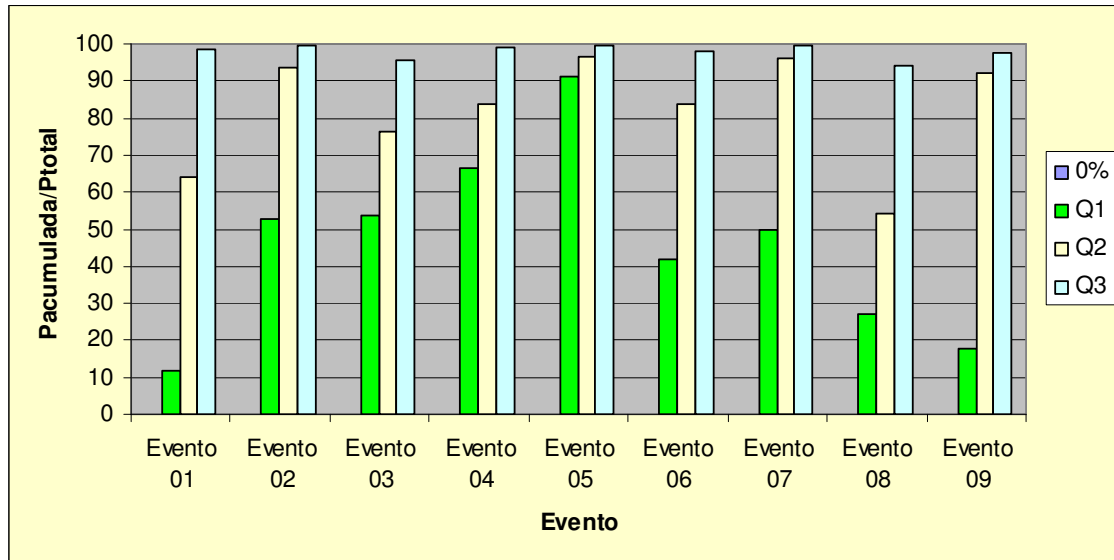


Figura 63. Análise estatística dos eventos

No evento 05, 91% da precipitação se concentra nos primeiros 25% de duração do evento. Os eventos 03 e 04 apresentam comportamentos próximos: no evento 03, 54% da precipitação acumulada está no primeiro quartil de tempo, e 76% no segundo quartil, enquanto para o evento 04 estes índices são de 66% e 83%.

O evento 01 apresenta apenas 12% da chuva concentrada nos primeiros 25% de tempo, e 64% da chuva acumulada até a metade da duração do evento.

Nota-se que, com exceção do evento 08, sempre mais que 50% do total precipitado ocorre na metade inicial do evento. Além disso, mais de 90% do total é precipitado em até 75% da duração do evento, para todos os eventos.

5.4 Análise de sensibilidade dos parâmetros

Diversos autores concluíram que os parâmetros mais sensíveis no Kineros2, quanto à modelagem do escoamento superficial, são a **Condutividade Hidráulica Saturada**, o **Grau de Capilaridade** e o coeficiente de **Manning**. Destacam-se, nesse sentido, os trabalhos de Sorman & Abdulrazzak (1993), El-Hames & Richards (1998), Yatheendradas et al. (2008) e Al-Qurashi et al. (2008).

Neste trabalho, foi avaliada a sensibilidade dos parâmetros **Altura Média**, **Espaçamento**, **Grau de Capilaridade**, **Fração de Rochas**,

Coeficiente de Variação, Condutividade Hidráulica Saturada e Manning do modelo a variações individuais dentro do intervalo de aplicação dos mesmos.

5.5 Cenários considerados

As relações existentes entre chuva e vazão em uma bacia hidrográfica são resultado da interação de diversos fatores, tais como clima, cobertura vegetal e solo. Esses fatores influem na forma e pico do hidrograma de escoamento superficial, e uma mudança na resposta hidrológica pode estar relacionada à modificação das condições de uso do solo na bacia (HERNANDEZ et al., 2000).

Foram simulados, para cada um dos eventos, diversos cenários de modificação no uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do riacho Gravatá e na Bacia Experimental de Santana de Ipanema, além de diferentes condições de umidade inicial do solo, conforme a Tabela 16.

Tabela 16. Cenários considerados

Cenário	Data
1	Situação atual
2	Caatinga
3	Desmatamento
4	Pastagem

O cenário atual considerou os valores para os parâmetros relacionados ao uso e ocupação atual do solo da região.

O cenário 3 considerou o desmatamento total das áreas de caatinga ainda preservadas da região. Para tal, os escoamentos foram simulados considerando para estas regiões os parâmetros de condutividade hidráulica saturada, coeficiente de Manning, taxa de interceptação e área de cobertura vegetal que sofre interceptação como equivalentes aos parâmetros para um solo desmatado.

Seguindo a mesma metodologia foi avaliada também a substituição da caatinga natural por áreas de pastagem (cenário 4) e a substituição das áreas de pastagem e desmatadas por vegetação de caatinga nativa (cenário 2), este

buscando simular os processos hidrológicos na bacia hidrográfica do riacho Gravatá e nas sub-bacias antes da ocupação humana mais intensa ocorrida nas últimas décadas.

Dentro do contexto especulativo e estimativo presente neste trabalho, os eventos foram simulados também para diferentes condições de saturação inicial do solo, com o intuito de avaliar a influência das condições antecedentes no escoamento.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Simulação dos eventos

Devido à diversidade do comportamento dos eventos, o escoamento estimado também se apresentou extremamente variável. Para a BHRG, utilizando uma condição de umidade inicial padrão de 0,50, os valores do coeficiente de deflúvio (C), relação entre a precipitação escoada e a precipitação total, também denominado coeficiente de escoamento, variaram numa faixa de 1,70% (evento 08) a 54,93% (evento 05), conforme a Tabela 17.

Tabela 17. Simulação dos eventos – BHRG

Evento	Total precipitado (mm)	Total escoado (mm)	Coef. Deflúvio (%)	Pico do escoamento (mm/h)
1	20,60	4,20	20,39	2,39
2	23,20	10,74	46,29	8,83
3	33,30	6,11	18,35	3,19
4	28,10	8,59	30,57	4,85
5	35,30	19,39	54,93	16,38
6	30,40	2,20	7,24	0,46
7	19,90	6,33	31,81	4,62
8	24,50	0,66	2,69	0,19
9	26,00	7,13	27,42	5,01

O coeficiente de escoamento tem uma boa relação com a intensidade média da precipitação e com a duração do evento. Os coeficientes de correlação amostral (r^2) para os dois casos foram de 0,81 e 0,84, respectivamente. Porém, o coeficiente de escoamento não apresentou praticamente relação nenhuma com o total precipitado ($r^2 = 0,15$). Essas características são apresentadas nas Figura 64 a 66.

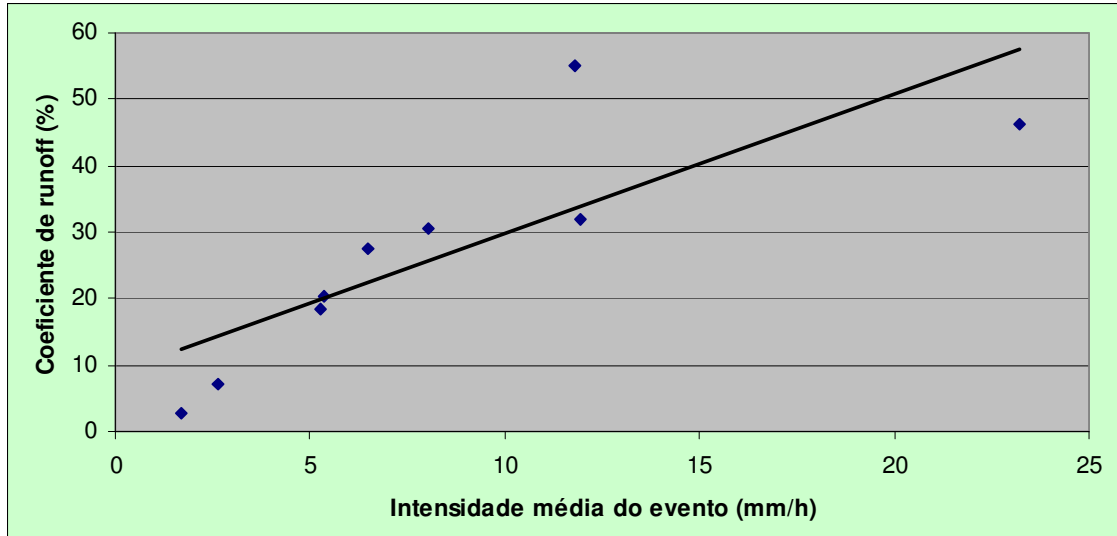


Figura 64. Relação de C com a intensidade média da chuva - BHRG

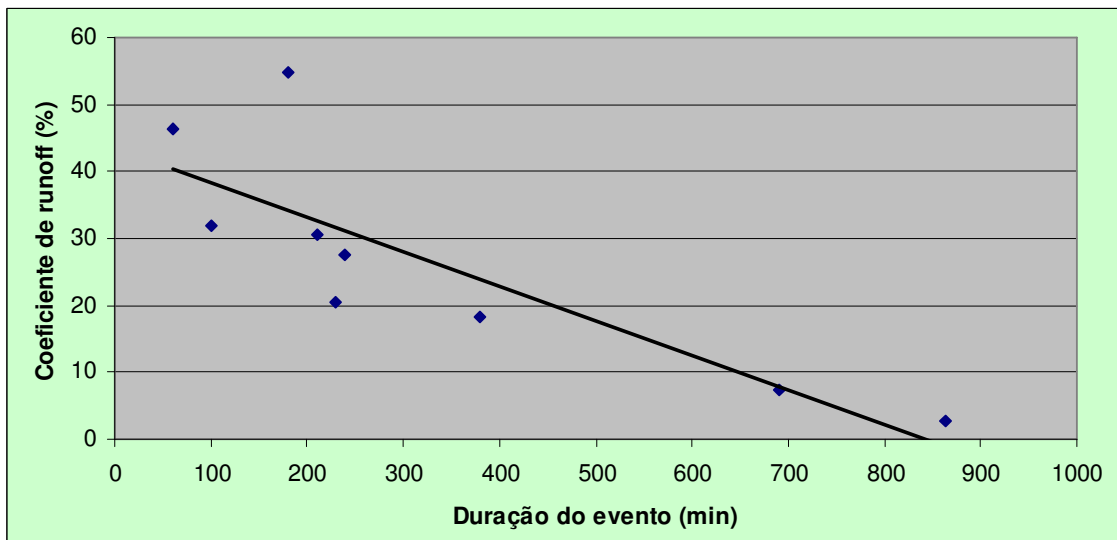


Figura 65. Relação de C com a duração do evento - BHRG

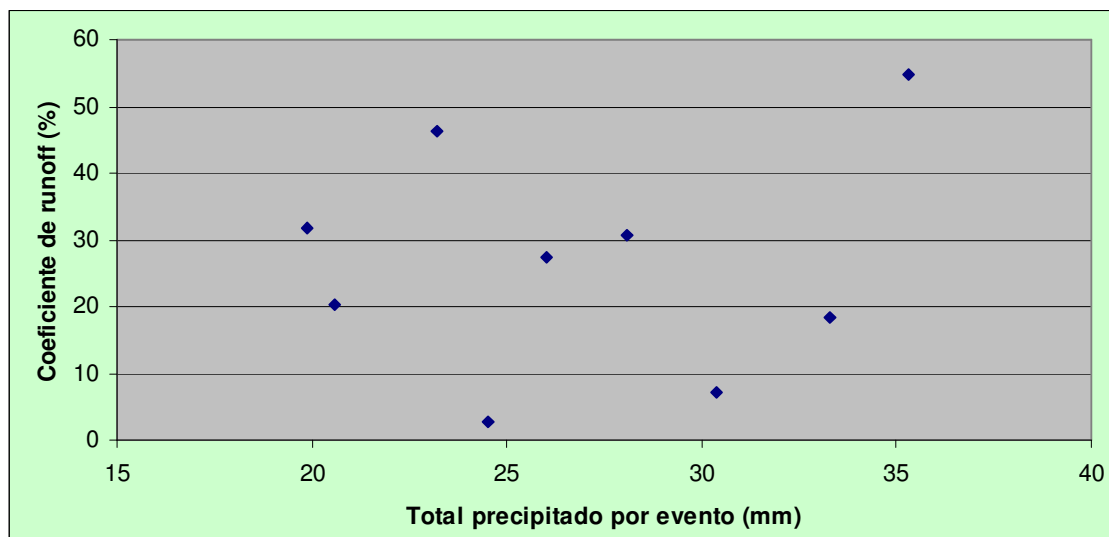


Figura 66. Relação de C com o total precipitado por evento - BHRG

O coeficiente de escoamento médio para os nove eventos foi de 26,63 %, com pico de escoamento em 5,10 mm/h. O total escoado médio foi de 7,26 mm.

Os valores encontrados se mostram coerentes com aqueles da literatura, inclusive no que diz respeito à grande variação simulada para o valor escoado, em uma mesma bacia e para a mesma condição inicial, devido apenas ao padrão de distribuição do evento chuvoso.

Verifica-se, na Figura 66, que precipitações idênticas podem gerar valores de escoamentos extremamente diferentes. Por exemplo, os eventos 02 e 08 têm totais precipitados semelhantes, dentro de uma faixa de variação de 5% (24,50 e 23,20 mm, respectivamente), mas geram escoamentos bem diferentes, de 46,29% e 2,69%, respectivamente, variação de 17 vezes.

Isso se deve principalmente ao padrão da precipitação de cada um dos eventos. O evento 02 tem intensidades maiores, concentradas na metade inicial da duração da chuva, ao passo que o evento 08 tem uma distribuição da precipitação mais regular, e picos menores.

No evento 02, as altas intensidades levam o solo a atingir rapidamente sua capacidade de infiltração, com toda a precipitação gerando escoamento a partir desse momento, em todo o resto do evento. Já no evento 08, a maior distribuição da precipitação no tempo e menores picos permitem que o solo recupere parte de sua capacidade de infiltração ainda durante o evento.

Na aplicação do modelo na sub-bacia 01 da BESI, o coeficiente C se manteve em uma faixa considerada grande de variação, alcançando valores mais altos que a aplicação anterior para todos os eventos. O coeficiente de deflúvio do evento 05 foi de 68,67%, e para o evento 08 de 4,78% (Tabela 18).

Tabela 18. Simulação dos eventos – BESI

Evento	Total precipitado	Total escoado	Coef. Deflúvio (%)	Pico do escoamento (mm/h)
1	20,60	3,08	14,95	3,11
2	23,20	12,45	53,66	25,06
3	33,30	4,4	13,21	6,52
4	28,10	8,2	29,18	13,29
5	35,30	21	59,49	37,61
6	30,40	1,34	4,41	0,97
7	19,90	6,18	31,06	10
8	24,50	0,37	1,51	0,3
9	26,00	5,36	20,62	9,18

Os coeficientes de correlação amostral entre C e a intensidade média da precipitação (86,63%) e a duração do evento (84,05%) se mantiveram altos. O coeficiente de escoamento se manteve praticamente sem relação com o total precipitado ($r^2 = 4,58\%$). Essas informações podem ser constatadas nas Figuras 67 a 69

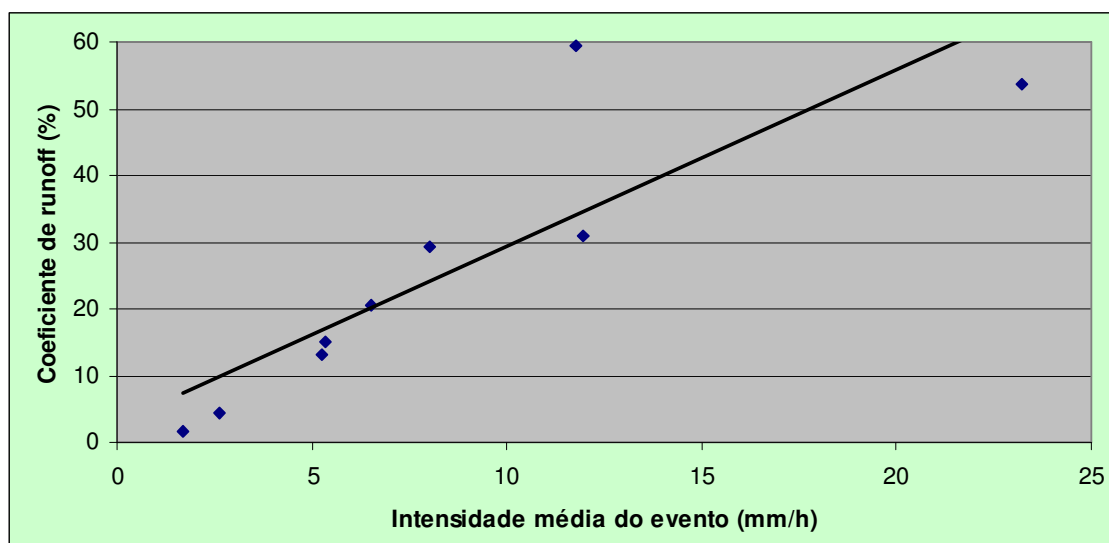


Figura 67. Relação de C com a intensidade média da chuva - BESI

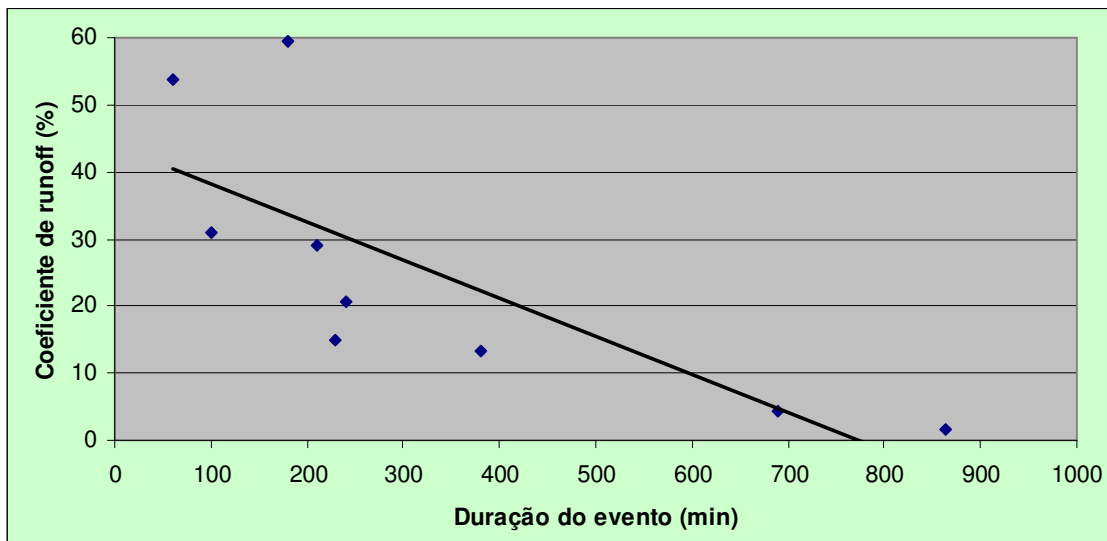


Figura 68. Relação de C com a duração do evento - BESI

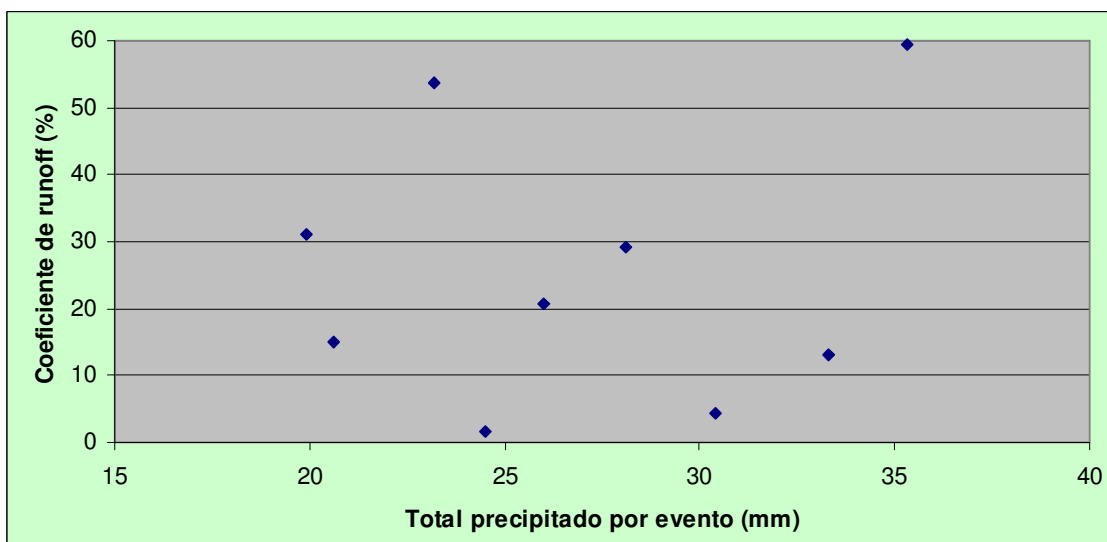


Figura 69. Relação de C com o total precipitado por evento - BESI

O coeficiente de deflúvio médio dos nove eventos foi de 25,34%, com um total escoado médio de 6,93 mm e um pico médio de escoamento de 11,78 mm/h.

O comportamento da sub-bacia se mostrou semelhante àquele caracterizado pela bacia hidrográfica do riacho Gravatá, no que diz respeito à geração do escoamento, que, conforme a primeira análise, também se mostrou extremamente dependente do padrão do evento de precipitação simulado.

Para as duas unidades de estudo o modelo reproduziu o escoamento a partir da precipitação como esperado: chuvas mais intensas tenderam a apresentar um maior total escoado, pois nesse tipo de evento a saturação do solo é logo atingida e o total infiltrado durante todo o evento acaba sendo menor.

Além disso, os diferentes graus de comportamento da precipitação também foram simulados coerentemente, com precipitações mais concentradas no primeiro quartil de duração apresentando menores tempos de pico.

6.2 Influência da resolução de discretização

Diversos estudos comparam os resultados da utilização de modelos distribuídos com entrada de dados em diferentes escalas. Goodrich (1990) concluiu que, a partir de certo limite, um acréscimo no número de elementos de discretização não influencia de maneira efetiva a qualidade do resultado.

Lopes & Canfield (2004) demonstraram o efeito da representação da bacia na simulação do escoamento, a partir de quatro disposições diferentes para a discretização de uma microbacia de 4,4 hectares na bacia experimental de Walnut Gulch, na região semi-árida do Arizona. Para eventos curtos uma representação mais detalhada aumentou o volume escoado e o pico do hidrograma, diminuindo a infiltração.

Na estimativa do escoamento na região da bacia experimental através de discretização na resolução da bacia hidrográfica do riacho Gravatá (Figura 48), os valores escoados totais e os valores de pico foram menores que na simulação com resolução espacial maior, verificando essa tendência. Os resultados da simulação dos eventos nessa escala são apresentados na Tabela 19.

Para esta resolução, o coeficiente de deflúvio médio para os nove eventos foi de 19,29%, com um volume escoado médio de 5,31 mm e um pico de escoamento médio de 9,16 mm/h. O total escoado equivaleu a 76,12% daquele obtido na discretização com maior resolução.

Tabela 19. Simulação dos eventos – BESI com resolução espacial menor

Evento	Total precipitado (mm)	Total escoado (mm)	Coef. Deflúvio (%)	Pico do escoamento (mm/h)
1	20,60	1,15	5,58	1,42
2	23,20	10,42	44,91	20,27
3	33,30	1,31	3,93	2,46
4	28,10	5,98	21,28	9,08
5	35,30	18,95	53,68	32,98
6	30,40	0,1	0,33	0,17
7	19,90	5,02	25,23	8,20
8	24,50	0,003	0,01	0,003
9	26,00	4,87	18,73	7,82

A Figura 70 compara os valores de C em cada evento, para a bacia hidrográfica do riacho Gravatá e para a sub-bacia 01 de acordo com as duas diferentes resoluções de discretização. A Figura 71 apresenta o valor da vazão de pico para as mesmas situações.

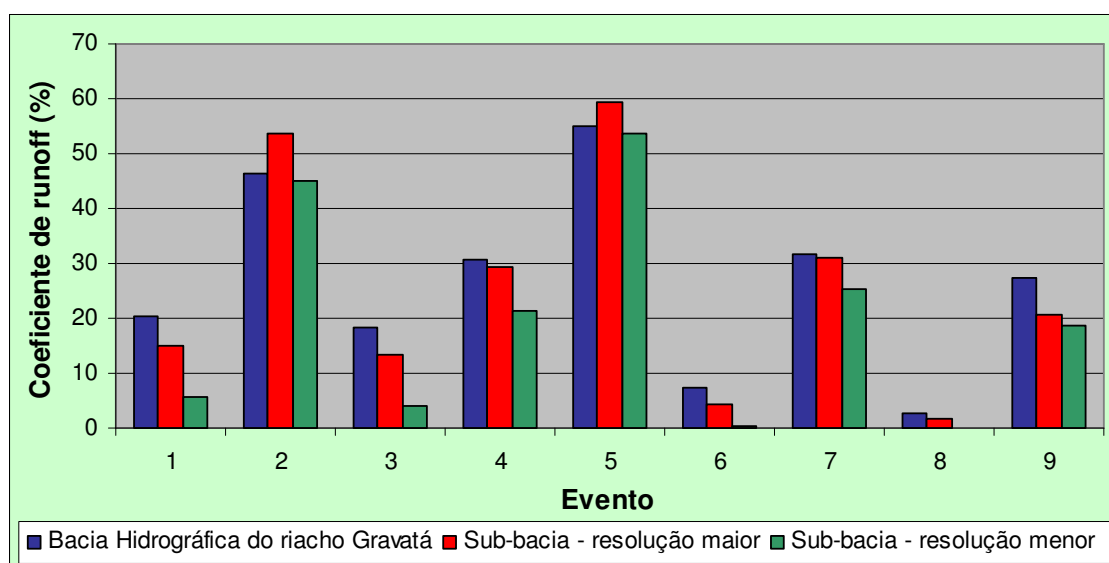


Figura 70. Coeficiente de deflúvio por evento

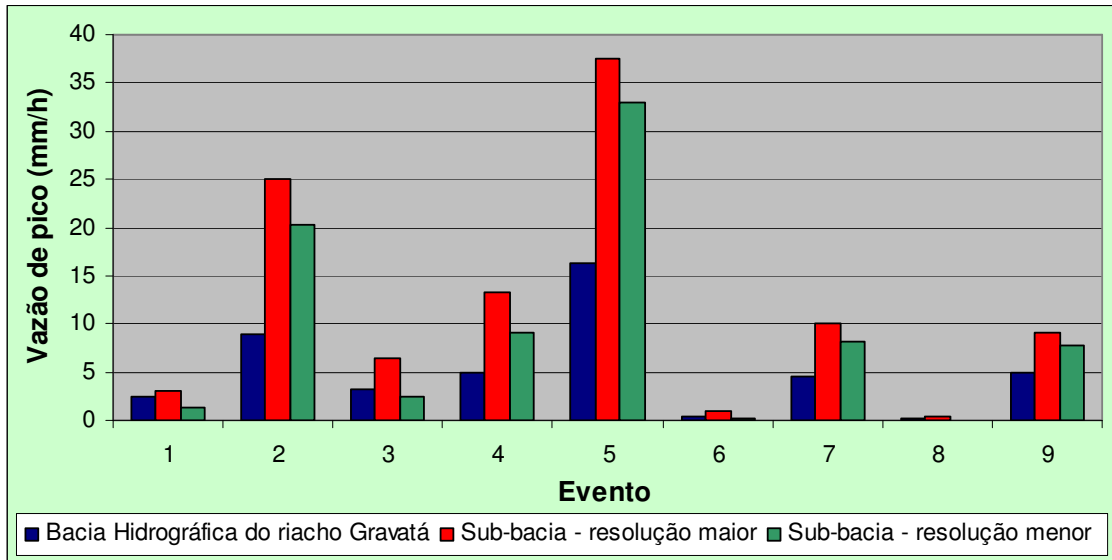


Figura 71. Vazões de pico por evento

Para ilustrar, a Figura 72 apresenta a simulação do escoamento para o evento 09.

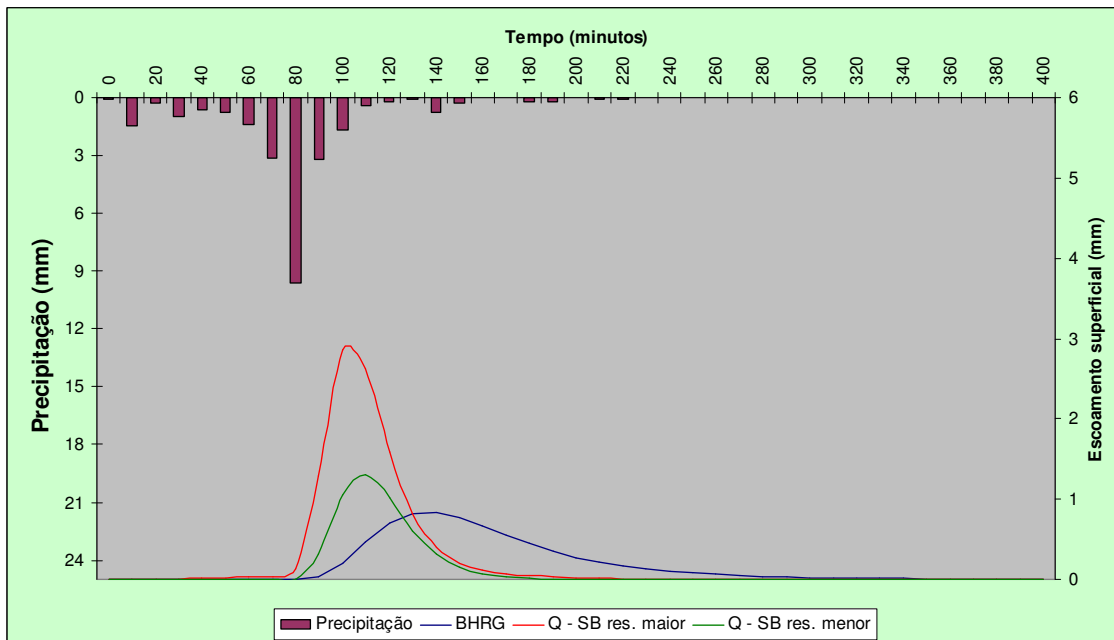


Figura 72. Hidrogramas observados para o evento 09

6.3 Influência da condição inicial do solo

A Tabela 20 apresenta os volumes escoados totais e os picos dos escoamentos para as simulações considerando os extremos de umidade inicial do solo propostos (10% e 90%).

Tabela 20. Influência da umidade inicial do solo

Volume escoado total (mm)				
Evento	BHRG		BESI	
	Si = 10%	Si = 90%	Si = 10%	Si = 90%
1	3,18	5,2	2,31	3,8
2	9,11	13,35	10,81	15,03
3	4,74	7,82	2,97	5,9
4	6,98	11,11	6,6	10,69
5	17,25	20,5	18,96	21,7
6	1,33	2,34	0,66	1,71
7	5,2	7,9	5,2	7,24
8	0,29	0,99	0,1	0,64
9	6,08	7,32	4,62	6,08
Vazão de pico (mm/h)				
Evento	BHRG		BESI	
	Si = 10%	Si = 90%	Si = 10%	Si = 90%
1	1,82	2,35	2,54	3,65
2	7,44	11,04	22,24	29,5
3	2,46	4,01	4,85	7,74
4	3,85	6,63	11,03	17,28
5	14,59	17,82	34,4	39,53
6	0,3	0,58	0,59	1,38
7	3,75	5,79	8,64	11,34
8	0,11	0,3	0,12	0,45
9	4,27	5,3	7,96	14,28

As Figura 73 e 74 apresentam a variação do coeficiente de deflúvio devido à umidade inicial do solo, para a bacia hidrográfica do riacho Gravatá e para a sub-bacia 01, respectivamente.

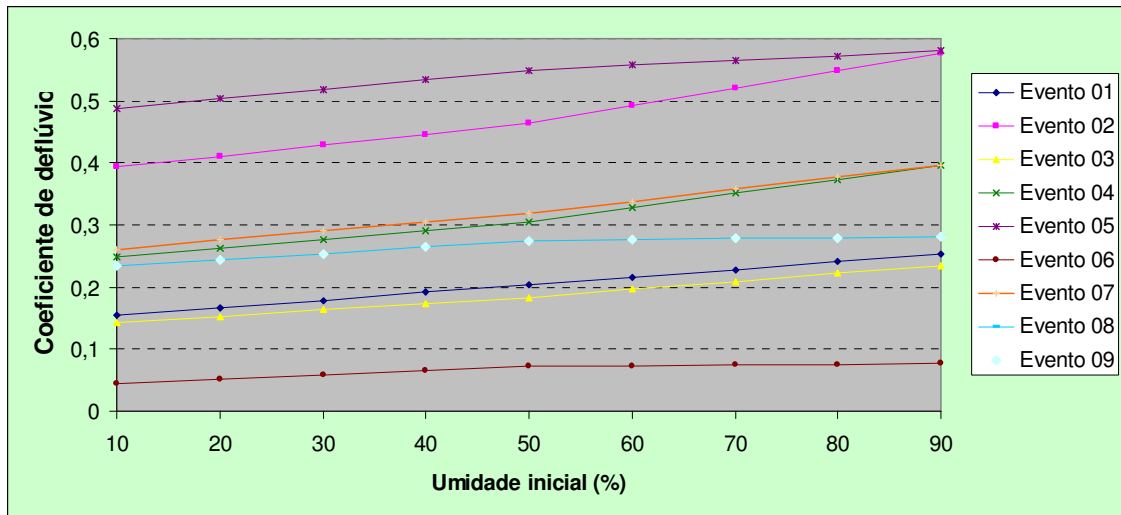


Figura 73. Relação entre C e a umidade inicial do solo – BHRG

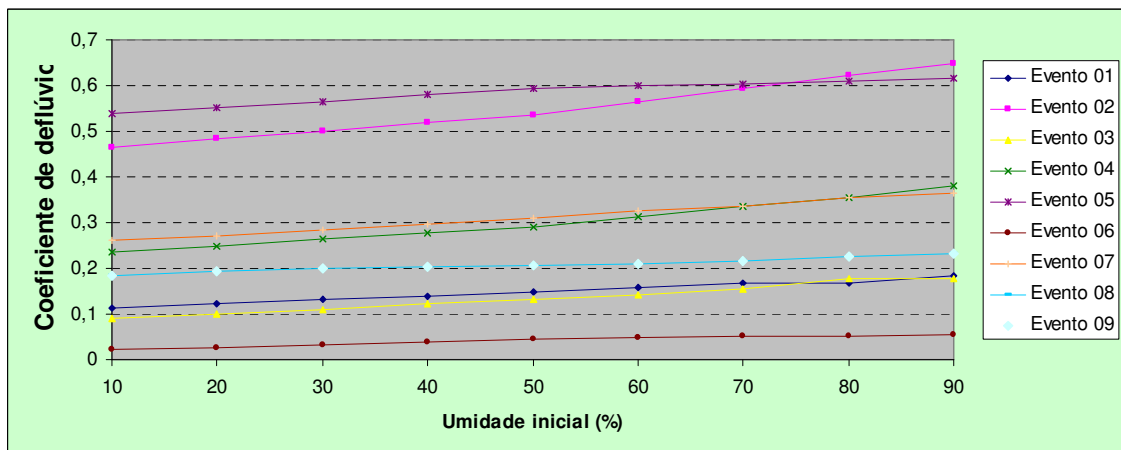


Figura 74. Relação entre C e a umidade inicial do solo – BESI

O coeficiente de deflúvio médio dos eventos da BHRG variou em 43%, de 0,22 a 0,31 entre as condições extremas de umidade inicial propostas. Para as sub-bacias essa variação foi de 0,21 a 0,30, cerca de 40,5%. Nota-se, nos gráficos apresentados, que a variação não é constante.

Para exemplificar esse aspecto, nota-se, na Figura 74, que a sub-bacia 01 tem um maior coeficiente de escoamento para o evento 05 que para o evento 02 para umidades iniciais baixas do solo. A partir de uma umidade inicial de aproximadamente 70%, o evento 02 passa a gerar mais escoamento relativo à precipitação que o evento 05.

A Figura 75 apresenta os hidrogramas de escoamento superficial para a BHRG, nas três condições iniciais de umidade, para o evento 09.

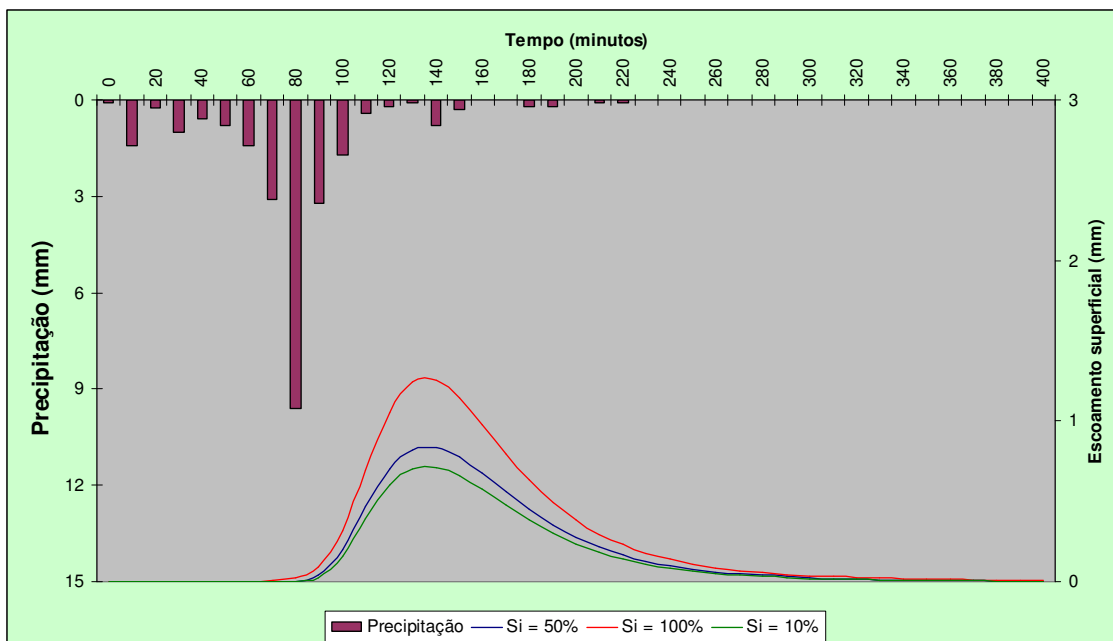


Figura 75. Influência da umidade inicial no hidrogramas simulado

6.4 Análise de sensibilidade dos parâmetros

A análise de sensibilidade de cada parâmetro foi feita de maneira individual, para um evento específico (evento 09) e uma condição de umidade inicial de 50%, na bacia hidrográfica do riacho Gravatá. Os resultados mostraram que os parâmetros que mais são sensíveis a variações são a **Condutividade Hidráulica Saturada** e o **Grau de Capilaridade**.

O aumento da capilaridade antecipa e diminui o pico do escoamento superficial, conforme a Figura 76. Para a simulação com $G = 5$ cm, o volume escoado total diminuiu em 13,7%, e para a simulação com $G = 25$ cm, aumentou em 10,5%. O pico de escoamento teve, respectivamente, uma diminuição de 14% e um aumento de 1,4%.

A **Condutividade Hidráulica Saturada** é o parâmetro mais importante para a caracterização do processo de infiltração, e, por conseqüência, o mais sensível.

Foi simulada uma situação com $K_s = 2$ mm/h. Para esta, o volume escoado total aumentou em 194%, totalizando 14,73 mm. O volume escoado total para a situação de $K_s = 12$ mm/h equivaleu a apenas 4,6% daquele escoado na situação real. Com relação ao pico, respectivamente, aumentou em 97,9% e equivaleu a 0,9%. A Figura 77 compara os hidrogramas.

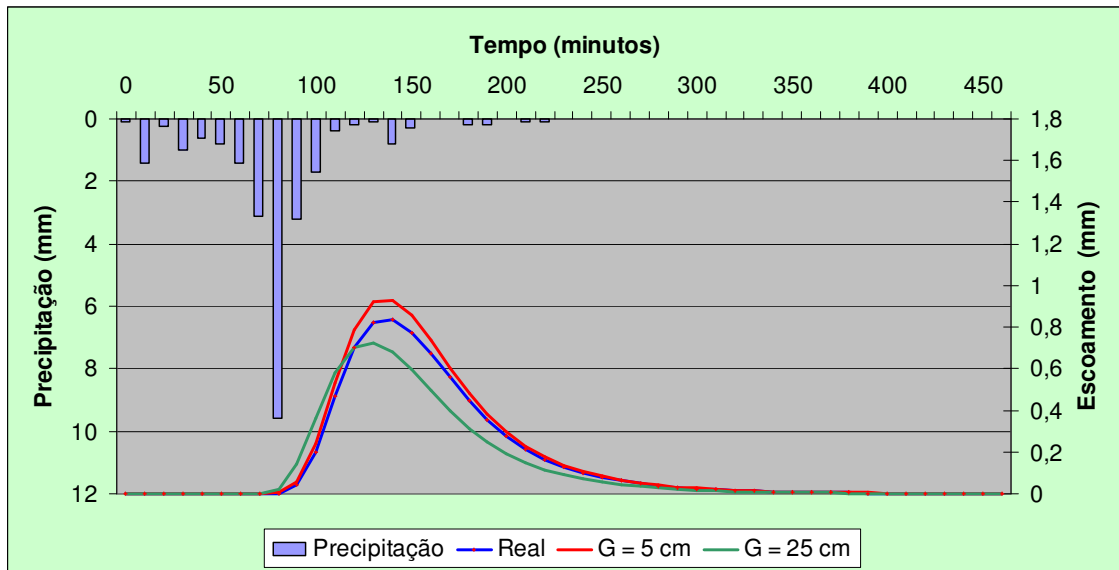


Figura 76. Variação do hidrograma alterando o grau de capilaridade

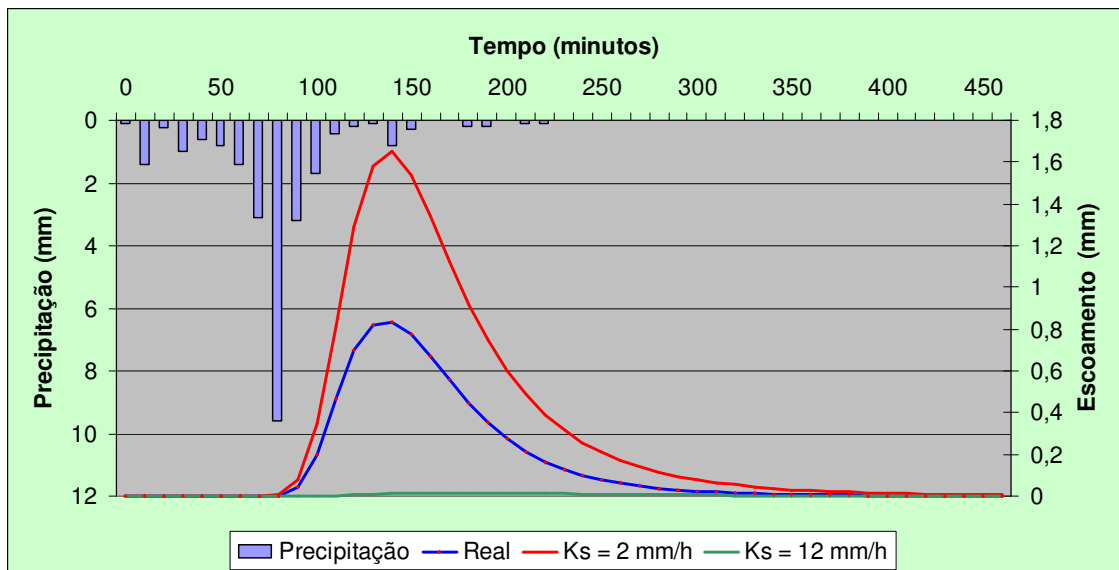


Figura 77. Variação do hidrograma alterando a condutividade hidráulica

O outro parâmetro que se mostrou extremamente sensível foi o coeficiente de rugosidade de **Manning**. Ao se considerar um valor só para toda a bacia, tanto o pico e o volume escoado quanto a própria forma do hidrograma de escoamento superficial sofreram alteração considerável (Figura 78).

Para um coeficiente de Manning único de 0,02 para toda a bacia, o volume escoado total foi 17% superior ao da situação real e houve um aumento no pico do escoamento, de 72%. Isto provocou um alongamento do

hidrograma, que também teve um tempo de pico aproximadamente 30 minutos menor. O coeficiente de Manning de 0,08, ao contrário, provocou um retardamento em 40 minutos do pico do hidrograma, que equivaleu a apenas 27,6% do pico na situação real. A variação do volume escoado total não foi grande, com diminuição de 10,5%

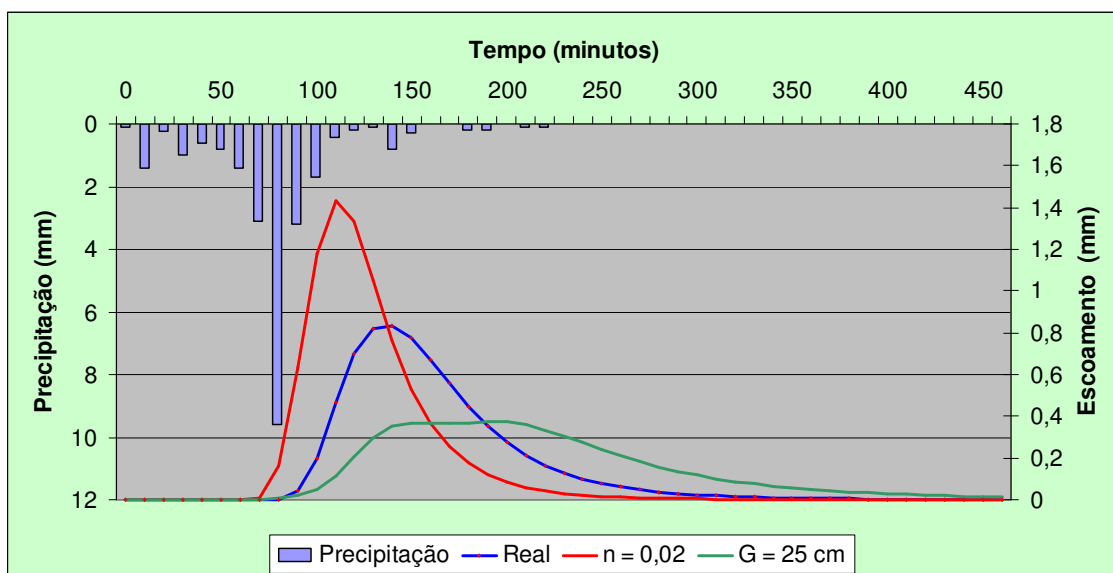


Figura 78. Variação do hidrograma alterando o coeficiente de Manning

O modelo não se mostrou sensível aos demais parâmetros. A

Tabela 21 apresenta os valores calculados na simulação para cada variação de parâmetro.

Tabela 21. Sensibilidade dos parâmetros

Situação	Δ Volume escoado	Δ Pico do escoamento
Real	7,13	5,01
Fração de rochas =	+ 1,8%	+ 1,8%
Cv = 0,5	+3,7%	+ 4,2%
Altura Média = 4mm	+ 0,8%	+ 0,2%
Espaçamento = 0,6 m	-	-

6.5 Cenários de uso e ocupação do solo

A Tabela 22 apresenta os volumes escoados simulados por evento para cada um dos cenários de uso e ocupação do solo propostos para a bacia hidrográfica do riacho Gravatá, em milímetros, com um traço significando que o escoamento simulado foi nulo. A Tabela 23 apresenta o valor da vazão de pico para cada cenário, em milímetros.

Tabela 22. Escoamentos simulados nos diferentes cenários – BHRG

Evento	Total precipitado (mm)	Total Escoado (mm)			
		Cenário 1 Atual	Cenário 2 Caatinga	Cenário 3 Desmatada	Cenário 4 Pastagem
1	20,60	4,20	-	12,27	4,23
2	23,20	10,74	5,49	17,67	11,46
3	33,30	6,11	0,28	18,64	6,18
4	28,10	8,59	2,37	18,20	9,05
5	35,30	19,39	12,48	27,50	20,30
6	30,40	2,20	-	11,98	2,12
7	19,90	6,33	1,12	13,52	6,55
8	24,50	0,66	-	5,94	0,58
9	26,00	7,13	0,15	16,69	7,21

Tabela 23. Vazões de pico nos diferentes cenários – BHRG

Evento	Vazão de pico (mm/h)			
	Cenário 1 Atual	Cenário 2 Caatinga	Cenário 3 Desmatada	Cenário 4 Pastagem
1	2,39	-	7,46	2,40
2	8,83	4,33	17,38	9,61
3	3,19	0,12	10,03	3,22
4	4,85	1,51	11,07	5,31
5	16,38	10,32	27,77	17,71
6	0,46	-	2,46	0,40
7	4,62	0,62	11,69	4,78
8	0,19	-	1,68	0,14
9	5,01	0,05	14,47	5,13

A Figura 79 relaciona o coeficiente de deflúvio de cada evento para os cenários simulados.

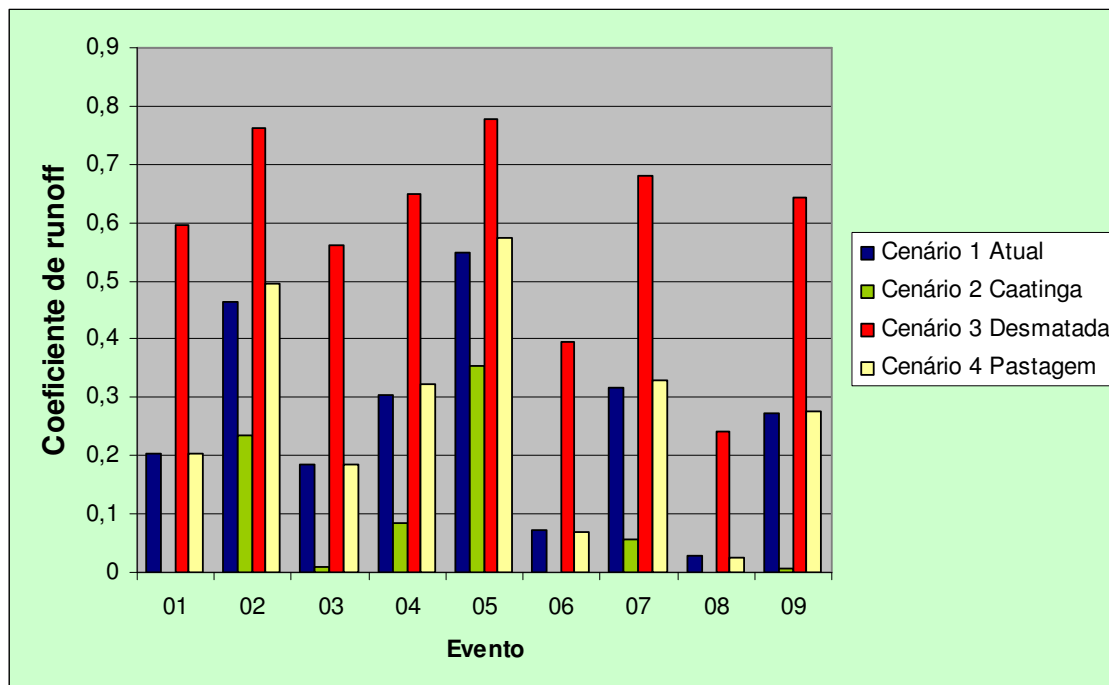


Figura 79. Coeficientes de deflúvio dos cenários propostos - BHRG

Na BHRG, para o cenário 2, de caatinga, o coeficiente de deflúvio médio dos eventos foi de apenas 0,08, equivalente a 31% do valor para a condição atual de uso e ocupação do solo, de 0,27. No cenário de desmatamento o coeficiente médio atinge 0,59, equivalente a 221% do valor atual, e no cenário de pastagem, o valor calculado é semelhante àquele encontrado para a situação atual (0,28).

Para a condição de caatinga os eventos 01, 06 e 08 não geraram escoamentos e os eventos 03 e 09 geraram escoamentos praticamente nulos. Os eventos que apresentaram a menor amplitude relativa entre os valores extremos para as condições propostas foram os eventos 02 e 05. O evento 02 gerou um escoamento para a situação de caatinga equivalente a 31% do valor para a situação desmatada. Para o evento 05, essa relação ficou em 45%.

O comportamento médio do escoamento nessa bacia para a situação atual foi semelhante ao comportamento para uma situação de pastagem, conforme pode ser visto na Figura 80, que apresenta, para o evento 09, o

hidrograma simulado para cada cenário, e na Figura 81, que apresenta os hidrogramas para o evento 05.

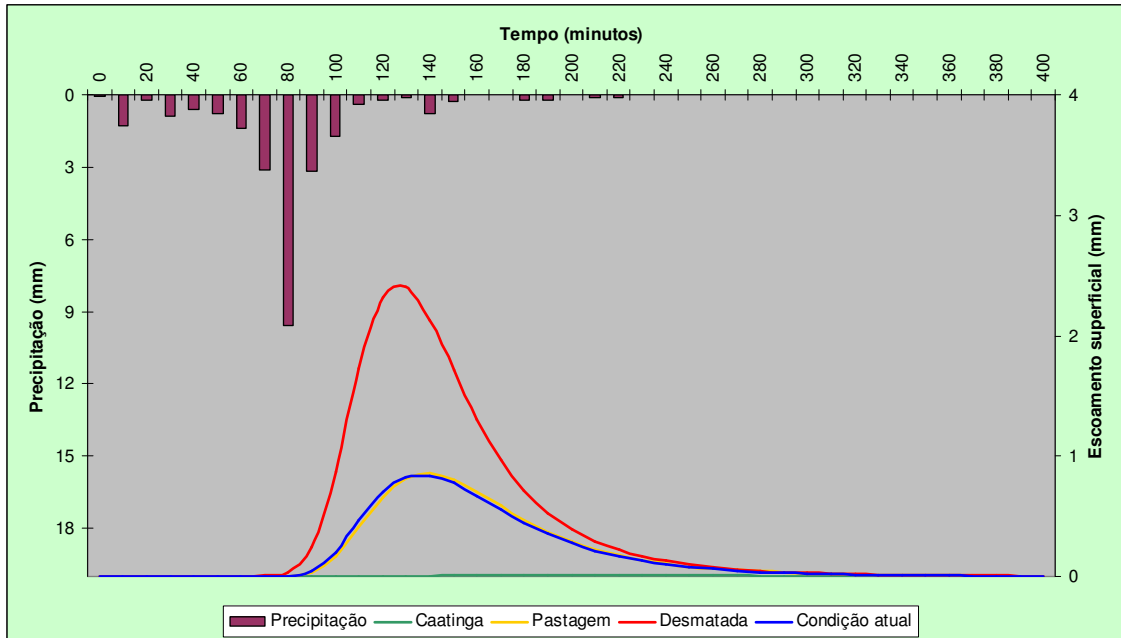


Figura 80. Hidrograma do evento 09 para os cenários propostos –BHRG

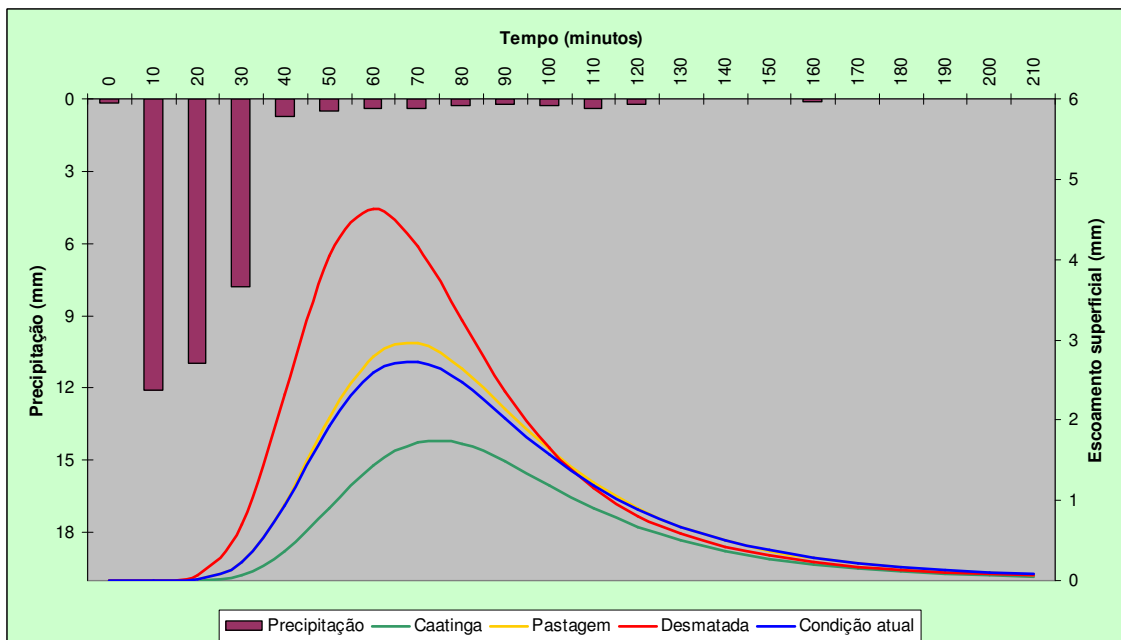


Figura 81. Hidrograma do evento 05 para os cenários propostos – BHRG

Para a sub-bacia 01 da BESI, a Tabela 24 apresenta os volumes escoados simulados por evento para cada um dos cenários de uso e ocupação do solo propostos para a bacia hidrográfica do riacho Gravatá. A Tabela 25 apresenta o valor da vazão de pico para cada cenário em cada evento, e a Figura 82 relaciona o coeficiente de deflúvio de cada evento para os cenários simulados.

Tabela 24. Escoamentos simulados nos diferentes cenários – BESI

Evento	Total precipitado (mm)	Total Escoado (mm)			
		Cenário 1 Atual	Cenário 2 Caatinga	Cenário 3 Desmatada	Cenário 4 Pastagem
1	20,60	3,08	0,06	13,36	9,67
2	23,20	12,45	9,71	19,23	17,11
3	33,30	4,40	0,95	19,71	12,29
4	28,10	8,20	4,71	19,42	15,08
5	35,30	21,00	17,75	28,76	26,47
6	30,40	1,34	2,76	12,92	5,35
7	19,90	6,18	0,00	14,79	12,19
8	24,50	0,37	0,01	7,06	1,53
9	26,00	5,36	0,60	17,82	13,91

Tabela 25. Vazões de pico nos diferentes cenários – BESI

Evento	Vazão de pico (mm/h)			
	Cenário 1 Atual	Cenário 2 Caatinga	Cenário 3 Desmatada	Cenário 4 Pastagem
1	3,11	0,07	11,54	8,90
2	25,06	19,60	39,62	33,53
3	6,52	1,83	18,44	14,72
4	13,29	8,58	27,00	20,81
5	37,61	31,67	53,57	46,84
6	0,97	-	6,88	3,43
7	10	5,04	23,46	17,92
8	0,3	-	3,28	1,23
9	9,18	0,05	14,47	5,13

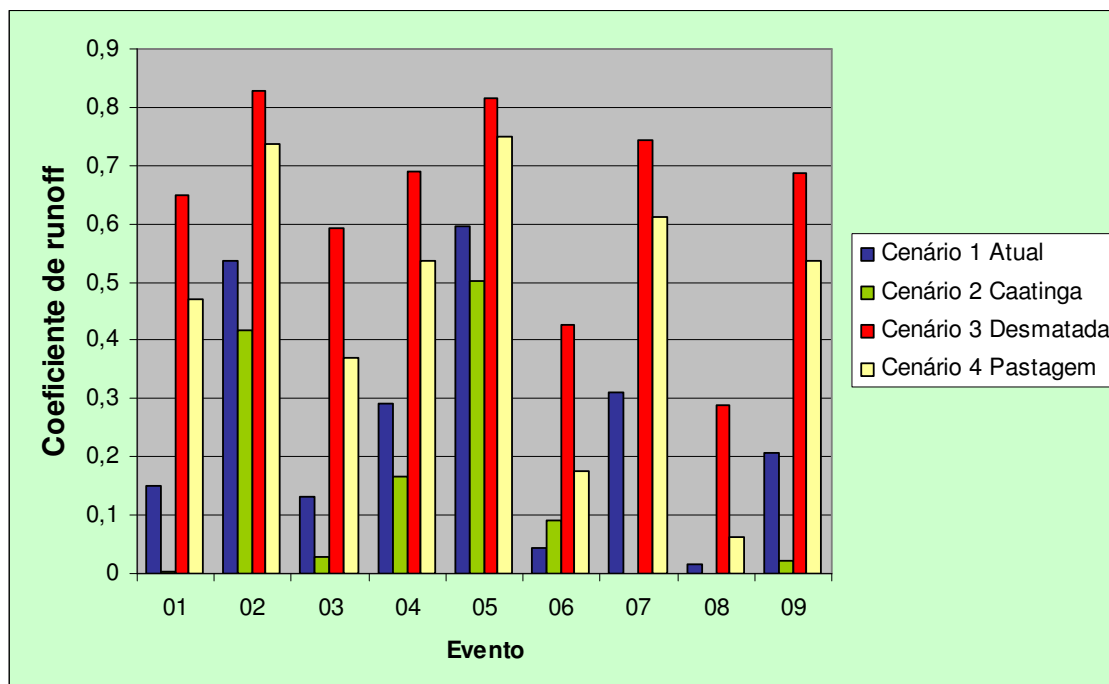


Figura 82. Coeficientes de escoamento dos cenários propostos - BESI

Na sub-bacia 01, para o cenário 2, de caatinga, o coeficiente de deflúvio médio dos eventos foi de 0,14, equivalente a 54% do valor para a condição atual de uso e ocupação do solo, de 0,25. No cenário de desmatamento o coeficiente médio atinge 0,64, equivalente a 250% do valor atual, e no cenário de pastagem, o valor calculado é de 86% a mais que o atual (0,47).

Os eventos 01, 06, 08 e 09 geraram escoamentos praticamente nulos para a condição de caatinga. Já os eventos 02 e 05 geraram um escoamento bem próximo à metade daquele calculado para a condição desmatada (50% para o evento 02 e 62% para o evento 05). Isso acontece porque estes eventos possuem altas intensidades precipitadas logo em seu início. Assim, atingem logo a capacidade de infiltração do solo, mesmo com o alto valor de condutividade hidráulica saturada da caatinga, e passam a escoar cedo. Da mesma forma, atingem também altos valores para a vazão de pico, também próximos à metade do valor dessa em condição de desmatamento.

A Figura 80 apresenta o hidrograma simulado em cada cenário para o evento 09, e a Figura 81 para o evento 05.

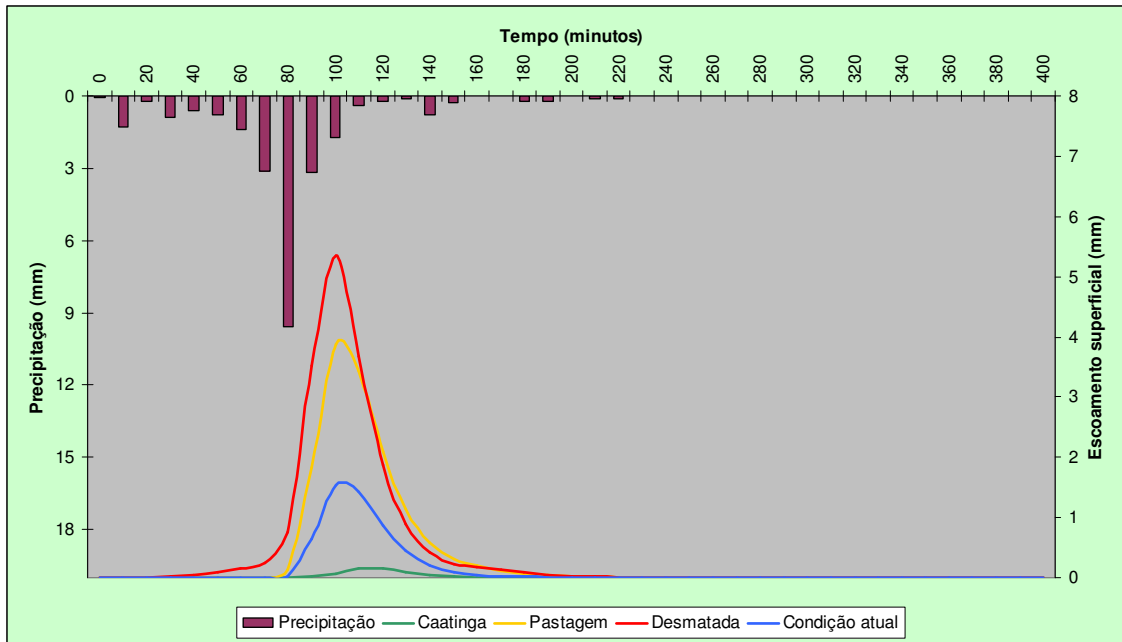


Figura 83. Hidrograma do evento 09 para os cenários propostos – BESI

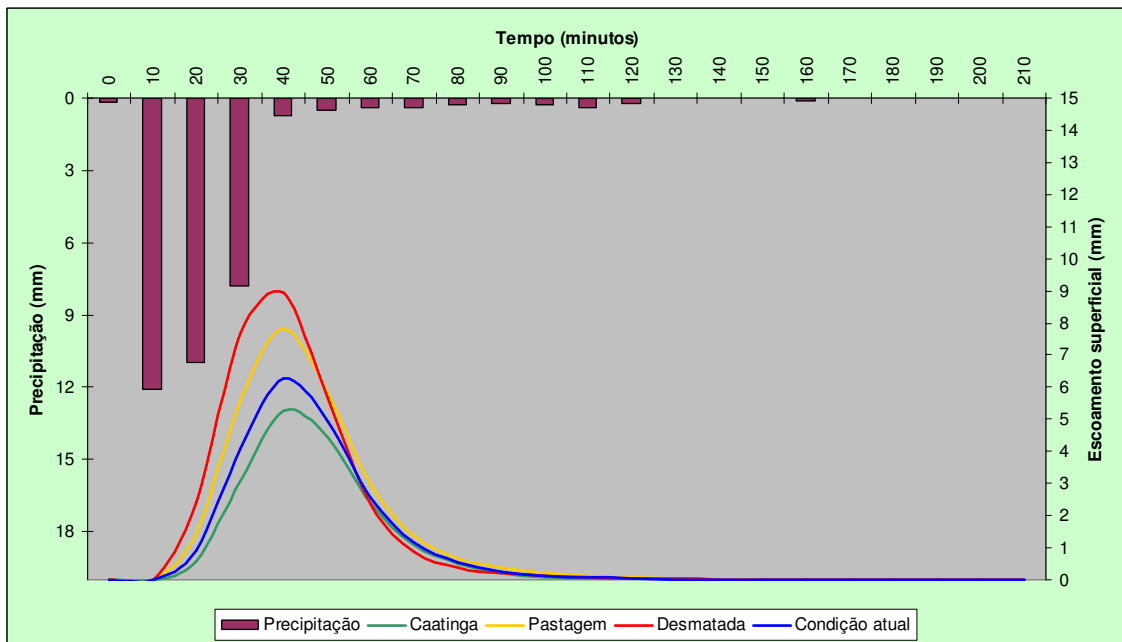


Figura 84. Hidrograma do evento 05 para os cenários propostos – BESI

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, o modelo Kineros2 foi utilizado para avaliar o potencial de escoamento da Bacia Hidrográfica do Riacho Gravatá (BHRG) e da sub-bacia 01 da Bacia Experimental de Santana do Ipanema (BESI).

O modelo conseguiu representar da maneira esperada as variações de padrão de precipitação e condição inicial de umidade do solo para os nove eventos simulados, além de ter se mostrado fácil de utilizar.

Foram selecionados e analisados nove eventos, com totais precipitados na faixa de 20 a 35 mm. A duração dos eventos selecionados variou entre 60 e 864 minutos, com intensidades médias de 1,7 a 23,2 mm/h, mostrando a grande variação existente no padrão de precipitação da região.

Verificou-se que, com exceção de um evento, sempre mais que 50% do total precipitado ocorreu na metade inicial do evento. Além disso, mais de 90% do total precipitado por evento ocorreu em nos primeiros 75% de sua duração, para todos os eventos.

Com relação à simulação de eventos na bacia hidrográfica do riacho Gravatá e na Bacia Experimental de Santana do Ipanema, constatou-se que a lâmina escoada varia muito de acordo com o evento estudado, para cenários idênticos de uso e ocupação do solo e condições iniciais de umidade, devido à própria variação do padrão de precipitação

Para os nove cenários considerados, os valores do coeficiente de deflúvio variaram entre 1,7% e 54,93%, com valor médio de 26,63%, na BHRG. Na BESI, o total escoado variou de 4,78% a 68,67% do total precipitado, com valor médio de 25,34%.

O coeficiente de deflúvio calculado nas simulações apresentou correlações consideráveis, tanto na BHRG quanto na BESI, com a duração do evento de precipitação (83,4 e 84,05%, respectivamente) e sua intensidade média (81,09 e 86,63%, respectivamente).

As simulações feitas para a BESI discretizada a partir de uma maior resolução espacial apresentaram totais escoados aproximadamente 30% maiores que aqueles obtidos a partir de discretização com menor grau de detalhamento, confirmando tendências da literatura.

No estudo da influência do grau de umidade inicial do solo, constatou-se que o coeficiente de deflúvio médio para os eventos das duas bacias estudadas variou cerca de 40% na faixa proposta para a saturação inicial do solo (10% a 90%).

A análise de sensibilidade dos parâmetros, realizada na BHRG, mostrou que os parâmetros mais sensíveis são a condutividade hidráulica saturada, o coeficiente de Manning e o grau de capilaridade.

Constatou-se que um aumento no grau de capilaridade do solo antecipa e diminui o pico do escoamento superficial. Quanto à condutividade hidráulica saturada, houve variação de quase 200% para os volumes escoados entre os extremos considerados na análise de sensibilidade.

Verificou-se ainda que, a depender do valor estimado para o coeficiente de Manning, há uma considerável modificação na forma do hidrograma de escoamento superficial, principalmente no tempo de pico e intensidade máxima. Para o volume escoado total, a variação se mostrou pequena.

Foram analisados quatro cenários para o uso e ocupação do solo na BHRG e na BESI: situação atual (cenário 1), consideração da caatinga original em toda a área (cenário 2), desmatamento total (cenário 3) e predominância de pastagem (cenário 4).

Para a BHRG, o cenário 1 apresentou um coeficiente de deflúvio médio de 0,27, o valor foi de 0,08 para o cenário 2, de 0,59 para o cenário 3 e de 0,28 para o cenário 4. Nota-se que a situação de caatinga geraria um volume escoado da ordem de apenas 31% da situação atual, enquanto a condição de solo desmatado faria o total escoado aumentar em 121%.

Para a BESI, a relação entre o deflúvio total para uma condição de caatinga e para a condição atual seria de 54%. Para uma situação de desmatamento, esse índice seria equivalente a 250% da situação atual.

Deve-se destacar que os hidrogramas de escoamento e dados simulados neste trabalho são apenas especulativos, visto que não foram comparados com a situação real. Porém, dá para se compreender, através das simulações, que as modificações causadas pelo manejo inadequado do solo na região, responsáveis pela degradação de grande parte da caatinga antes existente, conduzem para uma preocupante diminuição da infiltração,

diminuindo a disponibilidade hídrica dos lençóis freáticos que servem como reserva para as comunidades na época de seca.

Tanto para a BESI quanto para a BHRG percebe-se que um efeito de desmatamento do solo conduz a um acréscimo considerável no volume escoado, contribuindo ainda mais para a escassez hídrica da região.

Como sugestões de trabalhos futuros na bacia experimental de Santana do Ipanema, visando a modelagem do processo chuva-vazão, tem-se o seguinte:

- Instalação de uma rede pluviométrica maior e bem distribuída para diminuir os erros na representação espacial da chuva na região;
- Avaliação mais detalhada da variação da condutividade hidráulica saturada na região;
- Avaliação do coeficiente de Manning e da interceptação vegetal para as condições locais;
- Aplicação e calibração do Kineros2 para eventos futuros, nas unidades de estudo da bacia experimental, a partir de eventos de chuva bem representados, escoamento medidos e técnicas para quantificar a umidade inicial do solo;

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAGOAS. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema**. Maceió: Secretaria Executiva de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Naturais, 1998.

ALBUQUERQUE, A. W.; NETO, F. L.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. **Manejo da Cobertura do Solo e de Práticas Conservacionistas nas Perdas de Solo e Água em Sumé, PB**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6, n.1, p.136-141, 2002.

ALEXANDRE, A. M. B.; MARTINS, E. S.; CLARKE, R. T.; REIS JR, D. S. **Regionalização de Parâmetros de Modelos Hidrológicos**. In: Anais do XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2005, João Pessoa – PB.

AL-QURASHI, A.; MCINTRYE, N.; WHEATER, H.; UNKRICH, C. **Application of the Kineros2 Rainfall-Runoff Model to an Arid Catchment In Oman**. *Journal of Hydrology*, v.355, n.1-4, p.91-105, 2008.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2007. CD-ROM

ARAGÃO, R. **Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com os Dados da Bacia Experimental de Sumé**. 2000. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 2000.

ARAGÃO, R.; SRINIVASAN, V. S.; FIGUEIREDO, E. E.; MORAES, H. A.; SANTOS, L. L.; MENEZES, F. A.; MAGALHÃES, M. S. **Efeito de Escala nos Parâmetros do Modelo Kineros2 Aplicado a Bacias de Diferentes Dimensões no Semi-Árido Nordeste**. In: Anais do VIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2006, Gravatá - PE.

BARBOSA, J. M. S. G. ; BARBOSA, D. L. ; ALMEIDA, M. A. ; COSTA, C. F. L. ; BRAGA, A. C. F. M. ; FIGUEIREDO, E. E. . **Calibração e Validação do Modelo SMAP para uma Bacia do Semi-Árido da Paraíba.** In: Anais do VI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2006, Natal - RN.

BATISTA, M. S. B. **Análise de Incerteza no Escoamento Simulado com o Modelo Distribuído NAVMO.** 2006. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2006.

BLOSCHL, G.; SIVAPALAN, M. **Scale Issues in Hydrological Modeling: a Review.** *Hydrological Processes*, v.9, n.3-4, p. 251–290, 1995.

BRAKENSIEK, D. L. **Estimating the Effective Capillary Pressure in the Green and Ampt Infiltration Equation.** *Water Resources Research*, v.13, n.3, p.680-682, 1977.

BRASIL. **Desertificação: Caracterização e Impactos.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1999. 84p.

BRASIL. **Nova Delimitação do Semi-Árido Brasileiro.** Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2005. 32p.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic Properties of Porous Media Model Using Digital Elevation Data.** *Hydrological Paper*, n.3, 27p, 1964.

BRUNEAU, P.; GASCUEL-ODOUX, C.; ROBIN, P.; MEROT, P.; BEVEN, K. **Sensitivity to Space and Time Resolution of a Hydrological Model Using Digital Elevation Data.** *Hydrological Processes*, v.9, n.1, p. 69-81, 1995.

CADIER, E. **Hidrologia das Pequenas Bacias do Nordeste Semi-Árido.** Recife: SUDENE, Série Hidrologia n. 31, 1994. 448p.

CANFIELD, H.E.; GOODRICH, D.C.; BURNS, I.S. **Selection of Parameters Values to Model Post-fire Runoff and Sediment Transport at the Watershed Scale in Southwestern Forests**. In: Proceedings of ASCE WATERSHED MANAGEMENT, 2005. Virginia, USA.

CAVALCANTE, N.M.; CADIER, E.; DOHERTY, F.R. **Bacia Hidrográfica Representativa de Tauá. Relatório Final**. Recife: SUDENE, Série Hidrologia n. 28, 1990. 326p.

COLTRI, P. P.; PINTO, H. S.; FERREIRA, N. J.; CECCARELLI, M.; CORAL, G. **Sistema de Monitoramento e Previsão Agrometeorológica: Agritempo**. In: Anais do XV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2007, Aracaju - SE.

COSTA, A. C. **Hidrologia de uma Bacia Experimental em Caatinga Conservada no Semi-Árido Brasileiro** 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2007.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Diagnóstico do Município de Santana do Ipanema**. Recife: Ministério de Minas e Energia, 2005. 12p.

CRUZ, E. S.; SRINIVASAN, V. S.; LACERDA, I. S.; SANTOS, L. L. **Avaliação do Efeito de Escala dos Parâmetros de Erosão do Modelo WEPP na Região Semi-Árida da Paraíba**. In: Anais do VII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2004, São Luiz - MA.

DOHERTY, F.R.; ARAÚJO FILHO, P.F.; CADIER, E. **Modelização hidrológica das pequenas bacias do nordeste brasileiro**. Recife: SUDENE, Série Hidrologia n. 33, 1994. 207p.

DUARTE, R. **Tecnologias para a Agropecuária e a Criação de Ocupações no Semi-Árido Nordestino**. In: Anais do III ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS DO TRABALHO, 2000, Rio de Janeiro - RJ.

EL-HAMES, A. S.; RICHARDS, K. S. **An Integrated, Physically Based Model for Arid Region Flash Flood Prediction Capable of Simulating Dynamic Transmission Loss.** *Hydrological Processes*, v.12, n.8, p. 1219-1232, 1998.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.

FARIAS, T. R. L. **Produção de sedimentos em bacias hidrográficas sob diferentes contextos geoambientais: medida e modelagem.** 2008. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2008.

FIGUEIREDO, E. E. **Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modeling in a Semi-Arid Region of Brazil.** 1998. Ph.D Thesis (Civil Engineering) - Department of Civil Engineering, University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle, UK.

FIGUEIREDO, E. E.; BATHURST, J. C. Effects of rainfall variability and land-use change on sediment yield simulated by SHETRAN In: **Sediments Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems.** Wallingford, UK: IAHS Press, IAHS Pub. n. 306, 2006. p 620-626.

GALVÃO, C. O. **Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo em Microbacias.** 1990. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 1990.

GOODRICH, D. C. **Geometric Simplification of a Distributed Rainfall-Runoff Model over a Range of Basin Scales.** 1990. 361f. Ph.D Dissertation (Hydrology) - Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Arizona, USA. 1990.

GRAYSON, R. B.; MOORE, I. D.; McMAHON, T. A.; **Physically Based Hydrologic Modeling 1. A Terrain-Based Model for Investigative Purposes.** *Water Resources Research*, v.28, n.10, p. 2639-2658, 1992.

GUIMARAES JUNIOR, J. A. ; RIGHETTO, A. M. ; MELO, J. M. B. G. **Aplicação do Modelo MODHISA para Geração de Vazões Médias Mensais em Rios do Semi-Árido Nordestino.** In: Anais do VI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2002, Maceió - AL.

HANTUSH, M. M.; KALIN, L. **Modeling Uncertainty of Runoff and Sediment Yield Using a Distributed Hydrologic Model.** In: 1st INTERAGENCY CONFERENCE ON RESEARCH IN THE WATERSHEDS (ICRW), 2003, Benson, USA.

HERNANDEZ, M.; MILLER, S. N.; GOODRICH, D. C.; GOFF, B. F.; KEPNER, W. G.; EDMONDS, C. M.; JONES, K. B. **Modeling Runoff Response to Land Cover and Rainfall Spatial Variability in Semi-Arid Watersheds.** *Environmental Monitoring and Assessment*, v.64, n.1, p.285–298, 2000.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **GeoBrasil 2002: Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil.** Brasília: Ed. IBAMA, 2002. 447p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2000.** Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem Populacional 2007.** Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>

KALIN, L.; GOVINDARAJUA, R. S.; HANTUSH, M. M. **Effect of Geomorphologic Resolution on Modeling of Runoff Hydrograph and Sedimentograph Over Small Watersheds.** *Journal of Hydrology*, v.276, n.1-4, p.89-111, 2003.

LACERDA JUNIOR, H. B. **Um Estudo dos Efeitos de Escala e Uso do Solo na Parametrização do Modelo NAVMO com Dados de bacias do Cariri Paraibano**. 2002. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 2002.

LIMA, I. F. **Estudos Geográficos do Semi-árido Alagoano**. Governo do Estado de Alagoas. Maceió, 1992.

LOPES, W. T. A. **Efeitos de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-Árida da Paraíba**. 2003. 196f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 2003.

LOPES, V. L.; CANFIELD, E. **Effects of Watershed Representation on Runoff and Sediment Yield Modeling**. *Journal of the American Water Resources Association*, v.40, n.2, p.311-319, 2004.

LOPES, O. F.; SANTOS, J. C. P.; BARROS, A. H. C. **Diagnóstico Ambiental do Município de Santana do Ipanema, Alagoas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2005. 76p.

MALTCHIK, L. Ecologia de Rios Intermitentes Tropicais. In: POMPÊO, M. L. M. **Perspectivas da Limnologia no Brasil**. São Luis : Gráfica e Editora União, 1999. p. 77-89.

MEDEIROS, Y. D. P.; FONTES, A. S.; ALVARES, D. Bacia Experimental do Rio do Cedro - BA. In: **Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido**. Relatório final apresentado para FINEP do projeto convênio FINEP/FUNPEC 22010453-00. 2004. p. 165-206.

MEDEIROS, J. D. F.; SANTOS, N. C. F.; GUEDES, F. **Análise da Precipitação e do Escoamento Superficial na Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açú-RN**. Natal: EMPARN, Documentos n. 29, 2005. 32p.

MEDEIROS, V. M. A ; RIGHETTO, A. M. ; MEDEIROS, V. M. A. ; MOREIRA, L. F. F. **Modelagem do Processo Chuva-vazão na Bacia Experimental de Serra Negra do Norte, RN.** In: Anais do XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2005, João Pessoa - PB.

MELO, M. R. S.; MOURA, R. F.; MOURA, A. E. S. S.; CORREA, M. M.; FIGUEIREDO, A. C. **Análise Comparativa entre a Precipitação Medida no Pluviômetro Ville de Paris e Alternativo.** In: Anais do XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2006, João Pessoa - PB.

MELO FILHO, J. F.; SOUZA, A. L. V. **O Manejo e a Conservação do Solo no Semi-Árido Baiano: Desafios para a Sustentabilidade.** *Bahia Agrícola*, v.7, n. 3, p, 50-60, 2006.

MESQUITA, M. G. B. F; MORAES, S. O. **A dependência entre a condutividade hidráulica Saturada e Atributos Físicos do Solo.** *Ciência Rural*, v.34, n.3, p.963-969, 2004

MICHAUD, J. D.; SOROOSHIAN, S. **Comparison of Simple versus Complex Distributed Runoff Models on a Midsized Semiarid Watershed.** *Water Resources Research*, v.30, n.3, p.593-606, 1994.

MILLER, S. N.; GUERTIN, D. P.; KAMRAN, H. S.; GOODRICH, D. C. **Using High Resolution Synthetic Aperture Radar for Terrain Mapping: Influences on Hydrologic and Geomorphic Investigation.** In: Proceedings of WILDLAND HYDROLOGY, AWRA SUMMER SPECIALTY CONFERENCE, 1999, Montana, Estados Unidos.

MILLER, S. N.; KEPNER, W. G.; MEHAFFEY, M. H.; HERNANDEZ, M.; MILLER, R. C.; GOODRICH, D. C.; DEVONALD K. K.; HEGGEM D. T.; MILLER W. P. **Integrating Landscape Assessment and Hydrologic Modeling for Land Cover Change Analysis.** *Journal of the American Water Resources Association*, v.38, n.4, p.915-929, 2002.

MILLER, S. N.; GUERTIN, D. P.; GOODRICH, D. C. **Hydrologic Modeling Uncertainty Resulting from Land Cover Misclassification**. *Journal of the American Water Resources Association*, v.43, n.4, p.1065-1075, 2007.

MIRANDA, E. E.; COUTINHO, A. C. **Brasil Visto do Espaço**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2004. Disponível em: <<http://www.cdbrasil.cnpm.embrapa.br>>

MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, J. J. N.; CORREIA, M. M.; COSTA NETO, M. L.; ARAÚJO, T. C.; SANTOS, T. E. M. Bacia Experimental do Riacho Jatobá - PE. In: **Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido**. Relatório final apresentado para FINEP do projeto convênio FINEP/FUNPEC 22010453-00. 2004. p. 249-288.

MOURA, E. M.; RIGHETTO, A. M.; GUIMARAES JUNIOR, J. A.; MATTOS, A.; MOREIRA, L. F. F.. **Avaliação da Aplicação Espacial do MODHISA na Bacia do Seridó**. In: Anais do VIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2006, Gravatá - PE.

OLIVEIRA, L. C. K. **Papel do Monitoramento e da Previsão de Vazões no Gerenciamento de Bacias Hidrográficas**. 2003. 177f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, M. B. **Análise do Desempenho de Equações de Infiltração e de Métodos de Determinação da Capacidade de Campo para Solos em uma Bacia Hidrográfica de São José de Ubá-RJ**. 2005. 220f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PAIVA, F. M. L.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. **Study of Vegetal Cover Influence on Experimental Erosion Plots by a Runoff-Erosion Modeling**. In: Anais do I INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LAND DEGRADATION AND DESERTIFICATION, 2004, Uberlândia - MG.

PAIVA, F. M. L.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G. **Modelagem Hidrossedimentológica com Kineros2 para as Micro-bacias Experimentais de São João do Cariri**. In: Anais do XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS e do 8º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2007, São Paulo - SP.

PARLANGE, J.Y.; LISLE, I.; BRADDOCK, R. D.; SMITH, R. E. **The Three-Parameter Infiltration Equation**. *Soil Science*, v.133, n.6, p.337-341, 1982.

PICCIN, E.; SCHERER, F. B.; CARGNIN, M.; NEO, V.; **A Invenção da Seca no Nordeste**. 2005. Disponível em < <http://w3.ufsm.br/mundogeo/geopolitica/brasil.htm> |>

PIMENTEL DA SILVA, L.; MORAES, M. F.; OTTONI FILHO, T.; SILVA, R. C. V. **Bacia Experimental Rural De Santa Maria/Cambiocó - RJ: O Monitoramento Fluviométrico**. In: Anais do ENCONTRO NACIONAL DE BACIAS EXPERIMENTAIS, 2005, Salvador - BA.

PNUD. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**. Brasília: PNUD, 2000. Disponível em < <http://www.pnud.org.br> >

PONCE, V. M. **Engineering Hydrology: Principles and Practices**. New Jersey: Ed. Prentice Hall, 1989. 645p.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. **Estimation of Soil Water Properties**. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.25, n.5, p.1316-1328, 1982.

REBOUÇAS, A.C. **Água na Região Nordeste: Desperdício e Escassez**. *Estudos Avançados*, v.11, n.29, 1997.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades Físicas do Solo**. Santa Maria, 2006. 18p. (Apostila).

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica**. Belo Horizonte, 2001. 33p. (Apostila).

RIGHETTO, A. M.; O Projeto IBESA. In: **Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido**. Relatório final apresentado para FINEP do projeto convênio FINEP/FUNPEC 22010453-00. 2004. 3p.

RIGHETTO, A. M.; MEDEIROS, V. M. A.; MOREIRA, L. F. F.; GUIMARÃES JUNIOR, J. A.; MATTOS, A. **Bacia Experimental de Serra Negra do Norte - RN**. In: **Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido**. Relatório final apresentado para FINEP do projeto convênio FINEP/FUNPEC 22010453-00. 2004. p. 5-40.

SALATI, E.; LEMOS, H. M. Água e Desenvolvimento Sustentável. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. C. **Águas Doces do Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 2.ed. São Paulo: Escrituras, 2002. p. 39-61.

SANTOS, F. X. **Lisímetro de Pesagem Hidráulica e Evapotranspiração de Referência por Diferentes Métodos no Agreste Pernambucano**. 2004. 79f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) – Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2004.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V.S. **Análise das Perdas de Água e Solo em Diferentes Coberturas Superficiais no Semi-Árido da Paraíba**. *Revista OKARA: Geografia em debate*, v.1, n.1, p. 16-32, 2007

SEMMENS, D. J.; GOODRICH, D. C.; UNKRICH, C. L.; SMITH, R. E.; WOOLHISER, D. A.; MILLER, S. N. KINEROS2 and the AGWA Modeling Framework. In: WHEATER, H.; SOROOSHIAN, S.; SHARMA, K.D. (editors).

Hydrological Modelling In Arid and Semi-Arid Areas. New York:Cambridge University Press, 2008. 206p.

SERAPHIM, B.J.Z; CADIER, E. **Síntese dos Trabalhos e Publicações Elaborados Através da Cooperação Técnica Brasil/França (SUDENE/ORSTOM/TAPI).** Recife: SUDENE, Série Hidrologia n. 34, 1994. 67p.

SILANS, A. M. P.; SILVA, T. C.; FILGUEIRA, H. J. A.; MOURA, E. M.; LUCENA, A. P.; VITORINO FILHO, S.; SOUSA, E. E.; ALMEIDA, C. N.; LIRA, G. A. R. Bacia Experimental do Rio Guaraíra - PB. In: **Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido.** Relatório final apresentado para FINEP do projeto convênio FINEP/FUNPEC 22010453-00. 2004. p. 41-92.

SILVA, J. M. A. **Modelo Hidrológico para o Cálculo do Balanço Hídrico e Obtenção do Hidrograma de Escoamento Superficial em Bacias Hidrográficas: Desenvolvimento e Aplicação.** 2002. 137f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2002.

SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C.; WOOLHISER, D. A.; QUINTON, J. N.; **Dynamic, Distributed Simulation of Watershed Erosion: The KINEROS2 and EUROSEM Models.** *Journal of Soil and Conservation*, v.50, n.5, p.517-520, 1995.

SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. Rainfall Excess Overland Flow. In: ANDERSON, M. G. (editor). **Encyclopedia of Hydrological Sciences.** John Wiley & Sons, LTD, 2005. p. 1707-1718.

SORMAN, A. U.; ABDULRAZZAG, J. **Infiltration-Recharge Through Wadi Beds in Arid Region.** *Hydrological Sciences Journal*, v.38, n.3, p.173-186, 1993.

SOUSA, G. **MODFIPE – Um Modelo Distribuído de Base Física para Simulação do Escoamento e Erosão do Solo**. 2007. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 2007.

SRINIVASAN, V. S.; GALVAO, C.O. **Evaluation of Runoff and Erosion Loss in Microbasins Utilizing the Hydrodynamic Model WESP**. *Advances in Engineering Software*, v. 22, n.2, p. 79-85, 1995.

SRINIVASAN, V. S.; CRUZ, E. S. **Application of the Model Wepp for the Evaluation of Runoff and Soil Erosion in a Semiarid Region of Brazil**. In: Proceedings of XXXI IAHR Congress, 2005, Seoul, Korea.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. **Impacto do Desmatamento no Comportamento Hidrológico**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.2, n.1, p.135-152, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. 652p.

USDA. **Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS2)**. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service, Southwest Watershed Research Center, 2007. Disponível em: <<http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>>.

USGS. United States Geological Survey. **Seamless Distribution Data**. 2007. Disponível em <<http://www.usgs.gov.br>>

VALERIANO, M. M. **Estimativas de Variáveis Topográficas por Geoprocessamento para Modelagem da Perda de Solos**. 1999. 172f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro. 1999.

VENTURINI, V. **A New Methodology to Integrate Parameters in Lumped Models**. 2001. 49f. Master Thesis (Environmental Engineering) - Department of Civil and Environmental Engineering of the College of Engineering , University of Cincinnati, Cincinnati, USA.

WAGENER, T.; GUPTA, H.; YATHEENDRADAS, S.; GOODRICH, D.; UNKRICH, C.; SCHAFFNER, M. **Understanding Sources of Uncertainty in Flash-Flood Forecasting for Semi-Arid Regions**. *Association of Hydrological Science*. v.313, p. 204-212. 2007.

WHEATER, H. S.; BROWN, R. P. C. **Limitations of Design Hydrographs in Arid Areas - An Illustration from South West Saudi Arabia**. In: Proceedings of THE 2ND BRITISH HYDROLOGICAL SOCIETY NATIONAL SYMPOSIUM, 1989, Sheffield, UK.

WHEATER, H.S. Hydrological Processes in Arid and Semi-Arid Areas. In WHEATER, H.S; AL-WESHAN, R.A. (Editors.). **Hydrology of Wadi Systems**. Paris: UNESCO IHP-V. Technical Documents in Hydrology, n.55. 2002. p. 1-13.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. **KINEROS, a Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual**. USDA - Agricultural Research Service, 1990. 130p.

YATHEENDRADAS, S.; WAGENER, T.; GUPTA, H.; UNKRICH, C.; GOODRICH, D.; SCHAFFNER, M.; STEWART, A. **Investigating Uncertainty in Distributed Flash-Flood Forecasting for Semi-Arid Regions**. *Water Resources Research*, v.44, 2008.

Apêndice A

Elementos discretizados para a bacia hidrográfica do riacho Gravatá

Elemento	Tipo	Área (m ²)	Comprimento (m)	Largura (m)	Declividade (m/m)	Elementos Anteriores	Elementos Laterais
1	P	338.711,66	533,89	634,42	0,067	-	-
2	P	646.631,36	567,39	1.139,67	0,178	-	-
3	C	514.227,45	1.046,22	-	0,070	-	1;2
4	P	500.000,00	643,13	799,57	0,059	-	-
5	P	1.299.421,11	481,48	2.698,83	0,083	4	-
6	P	2.324.793,69	1.325,18	1.754,33	0,067	-	-
7	C	-	1.545,16	-	0,035	3	5;6
8	P	2.845.177,98	2.290,59	1.242,12	0,048	-	-
9	P	412.612,39	303,73	1.358,48	0,148	-	-
10	C	-	1.146,32	-	0,021	7	8;9
11	P	640.472,96	510,61	1.254,32	0,166	-	-
12	P	415.691,59	316,03	1.315,36	0,446	-	-
13	C	-	1.124,17	-	0,027	-	11;12
14	P	181.672,62	556,67	326,36	0,101	-	-
15	P	147.801,45	430,78	343,10	0,179	-	-
16	C	-	476,07	-	0,067	13	14;15
17	P	1.351.767,46	458,17	2.950,37	0,140	-	-
18	P	668.185,74	367,93	1.816,07	0,095	-	-
19	C	-	1.555,14	-	0,055	16	17;18
20	P	994.580,61	1.446,28	687,68	0,121	-	-
21	P	1.444.143,37	978,26	1.476,24	0,065	-	-
22	C	-	918,54	-	0,019	10;19	20;21
23	P	600.443,40	1.070,06	561,13	0,112	-	-
24	P	440.325,16	504,11	873,48	0,208	-	-
25	C	-	551,16	-	0,022	22	23;24
26	P	1.213.203,60	1.617,69	749,96	0,111	-	-
27	P	779.036,83	406,55	1.916,22	0,150	-	-
28	C	-	1.029,80	-	0,017	25	26;27
29	P	806.749,60	1.286,35	627,16	0,164	-	-
30	P	819.066,39	911,10	898,99	0,041	-	-
31	P	742.086,46	562,72	1.318,76	0,167	30	-
32	C	-	515,36	-	0,017	28	29;31
33	P	1.043.847,76	1.086,42	960,82	0,151	-	-
34	P	310.998,89	403,54	770,68	0,072	33	-
35	P	520.384,28	353,02	1.474,09	0,042	34	-
36	P	1.413.351,40	565,71	2.498,36	0,099	-	-
37	P	1.274.787,54	648,90	1.964,52	0,153	36	-
38	C	-	1.922,03	-	0,008	32	35;37
39	P	357.186,85	442,14	807,86	0,124	-	-
40	P	538.859,47	432,28	1.246,55	0,090	-	-
41	C	-	917,77	-	0,129	-	39;40
42	P	163.197,44	665,49	245,23	0,162	-	-

43	P	458.800,34	539,19	850,90	0,156	42	-
44	P	763.640,84	916,57	833,15	0,142	-	-
45	C	-	589,78	-	0,032	41	43;44
46	P	375.662,03	506,32	741,94	0,136	-	-
47	P	606.601,80	1.229,12	493,52	0,114	-	-
48	P	575.809,83	1.018,85	565,15	0,039	47	-
49	C	-	339,56	-	0,100	45	46;48
50	P	545.017,86	423,89	1.285,75	0,134	-	-
51	P	837.541,57	992,86	843,56	0,130	-	-
52	C	-	851,61	-	0,042	49	50;51
53	P	95.455,11	208,47	457,88	0,110	-	-
54	P	449.562,75	486,98	923,17	0,053	-	-
55	C	-	665,00	-	0,047	52	53;54
56	P	354.107,65	438,71	807,16	0,176	-	-
57	P	785.195,22	293,48	2.675,43	0,075	56	-
58	P	1.499.568,91	494,16	3.034,55	0,208	-	-
59	P	483.433,92	341,22	1.416,79	0,360	58	-
60	C	-	2.251,95	-	0,009	38;55	57;59
61	P	631.235,37	346,15	1.823,57	0,121	-	-
62	P	541.938,66	796,18	680,67	0,212	61	-
63	P	889.887,92	492,02	1.808,63	0,199	-	-
64	C	-	1.228,67	-	0,037	-	62;63
65	P	215.543,79	957,42	225,13	0,139	-	-
66	P	606.601,80	518,12	1.170,78	0,085	-	-
67	C	-	345,09	-	0,017	64	65;66
68	P	517.305,09	853,98	605,76	0,164	-	-
69	P	344.870,06	558,48	617,51	0,172	-	-
70	C	-	757,90	-	0,012	67	68;69
71	P	363.345,24	720,08	504,59	0,174	-	-
72	P	264.810,94	278,89	949,52	0,280	71	-
73	P	400.295,60	297,73	1.344,50	0,050	-	-
74	C	-	961,60	-	0,023	70	72;73
75	P	412.612,39	326,52	1.263,68	0,193	-	-
76	P	76.979,92	206,49	372,81	0,412	-	-
77	P	326.394,88	675,57	483,14	0,145	-	-
78	C	-	348,44	-	0,135	75	76;77
79	P	532.701,07	706,72	753,76	0,103	-	-
80	P	501.909,10	602,40	833,19	0,083	79	-
81	P	785.195,22	951,92	824,85	0,150	-	-
82	C	-	405,80	-	0,081	78	80;81
83	P	212.464,59	435,40	487,97	0,119	-	-
84	P	1.376.401,03	473,62	2.906,13	0,308	83	-
85	P	501.909,10	498,03	1.007,78	0,076	84	-
86	P	468.037,94	489,22	956,69	0,125	-	-
87	C	-	1.042,22	-	0,016	82	85;86
88	P	221.702,18	101,88	2.176,11	0,432	-	-
89	P	437.245,97	246,65	1.772,75	0,365	-	-
90	C	-	755,94	-	0,085	-	88;89
91	P	264.810,94	821,37	322,40	0,136	-	-

92	P	2.059.982,76	1.738,36	1.185,02	0,138	-	-
93	C	-	602,87	-	0,038	90	91;92
94	P	172.435,03	208,52	826,95	0,106	-	-
95	P	209.385,39	392,38	533,62	0,229	-	-
96	C	-	846,63	-	0,032	93	94;95
97	P	1.391.797,02	693,44	2.007,10	0,167	-	-
98	P	1.514.964,90	1.303,55	1.162,19	0,071	97	-
99	P	662.027,34	883,54	749,29	0,119	-	-
100	P	354.107,65	419,25	844,61	0,091	99	-
101	C	-	543,43	-	0,013	87;96	98;100
102	P	569.651,43	946,97	601,55	0,065	-	-
103	P	917.600,69	992,71	924,34	0,049	-	-
104	P	421.849,98	432,02	976,46	0,164	103	-
105	C	-	916,47	-	0,011	101	102;104
106	P	394.137,21	551,37	714,83	0,140	-	-
107	P	973.026,23	424,04	2.294,68	0,139	106	-
108	P	988.422,22	599,89	1.647,68	0,097	-	-
109	P	264.810,94	526,04	503,40	0,110	108	-
110	C	-	1.667,63	-	0,010	60;74;105	107;109
111	P	458.800,34	497,73	921,79	0,368	-	-
112	C	-	316,90	-	0,407	111	-
113	P	227.860,57	435,14	523,65	0,071	-	-
114	P	206.306,20	295,62	697,87	0,118	-	-
115	C	-	594,23	-	0,061	112	113;114
116	P	843.699,96	516,87	1.632,32	0,310	-	-
117	P	1.013.055,80	496,22	2.041,56	0,109	116	-
118	P	791.353,61	512,56	1.543,92	0,082	-	-
119	C	-	1.371,61	-	0,040	115	117;118
120	P	209.385,39	348,16	601,41	0,055	-	-
121	P	517.305,09	459,05	1.126,91	0,181	-	-
122	C	-	660,79	-	0,021	119	120;121
123	P	692.819,31	520,92	1.329,99	0,119	-	-
124	P	357.186,85	316,82	1.127,43	0,057	-	-
125	C	-	1.014,16	-	0,025	122	123;124
126	P	1.364.084,25	863,79	1.579,19	0,168	-	-
127	P	1.250.153,96	675,54	1.850,60	0,044	126	-
128	P	1.865.993,35	836,84	2.229,80	0,087	-	-
129	P	695.898,51	595,87	1.167,86	0,275	128	-
130	C	-	2.792,45	-	0,008	110;125	127;129
131	P	1.496.489,72	770,94	1.941,13	0,141	-	-
132	P	477.275,53	629,30	758,43	0,121	-	-
133	C	-	635,80	-	0,146	-	131;132
134	P	446.483,56	574,91	776,62	0,099	-	-
135	P	1.533.440,08	661,39	2.318,52	0,210	-	-
136	C	-	1.406,75	-	0,043	133	134;135
137	P	825.224,78	1.159,38	711,78	0,160	-	-
138	P	578.889,03	430,26	1.345,45	0,114	137	-
139	P	775.957,63	1.163,91	666,68	0,054	-	-
140	P	560.413,84	1.240,34	451,82	0,183	139	-

141	C	-	951,68	-	0,015	130;136	138;140
142	P	1.789.013,43	622,16	2.875,50	0,211	-	-
143	P	4.249.291,78	2.053,97	2.068,82	0,046	142	-
144	P	988.422,22	464,86	2.126,28	0,075	-	-
145	P	751.324,05	1.066,74	704,32	0,129	144	-
146	C	-	1.743,41	-	0,017	141	143;145
147	P	1.465.697,75	1.282,83	1.142,55	0,207	-	-
148	P	532.701,07	432,39	1.231,99	0,199	-	-
149	C	-	1.218,62	-	0,140	-	147;148
150	P	1.699.716,71	1.705,06	996,87	0,147	-	-
151	P	520.384,28	409,63	1.270,39	0,291	-	-
152	C	-	832,02	-	0,059	149	150;151
153	P	101.613,50	498,78	203,72	0,034	-	-
154	P	138.563,86	253,64	546,30	0,051	-	-
155	C	-	267,09	-	0,045	152	153;154
156	P	428.008,38	283,27	1.510,97	0,141	-	-
157	P	474.196,33	379,79	1.248,56	0,190	-	-
158	C	-	947,00	-	0,092	-	156;157
159	P	98.534,30	448,41	219,74	0,038	-	-
160	P	190.910,21	264,36	722,16	0,185	-	-
161	C	-	265,27	-	0,060	158	159;160
162	P	166.276,64	373,44	445,25	0,013	-	-
163	P	200.147,80	217,71	919,32	0,133	-	-
164	C	-	454,77	-	0,015	161	162;163
165	P	745.165,66	651,23	1.144,24	0,160	-	-
166	P	923.759,08	762,58	1.211,36	0,047	-	-
167	C	-	1.232,84	-	0,011	146;155;164	165;166
168	P	95.455,11	161,26	591,92	0,124	-	-
169	P	1.284.025,13	874,80	1.467,80	0,130	168	-
170	P	332.553,27	147,57	2.253,50	0,122	169	-
171	P	828.303,98	534,98	1.548,28	0,082	-	-
172	C	-	1.262,08	-	0,007	167	170;171
173	P	243.256,56	689,20	352,95	0,237	-	-
174	P	594.285,01	972,40	611,15	0,114	173	-
175	C	-	541,88	-	0,015	172	174
176	P	886.808,72	756,86	1.171,69	0,033	-	-
177	P	178.593,42	415,23	430,11	0,024	-	-
178	P	175.514,23	394,92	444,43	0,068	177	-
179	C	-	274,12	-	0,011	175	176;178
180	P	631.235,37	719,08	877,84	0,019	-	-
181	P	203.227,00	378,90	536,36	0,048	180	-
182	P	1.573.469,64	2.143,56	734,04	0,031	-	-
183	C	-	403,81	-	0,007	179	181;182
184	P	289.444,51	894,92	323,43	0,032	-	-
185	P	80.059,12	461,96	173,30	0,119	184	-
186	P	166.276,64	700,23	237,46	0,050	-	-
187	C	-	402,58	-	0,007	183	185;186
188	P	326.394,88	394,63	827,09	0,347	-	-
189	P	591.205,81	315,16	1.875,92	0,184	-	-

190	P	914.521,49	705,42	1.296,43	0,142	-	-
191	C	-	831,93	-	0,113	188	189;190
192	P	1.130.065,28	745,60	1.515,65	0,149	-	-
193	P	1.284.025,13	732,72	1.752,42	0,020	-	-
194	C	-	1.383,92	-	0,041	191	192;193
195	P	514.225,89	529,85	970,50	0,149	-	-
196	P	1.296.341,91	1.446,69	896,08	0,038	-	-
197	C	-	689,97	-	0,014	194	195;196
198	P	2.355.585,66	617,89	3.812,29	0,011	-	-
199	P	1.946.052,47	632,56	3.076,49	0,019	-	-
200	C	-	2.691,61	-	0,013	197	198;199
201	P	1.342.529,87	908,30	1.478,07	0,019	-	-
202	P	1.976.844,44	1.210,95	1.632,48	0,012	-	-
203	P	514.225,89	536,29	958,86	0,043	202	-
204	P	126.247,07	559,61	225,60	0,152	203	-
205	C	-	1.034,06	-	0,023	-	201;204
206	P	1.145.461,26	425,28	2.693,41	0,045	-	-
207	P	2.257.051,36	2.161,56	1.044,18	0,031	-	-
208	P	132.405,47	330,62	400,47	0,272	207	-
209	C	-	1.382,59	-	0,023	205	206;208
210	P	360.266,04	693,64	519,39	0,030	-	-
211	P	720.532,09	862,77	835,14	0,039	-	-
212	P	1.511.885,70	639,22	2.365,22	0,200	211	-
213	C	-	299,92	-	0,017	209	210;212
214	P	264.810,94	548,61	482,69	0,027	-	-
215	P	286.365,32	557,37	513,78	0,097	-	-
216	P	215.543,79	569,15	378,71	0,176	215	-
217	C	-	429,40	-	0,007	213	214;216
218	P	591.205,81	577,85	1.023,11	0,036	-	-
219	P	1.136.223,67	727,22	1.562,43	0,059	-	-
220	P	1.243.995,57	1.011,33	1.230,05	0,122	219	-
221	C	-	1.146,57	-	0,003	217	218;220
222	P	625.076,98	308,04	2.029,21	0,123	-	-
223	P	323.315,68	494,44	653,90	0,071	-	-
224	C	-	755,48	-	0,016	200;221	222;223
225	P	197.068,60	222,91	884,06	0,018	-	-
226	P	1.259.391,55	1.336,86	942,05	0,108	-	-
227	C	-	817,30	-	0,009	224	225;226
228	P	936.075,87	939,55	996,30	0,069	-	-
229	P	1.173.174,04	720,96	1.627,23	0,178	-	-
230	C	-	1.552,25	-	0,008	187;227	228;229
231	P	206.306,20	127,98	1.612,06	0,219	-	-
232	P	560.413,84	562,26	996,73	0,043	231	-
233	P	452.641,95	430,34	1.051,84	0,177	-	-
234	C	-	768,58	-	0,008	230	232;233

Apêndice B

Elementos discretizados para a sub-bacia 01

Elemento	Tipo	Área (m ²)	Comprimento (m)	Largura (m)	Declividade (m/m)	Elementos Anteriores	Elementos Laterais
1	Plano	38.463,92	129,93	296,04	0,254	-	-
2	Plano	6.771,83	47,71	141,94	0,168	-	-
3	Plano	18.510,04	76,74	241,20	0,065	-	-
4	Canal	-	204,58	-	0,224	1	2;3
5	Plano	43.142,64	204,13	211,35	0,142	-	-
6	Plano	13.814,17	102,13	135,26	0,098	-	-
7	Plano	4.652,14	54,36	85,58	0,092	-	-
8	Canal	-	143,53	-	0,220	5	6;7
9	Plano	69.207,74	607,83	113,86	0,163	-	-
10	Plano	66.999,26	516,00	129,84	0,205	-	-
11	Canal	-	251,46	-	0,153	4;8	9;10
12	Plano	148.366,01	801,79	185,04	0,155	-	-
13	Plano	12.160,68	47,73	254,78	0,168	-	-
14	Canal	-	233,21	-	0,117	11	12;13
15	Plano	145.212,99	820,48	176,99	0,169	-	-
16	Plano	19.492,52	269,03	72,45	0,059	15	-
17	Plano	27.621,75	472,34	58,48	0,227	-	-
18	Plano	44.463,58	345,76	128,60	0,101	17	-
19	Canal	-	143,20	-	0,022	14	16;18
20	Plano	48.745,20	607,91	80,18	0,107	-	-
21	Plano	13.653,71	74,25	183,89	0,135	-	-
22	Plano	10.508,96	72,48	144,99	0,097	-	-
23	Canal	-	234,66	-	0,251	20	21;22
24	Plano	65.057,09	138,72	468,98	0,180	-	-
25	Plano	24.524,22	100,15	244,87	0,180	-	-
26	Plano	9.938,47	79,09	125,66	0,089	-	-
27	Canal	-	236,57	-	0,182	24	25;26
28	Plano	75.409,03	848,18	88,91	0,162	-	-
29	Plano	22.237,55	73,83	301,20	0,068	-	-
30	Canal	-	366,64	-	0,066	23;27	28;29
31	Plano	13.420,38	201,53	66,59	0,119	-	-
32	Plano	47.935,84	103,61	462,66	0,183	-	-
33	Plano	11.556,36	25,16	459,31	0,079	-	-
34	Canal	-	478,21	-	0,158	31	32;33
35	Plano	23.746,44	270,52	87,78	0,292	-	-
36	Plano	15.966,75	255,95	62,38	0,086	35	-
37	Plano	5.662,10	56,30	100,57	0,036	-	-
38	Canal	-	121,78	-	0,039	30;34	36;37
39	Plano	30.565,91	419,36	72,89	0,191	-	-
40	Plano	28.156,23	212,09	132,76	0,090	39	-
41	Plano	32.031,43	369,01	86,80	0,065	-	-
42	Canal	-	219,20	-	0,041	19;38	40;41

43	Plano	12.824,82	116,89	109,72	0,060	-	-
44	Plano	34.821,49	91,36	381,15	0,033	-	-
45	Plano	53.180,97	101,84	522,20	0,118	-	-
46	Canal	-	766,01	-	0,138	43	44;45
47	Plano	47.757,92	512,44	93,20	0,059	-	-
48	Canal	-	190,27	-	0,001	42;46	47
49	Plano	13.849,36	284,17	48,74	0,204	-	-
50	Plano	15.562,54	76,33	203,88	0,092	-	-
51	Plano	12.512,61	75,00	166,83	0,213	-	-
52	Canal	-	218,04	-	0,255	49	50;51
53	Plano	39.578,59	275,27	143,78	0,236	-	-
54	Plano	4.160,91	37,50	110,96	0,187	-	-
55	Plano	47.412,58	409,47	115,79	0,193	-	-
56	Canal	-	158,85	-	0,196	53	54;55
57	Plano	7.443,46	58,37	127,52	0,034	-	-
58	Canal	-	161,04	-	0,100	52;56	57
59	Plano	53.945,91	273,32	197,37	0,183	-	-
60	Plano	16.626,63	249,19	66,72	0,161	-	-
61	Plano	8.962,16	61,45	145,84	0,065	-	-
62	Canal	-	207,96	-	0,140	59	60;61
63	Plano	48.256,85	316,77	152,34	0,145	-	-
64	Plano	9.348,56	59,73	156,51	0,117	-	-
65	Plano	24.238,03	77,58	312,43	0,052	-	-
66	Canal	-	217,52	-	0,143	63	64;65
67	Canal	-	104,74	-	0,080	62;66	-
68	Plano	40.221,95	136,17	295,38	0,081	-	-
69	Canal	-	422,47	-	0,034	58;67	68
70	Plano	12.153,07	170,21	71,40	0,029	-	-
71	Canal	-	88,20	-	0,026	48;69	70
72	Plano	32.014,57	355,21	90,13	0,121	-	-
73	Plano	33.311,33	66,72	499,27	0,045	-	-
74	Plano	31.200,91	61,45	507,74	0,016	-	-
75	Canal	-	566,97	-	0,133	72	73;74
76	Plano	72.029,72	317,40	226,94	0,110	-	-
77	Plano	75.964,77	838,52	90,59	0,087	-	-
78	Canal	-	288,18	-	0,034	71;75	76;77
79	Plano	74.627,18	348,17	214,34	0,112	-	-
80	Plano	20.022,44	137,28	145,85	0,066	-	-
81	Plano	8.490,52	66,73	127,24	0,075	-	-
82	Canal	-	152,29	-	0,306	79	80;81
83	Plano	38.562,58	154,52	249,56	0,045	-	-
84	Plano	26.619,55	121,17	219,69	0,025	-	-
85	Canal	-	396,72	-	0,063	82	83;84
86	Plano	53.926,99	130,83	412,19	0,038	-	-
87	Plano	125.560,19	323,54	388,08	0,102	86	-
88	Plano	23.295,23	142,23	163,79	0,014	-	-
89	Plano	12.095,97	89,55	135,08	0,056	-	-
90	Canal	-	164,42	-	0,257	87	88;89
91	Plano	21.234,51	66,75	318,12	0,030	-	-

92	Plano	19.920,95	43,89	453,88	0,068	-	-
93	Canal	-	351,87	-	0,116	90	91;92
94	Canal	-	163,67	-	0,027	85;93	-
95	Plano	35.422,97	358,28	98,87	0,126	-	-
96	Plano	21.417,85	73,77	290,33	0,027	-	-
97	Plano	15.579,22	59,67	261,09	0,168	-	-
98	Canal	-	214,80	-	0,258	95	96;97
99	Plano	14.215,70	61,46	231,30	0,065	-	-
100	Plano	4.531,64	26,83	168,90	0,075	-	-
101	Canal	-	355,65	-	0,092	98	99;100
102	Plano	43.862,44	512,65	85,56	0,138	-	-
103	Canal	-	171,17	-	0,068	78;94;101	102
104	Plano	14.505,85	147,98	98,03	0,223	-	-
105	Plano	7.813,99	60,40	129,37	0,017	-	-
106	Plano	14.251,15	101,15	140,89	0,099	-	-
107	Canal	-	237,10	-	0,126	104	105;106
108	Plano	19.785,92	152,79	129,50	0,164	-	-
109	Plano	10.116,95	70,24	144,03	0,043	-	-
110	Plano	10.340,23	46,36	223,04	0,022	-	-
111	Canal	-	239,91	-	0,102	108	109;110
112	Plano	16.338,08	74,88	218,19	0,013	-	-
113	Canal	-	307,00	-	0,148	107;111	112
114	Canal	-	87,76	-	0,121	103	113
115	Plano	26.259,26	273,92	95,86	0,128	-	-
116	Plano	45.011,88	157,07	286,57	0,204	-	-
117	Canal	-	460,37	-	0,150	115	116
118	Plano	17.994,70	348,52	51,63	0,166	-	-
119	Plano	25.223,24	132,67	190,12	0,053	118	-
120	Plano	20.469,25	103,86	197,09	0,067	-	-
121	Canal	-	274,65	-	0,112	117	119;120
122	Plano	15.660,98	172,76	90,65	0,191	-	-
123	Plano	63.291,49	322,88	196,02	0,108	122	-
124	Canal	-	52,49	-	0,039	114;121	123
125	Plano	45.487,39	280,72	162,04	0,167	-	-
126	Plano	9.796,62	69,66	140,63	0,100	-	-
127	Plano	8.911,92	79,79	111,69	0,100	-	-
128	Canal	-	194,47	-	0,092	125	126;127
129	Plano	10.387,67	116,04	89,52	0,069	-	-
130	Plano	24.872,48	283,37	87,77	0,102	-	-
131	Canal	-	202,58	-	0,100	-	129;130
132	Canal	-	108,09	-	0,102	128;131	-
133	Canal	-	270,61	-	0,068	132	-
134	Plano	11.882,86	357,82	33,21	0,196	-	-
135	Plano	21.250,28	166,90	127,32	0,156	134	-
136	Plano	15.560,21	58,13	267,68	0,034	135	-
137	Plano	19.718,61	276,40	71,34	0,174	-	-
138	Plano	32.093,42	244,74	131,13	0,090	137	-
139	Plano	14.339,82	72,60	197,52	0,014	138	-
140	Canal	-	199,97	-	0,040	124;133	136;139

141	Plano	125.208,29	364,76	343,26	0,211	-	-
142	Plano	105.376,48	264,70	398,10	0,098	141	-
143	Plano	14.021,55	34,21	409,87	0,029	142	-
144	Plano	13.125,40	94,25	139,26	0,170	-	-
145	Plano	60.820,77	243,54	249,74	0,086	144	-
146	Plano	51.663,58	133,17	387,95	0,053	145	-
147	Canal	-	387,70	-	0,009	140	143;146