



Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano¹

**Valdemir P. Silva Jr.², Abelardo A. A. Montenegro², Tatiana P. N. Silva²,
Sergio M. S. Guerra² & Eduardo S. Santos²**

RESUMO

A erosão hídrica é um dos principais processos responsáveis pela degradação física dos solos, em particular em áreas semiáridas, susceptíveis a chuvas de alta intensidade e com limitada cobertura vegetal, principalmente nos períodos secos. O presente trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente as características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso, no semiárido pernambucano, no município de Pesqueira, PE. A bacia representativa do Riacho Mimoso apresentou respostas hidrológicas com altos picos de vazão, em seção de controle com regime hidrológico intermitente. A produção de descarga sólida em suspensão do Riacho Mimoso é elevada, tendo-se registrado concentrações de sedimentos de 10,91 e 0,91 t ha⁻¹ ano⁻¹, para os anos de 2009 e 2010, respectivamente.

Palavras-chave: descarga líquida, sedimentologia, descarga sólida

Production of water and sediments in a semiarid basin representative of Pernambuco

ABSTRACT

Water erosion is a major physical process responsible for soil degradation, particularly in semiarid areas, susceptible to high intensity rainfall and limited vegetation cover, especially during dry periods. This study aimed to experimentally evaluate the hydrossedimentological characteristics of Mimoso watershed, in the semiarid region of Pernambuco, in Pesqueira-PE. The representative Mimoso watershed presented high peak flows in a control section with intermittent hydrological regime. The suspended solid discharge production in the Mimoso Rivulet is high and the observed sediment concentrations was of 10.91 and 0.91 t ha⁻¹ yr⁻¹, for the years 2009 and 2010, respectively.

Key words: liquid discharge, sedimentology, solid discharge

¹ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor apresentada à UFRPE, com bolsa da FACEPE

² DTR/UFRPE, Rua Dom Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900, Recife, PE. Fone: (81) 3320-6273. E-mail: depaulajr22@yahoo.com.br; abelardo.montenegro@yahoo.com.br; tatyambiental@hotmail.com; smsguerra@hotmail.com.br; silfaufrpe@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Na busca por maiores produtividades tem ocorrido a expansão das áreas agrícolas, aumentando-se os processos de degradação ambiental, principalmente de água e solo (Torres et al, 2009).

Srinivasan et al. (2003) relatam que a vegetação permite a interceptação da chuva e o armazenamento da água precipitada aumentando, assim, a produção vegetal e reduzindo a erosão do solo. Em bacias hidrográficas com reduzida cobertura vegetal, parte das partículas da camada superficial do solo é transportada até os leitos dos rios e córregos, por ação das chuvas, onde se depositam, refletindo as condições físicas e de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica (Santos, 2009).

No que diz respeito à região semiárida do Brasil, Menezes et al. (2010) descrevem a marcante variabilidade anual e interanual da precipitação, além da sua variabilidade espacial. Segundo Achite & Ouillon (2007), a erosão do solo que ocorre nas vertentes das bacias hidrográficas reflete a ocupação do solo no ambiente semiárido e depende do comportamento espacial e temporal das chuvas nessa região. Machado & Vettorazzi (2003) descreveram que a variação temporal da produção de sedimentos está à mercê do escoamento o qual, por sua vez, depende do regime da precipitação.

Ainda segundo Verstraeten & Poesen (2001), as medições de cargas de sedimentos podem ser realizadas por vários métodos como, por exemplo, monitorando-se cargas de sedimentos em suspensão e as descargas volumétricas.

Achite & Ouillon (2007) descrevem que, para ambientes semiáridos, a carga de leito varia de 5 a 10% da carga de sedimento suspenso, este último de relevância ambiental.

Nearing et al. (2007) verificaram, investigando a produção de sedimentos no semiárido do Arizona, valores de 0,6 a 3,7 t ha⁻¹ ano⁻¹ com precipitações médias de 2.968mm e declividade média de 10 %; já na bacia do Rio Pirapama, em Pernambuco, com área de 67,87 km², Silva & Santos (2008) estimaram valores de produção total de sedimentos com concentrações entre 40 e 100 t ha⁻¹ ano⁻¹, para uma variação de chuva da ordem de 1.100 a 2.100 mm ano.

Analisando a relação chuva-vazão em sub-bacias utilizando estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) no Rio São Francisco, Pruski et al. (2004) encontraram valores de precipitação média na sub-bacia 40 de 1.386 mm e uma vazão específica média de longa duração de 17,19 L s⁻¹ km⁻² além de uma precipitação média na sub-bacia 46, de 1.040 mm, e a vazão específica média de 5,52 L s⁻¹ km⁻². Viola et al. (2009) constataram, em uma área de 2.094 km no Rio Aiuruoca, Minas Gerais, uma precipitação média de três dias de 211 mm, proporcionando uma vazão específica de 236,39 L s⁻¹ km⁻².

Torres et al. (2009) obtiveram, no Rio Uberaba, em uma área de 528 km², uma vazão média de 170,46 L s⁻¹, com a ocorrência de chuvas intensas na região, apresentando uma média de 205,4 mm.

Já Gonçalves et al. (2005) observaram máxima vazão no período de monitoramento de 464 L s⁻¹, em microbacia do Rio Grande do Sul com uma área de 5,25 km², que proporcionou transporte de sedimentos da ordem de 3,99 kg s⁻¹.

Montenegro & Ragab (2010) avaliaram o escoamento superficial na Bacia do Mimoso (mesma deste estudo), aplicando modelo hidrológico distribuído. Os autores destacam que a carência de medições de campo limita as previsões de escoamento, dificultando a adoção de estratégias de planejamento.

O objetivo deste trabalho foi avaliar, experimentalmente, a produção de escoamento e de sedimentos em uma bacia do semiárido de Pernambuco e investigar prováveis correlações entre as descargas líquidas e sólidas, considerando-se o cenário de uso e a ocupação existente na bacia.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A Bacia do Mimoso encontra-se inserida na Bacia Representativa do Alto Ipanema, que é uma das sub-bacias investigadas pela Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA). Pertence ao sistema do Rio Ipanema, em sua porção Ocidental mais a montante. Abrange parte dos municípios de Arcoverde e de Pesqueira, do Estado de Pernambuco, em uma área de 194,82 km², localizando-se entre 8° 34' 17" e 8° 18' 11" de Latitude Sul, e 37° 1' 35" e 36° 47' 20" de Longitude Oeste. Ao Norte faz limite com a bacia do Rio Ipojuca e, a Oeste, com a bacia do Rio Moxotó. A Figura 1 apresenta a rede de drenagem da bacia.

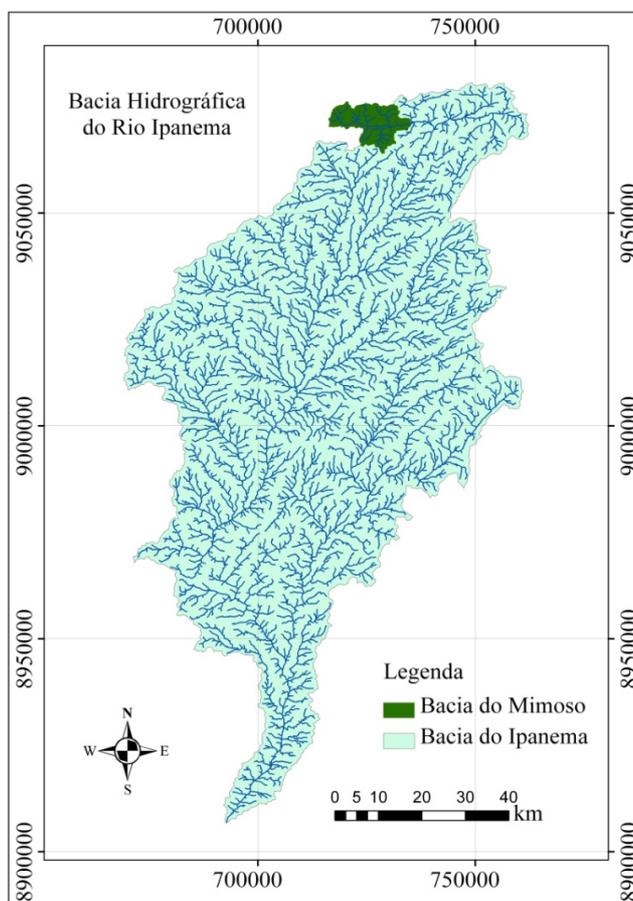


Figura 1. Bacia hidrográfica do Mimoso, localizada na Bacia do Ipanema

Uso do solo e características físico-hídricas da bacia do mimoso

As características de área, perímetro da bacia, comprimento do curso de água, as cotas máxima e mínima e a declividade do riacho, assim como a declividade da Bacia do Mimoso, foram determinados através do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), utilizando o programa ArcGis® 9.3. Para avaliação do uso e ocupação do solo da bacia foram utilizadas imagens de satélite (Figura 2) CBERS-2 (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), utilizando-se a composição das bandas 2, 3 e 4, com resolução espacial de 20 m.

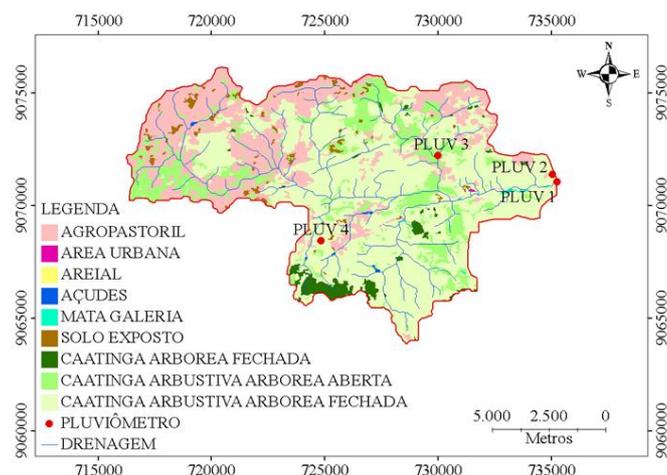


Figura 2. Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia do Mimoso e disposição dos pluviômetros

Segundo Montenegro & Montenegro (2006), a vegetação predominante é a caatinga hiperxerófila, com presença de cactáceas e bromeliáceas. A bacia do Riacho Mimoso é predominantemente rural, com áreas de caatinga arbórea fechada, bem como caatinga arbustiva arbórea fechada e aberta.

Predomina a agricultura de sequeiro, especialmente com ausência de práticas de conservação do solo, com áreas de agricultura irrigada em sua várzea e com criação de gado, caprinos e ovinos. Ressalta-se que, durante o período de seca, a vegetação possui a característica de perder suas folhas (*Caduciforme*), deixando grande parte do solo exposta à ação de precipitações erosivas, características das primeiras chuvas na região promovendo, assim, uma elevada produção de sedimentos. A Tabela 1 apresenta o uso do solo em relação ao percentual total da Bacia do Mimoso.

Tabela 1. Uso do solo e vegetação característica na Bacia do Mimoso-Pesqueira, PE

Segmento de uso	Área (km ²)	%
Açudes	0,000154	0,0001
Agropastoril	32,80	26,40
Área urbana	0,03	0,03
Areial	0,09	0,08
Mata de galeria	0,19	0,15
Solo exposto	1,91	1,50
Caatinga Arbórea fechada	3,00	2,50
Caatinga Arbustiva arbórea aberta	19,28	15,60
Caatinga Arbustiva arbórea fechada	66,90	53,80
Total	124,21	100,0

Para este estudo foram avaliados os índices morfométricos para caracterizar o potencial hidrológico da bacia. A forma da bacia influencia na geração do escoamento superficial e, em consequência, no hidrograma resultante de determinada chuva.

O tempo de concentração (T_c) da bacia foi calculado pela Equação de Hathaway (Eq. 1), de acordo com Ponce (1989):

$$T_c = \frac{0,606(L \cdot n)^{0,467}}{S^{0,234}} \quad (1)$$

em que:

T_c - tempo de concentração, h

L - comprimento da bacia em, km

n - fator de rugosidade promovido pela cobertura vegetal

S - declividade média do principal curso d'água, m m⁻¹

O valor de rugosidade adotado foi de 0,2 para bacia com cobertura vegetal escassa, com pequenas áreas de caatinga arbustiva arbórea (moderadamente descoberta) e com culturas de sequeiro no restante da área, além da criação extensiva de pequenos animais.

Medições hidrológicas e fluviométricas

A Bacia do Rio Mimoso está equipada com dois pluviômetros automáticos, modelo TB4-L Rain Gauge da Campbell Scientific, com resolução de 0,254 mm, um pluviômetro automático, modelo Raindataloger e um pluviômetro da Hidromec. No limite de jusante da bacia uma estação agrometeorológica automática registra precipitação, umidade, radiação solar, velocidade e direção do vento e temperatura do ar.

Para caracterização do escoamento superficial da bacia hidrográfica foi adotada uma seção de controle em trecho retilíneo do riacho, com a declividade e a largura aproximadamente uniformes e instalada uma estação fluviométrica automática, constituída de um sensor de nível de pressão (linígrafo) da Hidromec, colocado no leito do riacho e instalado em um poço tranquilizador.

Determinação das descargas líquida (Ql) e sólida (Qs)

Para determinação das variáveis hidráulicas de altura, vazão e velocidade do escoamento do Riacho Mimoso, foram realizadas campanhas de medição direta durante os anos de 2009 e 2010, contabilizando-se 22 eventos de descarga líquida. De maneira concomitante, foram realizadas amostragens para determinação do fluxo de sedimento suspenso baseado em sua concentração (C_{ss}), com o emprego de um amostrador de sedimentos (modelo DH-48).

O método de amostragem adotado foi o de obtenção de uma amostra simples por vertical, em que o objetivo é representar a concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) média para cada vertical, realizada pelo método de locação de verticais, chamado "Igual Incremento de Largura (IIL)".

Durante as campanhas de avaliação da descarga líquida do Riacho Mimoso a seção foi dividida em faixas verticais de 50 ou 100 cm de largura, variável em função da largura total da superfície livre no instante da avaliação, de acordo com os critérios propostos por Edwards & Glysson (1999).

Em cada vertical adotada na seção os valores de concentração foram determinados pela relação entre o peso do sedimento e o volume da amostra coletada, como indica a expressão seguinte (Eq. 2):

$$C_{SS} = \frac{P_{sed}}{Vol_{amostra}} \quad (2)$$

em que:

C_{SS} - concentração de sedimento em suspensão na vertical amostrada, $mg L^{-1}$

P_{sed} - peso do sedimento, MG

$Vol_{amostra}$ - volume da amostra, L

Para o cálculo da velocidade do escoamento na seção do Riacho Mimoso foi utilizado um molinete Hidromec, em conjunto com um contador de pulsos da hidrometria.

Produção da curva-chave

A partir das campanhas de medição direta referentes à altura do escoamento por evento e de sua respectiva descarga líquida, podem ser desenvolvidas relações entre altura e vazão locais (curva-chave). Uma segunda relação entre vazão e a descarga sólida em suspensão foi obtida com base nos registros de nível armazenados no datalogger e nas campanhas de medição de sedimentos.

Para extrapolação da vazão correspondente a registros do linígrafo superiores aos encontrados na campanha de medição direta, foi utilizada a equação de Manning (Eq. 3), após sua verificação com as medições experimentais. Para tal, estimou-se o coeficiente de rugosidade em função das características da seção, de acordo com Chow (1959) e os parâmetros geométricos (A , R_h e I) e hidráulicos (Q) de cada medição, das vinte e duas campanhas realizadas na seção do Riacho Mimoso. A equação de Manning pode ser expressa por:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (3)$$

em que:

Q - vazão, $m^3 s^{-1}$

n - coeficiente de rugosidade de Manning

A - área da seção transversal, (m^2)

R_h - raio hidráulico, m

I - declividade da linha de energia, $m m^{-1}$

De conformidade com Chow (1959), a faixa de rugosidade do leito se situa entre 0,042 e 0,045.

Descarga sólida em suspensão (Q_{SS}) e produção de sedimentos suspensos (Y_{SS})

Os valores de descarga sólida em suspensão (Q_{SS}) foram determinados pelo somatório do produto entre a concentração de sedimento suspenso (C_{SS}) e a respectiva descarga líquida (Q_l) de cada vertical, utilizando-se a equação proposta por Carvalho et al. (2000) (Eq. 4):

$$Q_{SS} = \sum \left(C_{SSi} \cdot Q_{li} \right) \cdot 0,0864 \quad (4)$$

em que:

Q_{SS} - descarga sólida em suspensão, $t dia^{-1}$

C_{SSi} - concentração de sedimento em suspensão da vertical, $mg L^{-1}$

Q_{li} - descarga líquida da respectiva vertical, $m^3 s^{-1}$

A produção de sedimento suspenso (Y_{SS}), para todo o ano, foi obtida pela expressão apresentada na Eq. 5:

$$Y_{SS} = \frac{Q_{SS} \cdot X}{A} \quad (5)$$

em que:

Y_{SS} - produção de sedimento suspenso, $t ha^{-1} ano^{-1}$

Q_{SS} - média da descarga sólida em suspensão, $t dia^{-1}$

X - número de dias do ano em que houve escoamento no riacho, registrados pelo linígrafo, $dias ano^{-1}$

A - área da bacia, ha

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físico-hídricas da bacia para o presente estudo estão apresentadas na Tabela 2; sua área é equivalente a 63% da área da Bacia Representativa do Alto Ipanema, inserida na rede REHISA.

Tabela 2. Características físico-hídricas da Bacia do Mimoso

Características	Valor
Área	12436 ha
Perímetro	65,10 km
Comprimento do curso de água principal	24,07 km
Coefficiente de compacidade (k_c)	1,63
Índice de conformação (F_i)	0,214
Cota máxima	995 m
Cota mínima	608 m
Declividade média da bacia	0,1109 $m m^{-1}$
Declividade média do riacho principal	0,0129 $m m^{-1}$
Densidade de drenagem	1,23 $km km^{-2}$
Ordem dos cursos de água	5ª ordem
Tempo de concentração: Fórmula de Hathaway	3,49 h

Verifica-se que a bacia hidrográfica do Rio Mimoso se mostra pouco susceptível a cheias em condições normais de precipitação pelo fato do coeficiente de compacidade apresentar-se afastado da unidade (1,63) e, quanto ao seu índice de conformação, exibir um valor baixo (0,214), indicando que a bacia não possui forma circular mas, sim, aproximadamente alongada.

A densidade de drenagem encontrada foi de 1,23 $km km^{-2}$. De acordo com Villela & Mattos (1975), esse índice pode variar de 0,5 $km km^{-2}$, em bacias com drenagem pobre a 3,5 $km km^{-2}$, ou mais, em bacias bem drenadas. Assim, a bacia do Rio Mimoso possui baixa capacidade de drenagem.

Tabela 3. Estatística da precipitação mensal dos quatro pluviômetros na bacia do Riacho Mimoso, para os anos de 2009 e 2010

Mês	Pluv.1	Pluv.2	Pluv.3	Pluv.4	\bar{X}	\tilde{X}	CV	σ^2
Jan/09	67,20	67,20	79,22	58,40	68,01	67,20	0,13	73,11
Fev/09	166,80	110,00	129,85	96,50	125,79	119,93	0,24	935,18
Mar/09	23,00	39,40	17,18	28,70	27,07	25,85	0,35	89,69
Abr/09	189,40	214,00	133,68	211,10	187,05	200,25	0,20	1386,19
Mai/09	286,60	292,00	226,08	408,00	303,17	289,30	0,25	5777,18
Jun/09	68,40	78,80	75,84	98,30	80,34	77,32	0,16	162,58
Jul/09	173,00	113,30	112,32	127,00	131,41	120,15	0,22	813,86
Ago/09	100,40	90,90	88,08	101,70	95,27	95,65	0,07	46,15
Set/09	4,80	2,70	3,60	2,40	3,38	3,15	0,32	1,16
Out/09	24,00	18,50	9,84	23,80	19,04	21,15	0,35	44,06
Nov/09	16,20	15,20	9,60	9,90	12,73	12,55	0,27	11,98
Dez/09	30,60	49,30	27,84	37,30	36,26	33,95	0,26	91,35
Jan/10	156,00	153,60	142,44	116,80	142,21	148,02	0,13	321,87
Fev/10	66,20	58,40	66,86	76,20	66,92	66,53	0,11	53,08
Mar/10	143,60	115,50	109,26	66,80	108,79	112,38	0,29	1006,71
Abr/10	203,80	192,80	210,21	234,70	210,38	207,01	0,08	314,61
Mai/10	5,80	5,80	13,25	28,70	13,39	9,53	0,81	116,54
Jun/10	213,40	187,00	212,31	237,00	212,43	212,86	0,10	417,11

\bar{X} - média; \tilde{X} - mediana; CV - coeficiente de variação; σ^2 - variância

Precipitação mensal da Bacia do Riacho Mimoso

As precipitações registradas nos quatro pluviômetros localizados na bacia nos anos de 2009 e 2010 (Tabela 3) apresentam coeficiente de variação de 0,07 a 0,98, podendo tal variação ser considerada alta.

Os valores de média e mediana são relativamente próximos, exceto para o mês de maio de 2010. O período chuvoso se desenvolve de janeiro a agosto enquanto o período seco, de agosto a dezembro.

Avaliação da descarga líquida (Ql) a partir das campanhas de medição direta e curvas-chave do riacho Mimoso

Os valores de descarga líquida (Ql) obtidos por determinação direta durante as 22 campanhas de avaliação no Riacho Mimoso, são apresentados na Tabela 4, juntamente com os valores de área e do perímetro da seção molhada em cada avaliação, estimados a partir do perfil levantado para a seção. Embora sejam observadas leves incertezas nas avaliações, verifica-se elevado coeficiente de determinação na regressão linear.

Na Figura 3 pode-se observar a relação entre a vazão medida e a vazão estimada por Manning (1) e a relação das vazões medidas e estimadas para vazões menores que $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. O valor de rugosidade médio de 0,042 adotado, propiciou ajuste adequado com os dados experimentais, com $R^2 = 0,98$ (1) e 0,82 (2).

O valor ajustado para a rugosidade de Manning é coerente com o valor proposto por Chow (1959), para características físicas da seção de estudo.

Na Figura 4 é apresentada a curva-chave da seção tendo-se estimado a maior vazão através da aplicação da equação de Manning, para a maior lâmina registrada pela estação fluviométrica, que foi de 190 cm.

Nas Figuras 5A e 5B, está representado o hidrograma do Riacho Mimoso em intervalos de registro diários. Verifica-se distribuição dos escoamentos do tipo sequência de picos simples e rápidos de vazão (Graf, 1988), entre abril e setembro de 2009, com longo período do ano sem escoamento,

Tabela 4. Valores de lâmina do escoamento (cm), área da seção molhada (m^2), perímetro molhado (m) e descarga líquida (Ql) do Riacho Mimoso, obtidos por determinação direta

Data	Lâmina do escoamento (cm)	Área da seção molhada (m^2)	Perímetro molhado (m)	Ql ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
01-jun-09	71,00	2,61	7,16	2,67
02-jun-09	74,00	2,79	6,21	2,32
22-jun-09	44,00	1,23	4,21	0,32
23-jun-09	42,00	1,14	4,20	0,32
23-jun-09	41,00	1,10	4,21	0,30
14-jul-09	40,00	1,05	4,15	0,31
15-jul-09	33,00	0,78	4,12	0,30
15-jul-09	32,00	0,74	4,12	0,36
16-jul-09	35,00	0,85	4,16	0,35
28-jul-09	32,00	0,74	4,12	0,19
28-jul-09	32,00	0,74	4,12	0,18
29-jul-09	30,00	0,67	3,73	0,16
12-ago-09	38,00	0,97	4,19	0,44
13-ago-09	40,00	1,05	4,07	0,41
26-ago-09	49,00	1,46	4,14	0,74
27-ago-09	32,00	0,74	4,17	0,37
08-set-09	16,00	0,15	1,69	0,04
09-set-09	18,00	0,18	1,67	0,06
19-abr-10	31,00	0,70	4,09	0,28
20-abr-10	31,00	0,70	4,08	0,30
28-jun-10	130,00	7,02	8,65	11,59
30-jun-10	68,00	2,44	8,59	1,80

característica dos rios de regiões áridas e semiáridas, evento que pode ser observado para o período de 2010 em que, devido à grande variabilidade temporal da chuva, só ocorrem picos de vazão nos meses de abril e junho.

Foram selecionados dez eventos representados na Figura 5A; Figura 5B, registrados pelo linígrafo de pressão (Tabela 5), e analisadas as médias das precipitações dos quatro pluviômetros localizados na bacia, tal como a chuva antecedente ao evento de escoamento.

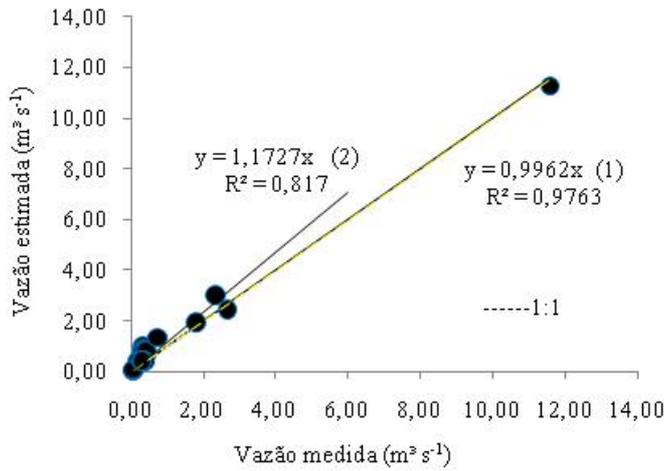


Figura 3. Relação entre as vazões medidas e estimadas no Riacho Mimoso, com os dados referentes às 22 campanhas de determinação direta. (1) Regressão para todos os pontos experimentais; (2) Regressão considerando apenas inferiores a $3\text{m}^3\text{ s}^{-1}$

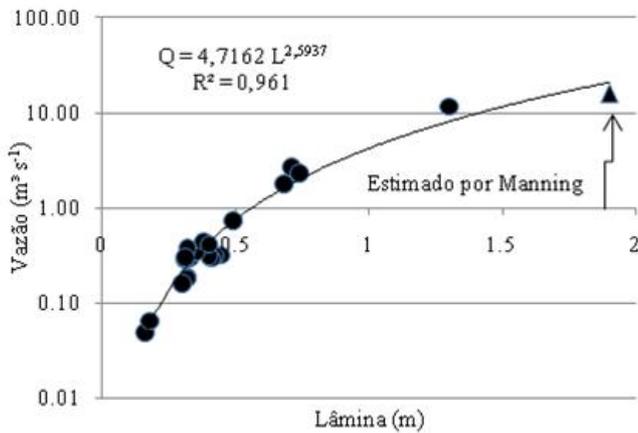


Figura 4. Curva-chave da seção de controle obtida entre as lâminas e as vazões do Riacho Mimoso, com o maior valor registrado pelo linígrafo calculado por Manning

No primeiro evento e mesmo apresentando uma precipitação antecedente de 52,05 mm, com duração de 105 min, não ocorreu qualquer resposta de picos de vazão tão alta, quando se compara ao segundo evento, com precipitação antecedente de 71,58 mm, em virtude da baixa umidade inicial do solo presente naquele momento, dando início, primeiro, ao umedecimento do

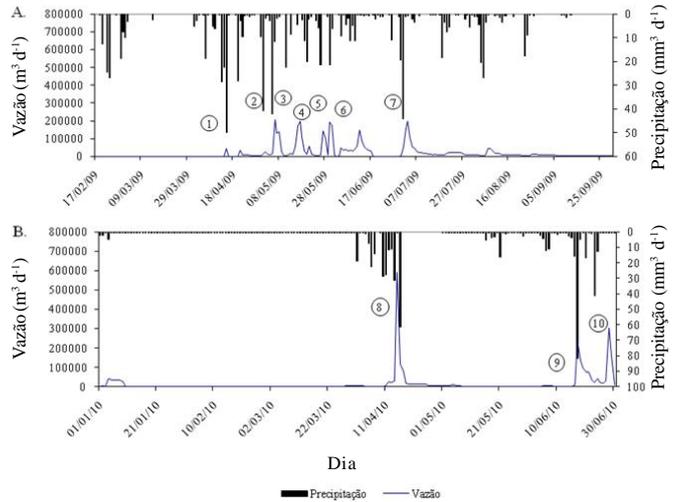


Figura 5. Hidrograma anual do Riacho Mimoso, semiárido pernambucano, no ano de 2009 e 2010, com os números representando a ordem do evento

solo e, posteriormente, à geração de escoamento.

Para o evento oito ocorreu a quarta precipitação média mais baixa entre os dez eventos porém com duração de 104,5 min e uma chuva antecedente de 87,26 mm, produzindo a maior vazão registrada.

De acordo com Silva et al. (2009), o problema da irregularidade pluviométrica no Nordeste do Brasil (NEB) resulta não só da variação dos totais pluviométricos mas, sobretudo, da duração e intensidade dessas precipitações. Segundo Lira et al. (2006), analisando as variações da precipitação nos municípios de Cabrobó, Garanhuns e Triunfo, em Pernambuco, as chuvas são bastante irregulares no tempo e com grande variabilidade temporal.

A precipitação média anual na Bacia do Mimoso foi de 1.061,88 mm, produzindo um volume total de escoamento de $4,2 \times 10^6\text{ m}^3$, para o ano de 2009; para os seis primeiros meses do ano de 2010 a precipitação total foi de 489,8 mm gerando, na seção de controle, um volume total escoado de $2,5 \times 10^6\text{ m}^3$. Vale ressaltar, para o ano de 2010, que a precipitação e o volume referidos nesse estudo correspondem aos meses de janeiro a junho.

Para melhor visualização da resposta hidrológica na Bacia do Mimoso, foi examinado um hidrograma para um evento (Figura 6), com precipitação de 54,10 mm e vazão de pico de

Tabela 5. Eventos registrados pelo linígrafo nos anos de 2009 e 2010

Eventos	Precipitação total média (mm)	Precipitação antecedente de 5 dias	Intensidade máxima (mm h^{-1})	Duração (min)	Lâmina de escoamento (mm)	Vazão de pico ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$)	Vazão total ($\text{m}^3\text{ d}^{-1}$)
1	18,55	52,05	9,7	105,0	0,36	1,76	45124,3
2	29,32	71,58	4,9	230,0	1,66	2,62	205944,5
3	1,79	33,09	3,6	3,3	1,60	1,09	198793,4
4	7,71	37,78	4,9	75,7	1,16	0,96	144575,4
5	24,96	46,52	10,2	106,3	1,54	2,12	191362,9
6	5,45	30,73	2,0	36,0	1,17	1,10	146061,9
7	3,12	61,09	2,6	13,0	0,86	1,25	107007,2
8	5,88	87,26	2,4	104,5	4,74	2,59	589041,9
9	18,82	10,78	6,0	232,5	1,90	0,69	236444,9
10	12,50	50,66	2,6	284,0	2,45	1,47	304084,9

14,10 m³ s⁻¹, registrados pelo linígrafo programado com intervalos de 5 min.

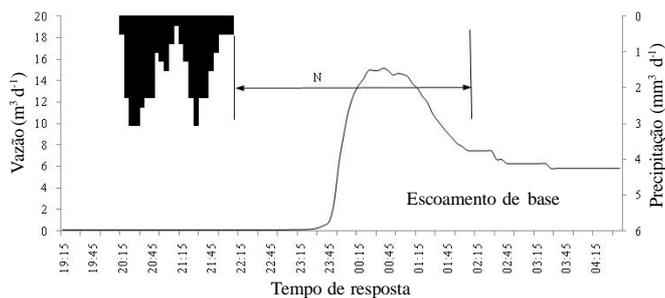


Figura 6. Hidrograma do evento ocorrido entre os dias 05/05/2009 e 06/05/2009, no Riacho Mimoso, com registros a cada 5 min

Analisando-se ainda o hidrograma é possível verificar as relações entre as características físico-hídricas da bacia com sua resposta hidrológica.

O tempo de concentração da bacia (Tc), calculado pela equação (04) proposta por Hathaway, foi de 3,49 horas. Pela aplicação do método de divisão do escoamento denominado base fixa (Chow et al., 1988), o tempo de concentração (Tc) é dado pelo intervalo de tempo entre o final da chuva e o ponto de inflexão na recessão do hidrograma representado pela reta N da Figura 6; com isto se obtém um tempo de concentração da bacia do Riacho Mimoso de 3,35 h. Este valor de tempo de concentração é similar ao obtido pela equação de Hathaway, de aproximadamente 3,49 h.

Avaliação sedimentométrica do Riacho Mimoso

Na Tabela 6 são exibidos os valores de concentração instantânea de sedimento suspenso (C_{ss}) e descarga de

Tabela 6. Vazão (Ql), concentração instantânea de sedimento suspenso (C_{ss}) e descarga de sedimento em suspensão (Q_{ss}), das campanhas de medição direta no Riacho Mimoso

Dia	Vazão (m ³ s ⁻¹)	C _{ss} (mg L ⁻¹)	Q _{ss} (t d ⁻¹)
01-jun-09	2,668	444,53	102,48
02-jun-09	2,319	282,66	56,62
22-jun-09	0,316	178,96	4,88
23-jun-09	0,316	167,06	4,56
23-jun-09	0,296	154,05	3,95
14-jul-09	0,315	172,08	4,68
15-jul-09	0,299	63,85	1,65
15-jul-09	0,363	292,06	9,16
16-jul-09	0,349	65,84	1,99
28-jul-09	0,187	134,78	2,17
28-jul-09	0,183	159,94	2,53
29-jul-09	0,162	135,50	1,90
12-ago-09	0,443	64,83	2,48
13-ago-09	0,411	58,97	2,10
26-ago-09	0,739	59,16	3,78
27-ago-09	0,376	351,85	11,43
08-set-09	0,049	108,93	0,46
09-set-09	0,065	168,67	0,94
19-abr-10	0,284	149,04	3,66
20-abr-10	0,299	150,21	3,89
28-jun-10	11,590	550,10	550,84
30-jun-10	1,799	335,63	52,17

sedimento em suspensão (Q_{ss}), com as respectivas vazões (Q_{li}) das amostragens realizadas durante as campanhas de medição direta, nos anos de 2009 e 2010.

Os valores de concentração instantânea de sedimentos suspensos dos eventos de descarga, amostrados no ano de 2009 e 2010, variaram entre 58,97 e 550,10 mg L⁻¹, com um valor médio de 212,43 mg L⁻¹. As vazões máximas escoadas nesses eventos foram de 0,049 m³ s⁻¹ a 11,59 m³ s⁻¹. Com isto, as concentrações de sedimentos em suspensão podem ser consideradas de baixa a muito alta, com uma concentração média sendo considerada alta, conforme classificação proposta por Lima et al. (2003). Segundo esses autores, a concentração de sedimentos em suspensão inferior a 50 mg L⁻¹ é considerada muito baixa, de 50 a 100 mg L⁻¹; baixa, de 100 a 150 mg L⁻¹; moderada de 150 a 300 mg L⁻¹ alta e, acima de 300 mg L⁻¹, muito alta.

A Figura 7 mostra o comportamento da concentração instantânea de sedimento suspenso e da vazão nos períodos amostrados durante as estações chuvosas de 2009 e 2010, evidenciando-se a elevada variação temporal em função dos eventos pluviométricos, da cobertura vegetal e das características físicas da bacia. De todo modo, a maioria das amostragens foi realizada em períodos em que a vazão estava com valores inferiores aos máximos registrados pelo linígrafo, tendo-se amostrado apenas um evento com um valor de máxima.

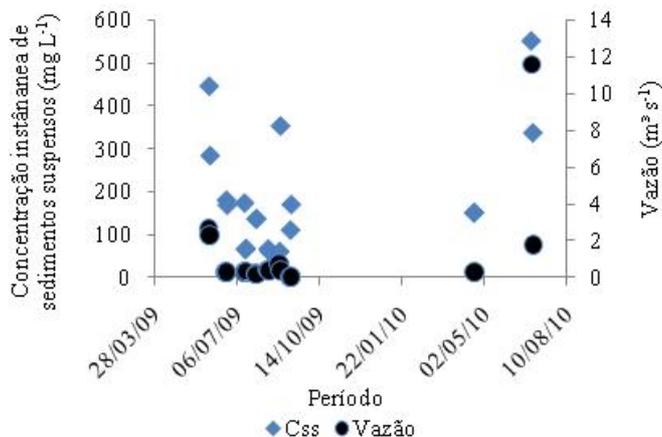


Figura 7. Concentração instantânea de sedimento suspenso (C_{ss}) e vazão do Riacho Mimoso, durante o período chuvoso dos anos de 2009 e 2010, amostrados nas campanhas de medição direta

Alexandrov et al. (2003) obtiveram, em uma região árida de Israel, valores de concentração de sedimento suspenso variando de 15,50 até 187,00 mg L⁻¹, para vazões de 0,24 até 84,4 m³ s⁻¹, monitorando uma bacia de 112 km². Bollmann & Marques (2001) obtiveram, em uma bacia do Rio Cachoeiras no Paraná, valores de vazão média de 140 L s⁻¹, representando uma descarga sólida de 3,6 ton ha⁻¹ ano⁻¹, considerada baixa.

Para melhor compreensão do comportamento da concentração de sedimentos, investigou-se a possível correlação entre vazão líquida e sólida; para o total de 22 eventos encontrados na Tabela 3 e para o maior ponto registrado pelo linígrafo, obteve-se a equação da curva-chave de sedimentos (Q_{ss}) para a seção em estudo (Figura 8), com coeficiente de determinação superior a 90%.

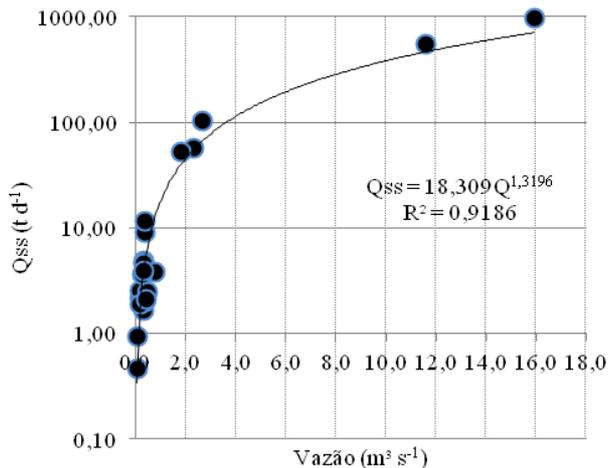


Figura 8. Curva-chave de sedimento (Q_{ss} x Q) para a seção do Riacho Mimoso

Através da equação da curva-chave de sedimentos suspensos obtida, fez-se a transformação da série de vazão do período em estudo de 2009 e 2010 em descarga de sedimentos em suspensão, com intervalos a cada 5 min. Foram estimados valores de descarga sólida em suspensão entre um mínimo de $0,063 \text{ t d}^{-1}$ e um máximo de $954,38 \text{ t d}^{-1}$, para o ano de 2009, e um mínimo de $0,118 \text{ t d}^{-1}$ e um máximo de $908,2 \text{ t d}^{-1}$, em 2010.

As produções de descarga sólida em suspensão do Riacho Mimoso foram de $10,91 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $0,91 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, para os anos de 2009 e 2010, respectivamente. De acordo com a classificação de produção de sedimentos, proposta por Carvalho et al. (2000), a bacia do Riacho Mimoso pode ser classificada como apresentando alta produção de sedimentos, acima de $1,75 \text{ t ha}^{-1}$. Machado & Vettorazzi (2003) observaram, em uma microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, afluente do Rio Piracicaba, em uma área de $59,73 \text{ km}^2$, uma produção de sedimentos de aproximadamente $1,3 \text{ t ha}^{-1}$. Paranhos & Paiva (2008) avaliaram a produção de sedimentos na bacia Menino de Deus II no Rio Grande do Sul, com uma área de $5,03 \text{ km}^2$, e obtiveram valores médios de vazão e descarga sólida em suspensão de $4,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $979,93 \text{ t d}^{-1}$, respectivamente. Adicionalmente, Lima Neto et al. (2011) avaliaram a produção total média de sedimentos de $1,48 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em uma bacia do semiárido brasileiro, com uma densa rede de reservatórios e área de 20.000 km^2 , para um período de 25 anos.

CONCLUSÕES

1. A Bacia do Mimoso apresentou um tempo de concentração de cerca de 3,50 h, com vários eventos de escoamento e picos de vazão e hidrogramas com elevados picos de vazão, com valor mínimo de $0,049 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e máximo de $11,59 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, correspondendo a uma produção de sedimentos de $0,46$ e $550,84 \text{ t d}^{-1}$.

2. A bacia se encontra, durante o período de estiagem, naturalmente desprotegida devido à vegetação típica da região e às chuvas torrenciais, fatores que promovem uma elevada produção de sedimentos, indicando a grande necessidade de adoção de práticas conservacionistas para a região.

AGRADECIMENTOS

À UFRPE, pelo apoio institucional; à Finep (Projeto BEER) e ao CNPq, pelo financiamento da pesquisa, e à FACEPE, pela concessão da bolsa

LITERATURA CITADA

- Achite, M.; Ouillon, S. Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973–1995). *Journal of Hydrology*, v.343, p.187-202, 2007.
- Alexandrov, Y.; Laronne, J. B.; Reid, I. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. *Journal of Arid Environments*, v.53, p.73-84, 2003.
- Bollmann, H. A.; Marques, D. M. Gestão ambiental integrada de bacias hidrográficas: Bacia do Rio Cachoeiras – São Mateus do Sul – PR. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.6, p.45-65, 2001.
- Carvalho, N. O.; Filizola Júnior, N. P. F.; Santos, P. M. C.; Lima, J. E. F. W. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília: ANEEL, 2000. 132p.
- Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W. Applied hydrology. New York: McGraw-Hill, 1988. 572p.
- Chow, V. T. Open channel hydraulics. New York: McGraw-Hill, 1959. 608p.
- Edwards, T. K.; Glysson, G. D. Field methods for measurement of fluvial sediment. In: Techniques of water-resources investigations of the U. S. geological survey (USGS). Reston: USGS, 1999. 118p.
- Gonçalves, C. S.; Rheinheimer, D. S.; Pellegrini, J. B. R.; Kist, S. L. Qualidade da água numa microbacia hidrográfica de cabeceira situada em região produtora de fumo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.391-399, 2005.
- Graf, W. L. Fluvial processes in dryland rivers. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 346p.
- Lima, J. E. F. W.; Santos, P. M. C.; Carvalho, N. O.; Silva, E. M. Fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba. Anais... ABRH, 2003. CD Rom.
- Lima Neto, I. E.; Wiegand, M. C.; Araujo, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. *Hydrological Sciences Journal*, v.56, p.319-333, 2011.
- Lira, V. M.; Oliveira, F. M.; Dantas, R. T.; Souza, W. M. Alteração da precipitação em municípios do Estado de Pernambuco. *Revista Engenharia Ambiental*, v.3, p.52-61, 2006.
- Machado, R. E.; Vettorazzi, C. A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.735-741, 2003.
- Menezes, H. E. A.; Brito, J. I. B.; Lima, R. A. F. A. Veranico e a produção agrícola no Estado da Paraíba, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.181-186, 2010.

- Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.30-37, 2006.
- Montenegro, A. A. A.; Ragab, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. *Hydrological Processes*, v.24, p.2705-2723, 2010.
- Nearing, M. A.; Nichols, M. H.; Stone, J. J.; Renard, K. G.; Simanton, J. R. Sediment yields from unit-source semiarid watersheds at Walnut Gulch. *Water Resources Research*, v.43, p.6426-6436, 2007.
- Paranhos, R. M.; Paiva, J. B. D. Avaliação de metodologia de estimativa de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural de encosta. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.13, p.7-18, 2008.
- Ponce, V. M. *Engineering hydrology. Principles and practices*. Inc. New Jersey: Prentice-Hall, 1989. 640p.
- Pruski, F. F.; Pereira, S. B.; Novaes, L. F.; Silva, D. D.; Ramos, M. M. Precipitação média anual e vazão específica média de longa duração, na Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, p.247-253, 2004.
- Santos, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.2, p.1-19, 2009.
- Silva, L. L.; Costa, R. F.; Campos, J. H. B. C.; Dantas, R. T. Influência das precipitações na produtividade agrícola no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.454-461, 2009.
- Silva, R. M.; Santos, C. A. G. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.520-526, 2008.
- Srinivasan, V. S.; Santos, C. A. G.; Galvão, G. O. Erosão hídrica do solo no semi-árido brasileiro: A experiência na bacia experimental de Sumé. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, p.57-73, 2003.
- Torres, J. L. R.; Fabian, A. J.; Amaral, F. S.; Silva Sobrinho, J. B. F.; Loes, L. F. C. A deterioração da ambiência numa microbacia da área de proteção ambiental do Rio Uberaba. *Global Science Technology*, v.02, p.07-21, 2009.
- Verstraeten, G.; Poesen, J. Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. *Geomorphology*, v.40, p.123-144, 2001.
- Viola, R. M.; Mello, C. R.; Acerbi Júnior, F. W.; Silva, A. M. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.581-590, 2009.
- Villela, S. M.; Mattos, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.