

AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO MODELO KINEROS2 PARA DIFERENTES REPRESENTAÇÕES DA BACIA HIDROGRÁFICA

Laércio Leal dos Santos¹, Vajapeyam S. Srinivasan², Ricardo de Aragão³, Philipe Jarryer de Miranda Ribeiro⁴

RESUMO – As atividades humanas têm modificado os processos hidrossedimentológicos em todo o planeta, principalmente em regiões semi-áridas. Essas regiões tem sido alvo de constantes desmatamentos, o que favorece o processo de erosão e escoamento superficial, causando também o empobrecimento do solo levando-o a infertilidade. A utilização de modelos hidrossedimentológicos torna-se imprescindível para avaliar as conseqüências destes processos com as mudanças no uso da terra. Os modelos necessitam uma representação discreta da bacia como elementos de planos e de canais e este processo terá uma certa influência sobre os parâmetros calibrados e nos resultados simulados. O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência dessas representações nos valores dos parâmetros calibrados, bem como, verificar a variabilidade nos resultados simulados pelo modelo KINEROS2 conforme o número de elementos adotados. Uma Sub-Bacia do semi-árido nordestino de 39 ha, localizado na Bacia Experimental de São João do Cariri foi submetido à modelagem com KINEROS2, com quatro alternativas diferentes de representação. Os resultados mostram que a forma de discretização da bacia tem uma influência significativa a nível individual de eventos, mas, na estimativa dos valores médios anuais do escoamento superficial gerado e a produção de sedimentos, a influência diminui.

ABSTRACT – The activities of man modify the natural processes of runoff and erosion and in particular, within the semiarid regions where an acceleration in the runoff and erosion processes would be detrimental. Excessive erosion will lead to the loss of soil fertility and diminishing productivity of crops. Estimates of runoff and erosion obtained from a modeling process would be very important in the planning process and in the evaluation of land use changes. Most of the models require a representation of the basin in the form of discreet elements like planes and channels and the number of elements utilized or the form of representation will have an influence on the outcome of the model results. In this paper, four different alternatives of representing a sub-basin of 39 ha, located within the Experimental Basin of São João de Cariri were employed with the model KINEROS2. The paper treats the influence of the type of representation of the basin over the calibrated parameters as well as the annual yields. The results show that the influence is notable for individual events that are simulated, but the influence diminishes on the annual scale.

Palavras-chave: Discretização, Produção de sedimentos, Escoamento superficial.

1) Aluno do PPGECA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande –UFCG, Av. Aprígio Veloso, 808, Campina Grande, Paraíba, 58109-970, Fax: (083)310-1388, E-mail: laercioeng@yahoo.com.br

2) Professor da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Av. Aprígio Veloso, 808, Campina Grande, Paraíba, 58109-970, Fax: (083)310-1388, E-mail: vajapeya@dec.ufcg.edu.br

3) Professor da Universidade Federal de Sergipe, SE, Av. Marechal Rondon, s/n Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, SE, 49100-000. e-mail: ricardoaragao@ufs.br

4) Aluno de graduação do Pibic da Universidade Federal de Campina Grande -UFCG. E-mail: philipe.jarryer@gmail.com

1 – INTRODUÇÃO

A modelagem do processo de escoamento superficial e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas têm sido cada vez mais utilizada nos últimos anos dada à possibilidade de poder caracterizar, através dos seus resultados, os impactos que as mudanças climáticas e as ações antrópicas têm exercido sobre o meio ambiente. Neste fim, vários modelos têm sido desenvolvidos (Singh, 1995; Figueiredo, 1998), mas os modelos que se baseiam nos processos físicos, têm recebido uma maior atenção e preferência, devido ao fato que, na sua concepção, procurou-se representar através de equações diferenciais os processos físicos o mais próximo possível da realidade.

Os modelos de base física, principalmente aqueles que simulam os processos da erosão pela chuva, são ferramentas muito úteis para os tomadores de decisão e órgãos gestores, visto que uma vez parametrizados, os modelos poderão ser utilizados para a previsão de escoamento superficial e a produção de sedimentos devido a um evento de precipitação, o que auxiliaria na gestão de corpos de água. Além disso, os processos hidrossedimentológicos são variáveis no espaço e isto é levado em consideração na concepção destes modelos.

Sabe-se que, em condições naturais, os rios desagregam e também transportam sedimentos vindo das vertentes, mas a pressão antrópica tem elevado sobremaneira a oferta de material a ser transportado. Além da remoção de nutrientes da superfície do solo durante a precipitação também ocorre à remoção e o transporte de defensivos agrícolas e fertilizantes. Estes comprometerão a qualidade dos corpos de água, exigindo massivos investimentos no tratamento da água para consumo. Por outro lado, a presença de grandes cargas de sedimentos nos corpos de água diminui a seção da calha dos rios e reduz o volume útil a ser armazenado nos reservatórios.

Em regiões semi-áridas, onde os recursos hídricos são escassos, o maior conhecimento das disponibilidades destes recursos é necessário para o desenvolvimento sócio-econômico. Este conhecimento adicional poderá ser obtido através da aquisição de dados hidrossedimentológicos ou através da estimativa destes via o emprego de modelos hidrossedimentológicos, sendo estes ferramentas propícias para serem aplicadas nesta região. Entretanto, os modelos só fornecerão uma resposta confiável se existem dados confiáveis para a sua parametrização. Além disso, dada a maneira como os modelos são concebidos, os parâmetros variam com a escala da bacia, com o tempo e com a forma da representação da bacia para o modelo (Lopes e Canfield, 2004).

Em se tratando de dados observados, são necessários recursos humanos e financeiros para instalação de equipamentos e coleta de dados por pessoal capacitados para tal fim, o que nem sempre é possível para grandes bacias, principalmente na região semi-árida do nordeste do Brasil. Para estreitar esta lacuna, tem sido incentivada a instalação de bacias experimentais e representativas de uma grande região (Srinivasan et al. 2004). Assim, através de uma função de

transferência, os resultados obtidos nas escalas menores poderão ser transpostos para as escalas maiores e não monitoradas.

Tomando-se por base o acima exposto, o objetivo do presente trabalho é verificar o desempenho do modelo KINEROS2 (Smith et al., 1995) na modelagem dos processos chuva-vazão-erosão em uma sub-bacia de 39 ha, instalada no semi-árido paraibano, como também analisar a da forma da representação ou discretização desta bacia sobre as respostas do modelo.

2 – O MODELO KINEROS2

O modelo KINEROS2 (Kinematic .Runoff Erosion model) proposto por Smith et al. (1995) é uma versão melhorada do modelo KINEROS (Woolhiser, 1990), baseia-se na física dos processos de infiltração, escoamento superficial e erosão que ocorrem nas vertentes e nos rios. A bacia é representada para o modelo através de um conjunto de planos retangulares e de elementos canais trapezoidal, com os planos contribuindo para os canais com fluxo lateral ou na sua entrada de montante. Os elementos canais poderão receber fluxo proveniente de um ou mais canais na sua extremidade de montante. Por ser distribuído, cada elemento, plano ou canal, poderá ter um conjunto de parâmetros que o caracteriza e que podem ser únicos. O modelo utiliza a equação de Saint Venant com a simplificação da onda cinemática para a propagação do escoamento superficial unidimensional nos planos e nos canais. Este escoamento é dito Hortoniano onde o processo de infiltração é modelado para uma chuva não permanente através do modelo de Smith e Parlange (1978). Neste modelo, os parâmetros mais importantes são a saturação inicial, S_i , a condutividade hidráulica saturada, K_s , e o parâmetro do potencial efetiva de capilaridade G .

O processo erosivo sobre os planos ocorre devido a dois mecanismos independentes que são o impacto das gotas de chuva (e_s) e a desagregação e transporte pelo fluxo superficial (e_h). A desagregação causada pelas gotas de chuva é modelada através da relação entre profundidade do fluxo, intensidade da chuva e coeficientes que refletem a lâmina presente (C_h) e a erosividade da chuva (C_f). Por outro lado, a erosão causada pelo fluxo superficial leva em consideração a capacidade que o fluxo possui de erodir e transportar a carga erodida. Caso não haja capacidade para tal haverá a deposição do excesso desagregado e em movimento. No modelo KINEROS2, a erosão hidráulica é simulada através da aplicação da equação modificada de Engelund e Hansen (Smith et al., 1995) com a inclusão de um limite crítico do valor da potência unitária do fluxo $\Omega = uS$ (Unit Stream Power) igual a 0,004 m/s, para calcular a capacidade de transporte do fluxo. A erosão e as equações de fluxo são resolvidas numericamente a cada passo de tempo e para cada classe de partícula. Uma vez em movimento, os sedimentos chegam ao leito do canal através da alimentação na extremidade de montante ou através de uma distribuição lateral.

Sendo assim:

$$e = e_s + e_h \quad (1)$$

$$e_s = C_f \text{EXP}(-C_h i^2) \quad (2)$$

$$e_h = C_g (C_m - C_s) A \quad (3)$$

$$C_m = (0,05 / (d(S_s - 1)^2)) (\Omega - 0,004) \sqrt{(Sh/g)} \quad (4)$$

onde i é a intensidade da precipitação (m/s); C_f é um coeficiente relacionado às propriedades do solo e da superfície e deve ser determinado experimentalmente ou por calibração; $\text{EXP}(ch^2)$ é um fator que representa a redução na erosão por impacto das gotas de chuva devido ao aumento da lâmina d'água; C_h representa a efetividade do amortecimento da superfície da água, assumido igual a 656; C_m é a concentração de equilíbrio na capacidade de transporte; $C_s = C_s(x,t)$ é a concentração real de sedimentos no fluxo; C_g é um coeficiente da taxa de transferência de sedimentos (s^{-1}); g é a aceleração da gravidade (m/s^2), S_s é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65; d é o diâmetro do sedimento (m), h é a profundidade do fluxo (m).

2.1 – Os parâmetros do modelo

O modelo KINEROS2 possui um conjunto de equações que representam os processos hidrossedimentológicos e estas, por sua vez, possuem vários parâmetros que precisam ser determinados antes das simulações.

Trabalhos anteriores, realizados com o modelo KINEROS2 (Smith e Quinto, 2000; Lopes, 2003, Lopes et al., 2004; Srinivasan et al., 2006) mostram que existe uma grande sensibilidade da resposta do modelo (lâmina e produção de sedimentos) aos seguintes parâmetros: S_i (saturação inicial relativa - $\theta = \phi S_i$), K_s (condutividade hidráulica saturada), G (potencial de capilaridade), n (coeficiente de Manning), C_f (coeficiente relacionado às propriedades do solo e da superfície) e, C_g (coeficiente da taxa de transferência de sedimentos). Por ser um modelo que simula eventos individuais, KINEROS2 não considera a evaporação e a variação da umidade do solo anterior ao evento (com a exceção da simulação contínua), e portanto nas simulações por evento, este parâmetro deverá ser estimado ou calibrado. Os outros parâmetros citados poderão ser também estimados com base em características da bacia (Lopes e Canfield, 2004) ou calibrados.

3 – A ÁREA DE ESTUDO

A sub-bacia utilizada no presente trabalho tem uma área de 39 ha e esta inserida na área da Bacia Experimental de São João do Cariri (BESJC), localizada no cariri paraibano (7°25' S, 36°30' O) a 196 km de João Pessoa e é parte do semi-árido nordestino. A BESJC tem uma área de 14 km² (Figura 1) e seu curso principal é o Riacho Namorados. A bacia foi instalada com a finalidade de

servir de base para os estudos sobre hidrologia de regiões semi-áridas, desenvolvidos pela área de Engenharia de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Campina Grande (antes UFPB-Campus II). Inicialmente, em 1985, foi instalada uma estação climatológica e duas seções de medição em dois tributários do curso principal, o Riacho Namorados (nas sub-bacias 1 com 59 ha, e na sub-bacia 2 com 39 ha). Nestas, linígrafos registram a variação de nível de água que passa pelos vertedores, sendo um, vertedor triangular de soleira espessa (SB1) e outro vertedor triangular na parte inferior combinado com um retangular na parte superior (SB2).

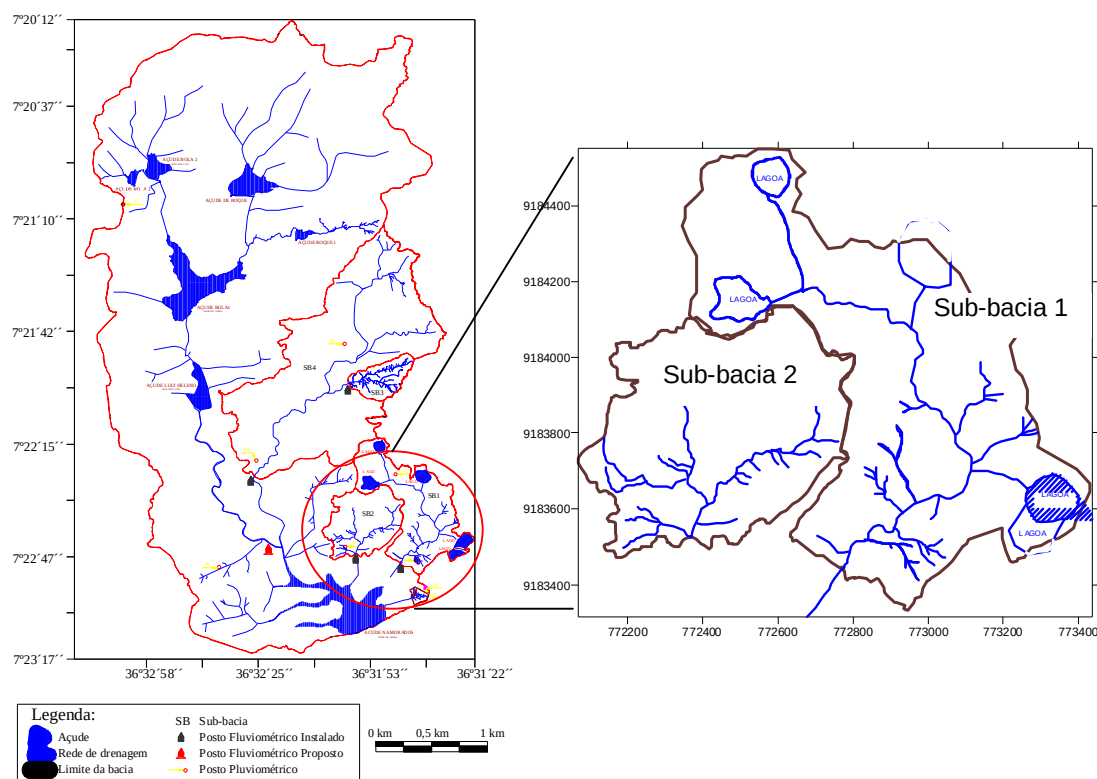


Figura 1 – Mapa da BESJC com os detalhes das Sub-bacias 1 e 2

A média pluviométrica anual fica em torno de 400 mm. A temperatura média anual é de 25 °C. A umidade relativa média anual é de 70,6% e a insolação média é em torno de 7,7 horas por dia. O monitoramento das condições climáticas foi efetuado inicialmente por uma estação climatológica convencional. Posteriormente, em 2000, com o objetivo de estudar a variabilidade espaço temporal da precipitação e dos processos hidrossedimentológico em diferentes escalas na área da bacia, foram instaladas duas parcelas de erosão (P1 e P2), três micro-bacias (0,5 a 1,8 ha), duas outras sub-bacias (sub-bacia 3 – 19 ha, sub-bacia 4 – 200 ha), pluviômetros automáticos e uma estação climatológica automática.

3.1 - Dados utilizados

No presente trabalho foram utilizados dados sobre escoamento superficial e produção de sedimentos coletados nas parcelas de erosão de 100 m² e na sub-bacia 2. Para as parcelas 179 eventos foram registrados até 2007. Em relação às sub-bacias, o monitoramento do fluxo sobre os vertedores tem sido feito desde 1987, o que resultou no registro de dados de 87 eventos para a sub-bacia de 59 há (SB1) e 91 eventos para a sub-bacia de 39 ha (SB2). A SB2 possui o divisor de água em comum com a SB1. Contudo, mesmo sendo vizinhas, possuem características fisiográficas e de cobertura vegetal bastante diferente, visto que a SB2 possui uma cobertura nativa bastante preservada, enquanto que parte da área da SB1 foi desmatada ou possui rocha aflorante. Os dados climatológicos utilizados no presente estudo são oriundos da estação climatológica convencional (1985-2003) e da estação climatológica automática (2003-2007), cobrindo um período de 22 anos.

A metodologia utilizada para obtenção da informação de sedimento produzido na SB2 foi à da medição volumétrica do sedimento a montante do vertedor composto (triangular+retangular) e determinar o peso seco das diversas amostras volumétricas coletadas. Nestas condições, a partir de janeiro de 2004 até 2007, informação sobre sedimentos produzidos em 22 eventos para SB2 tem sido registrado.

4 - DISCRETIZAÇÃO DA BACIA E CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS

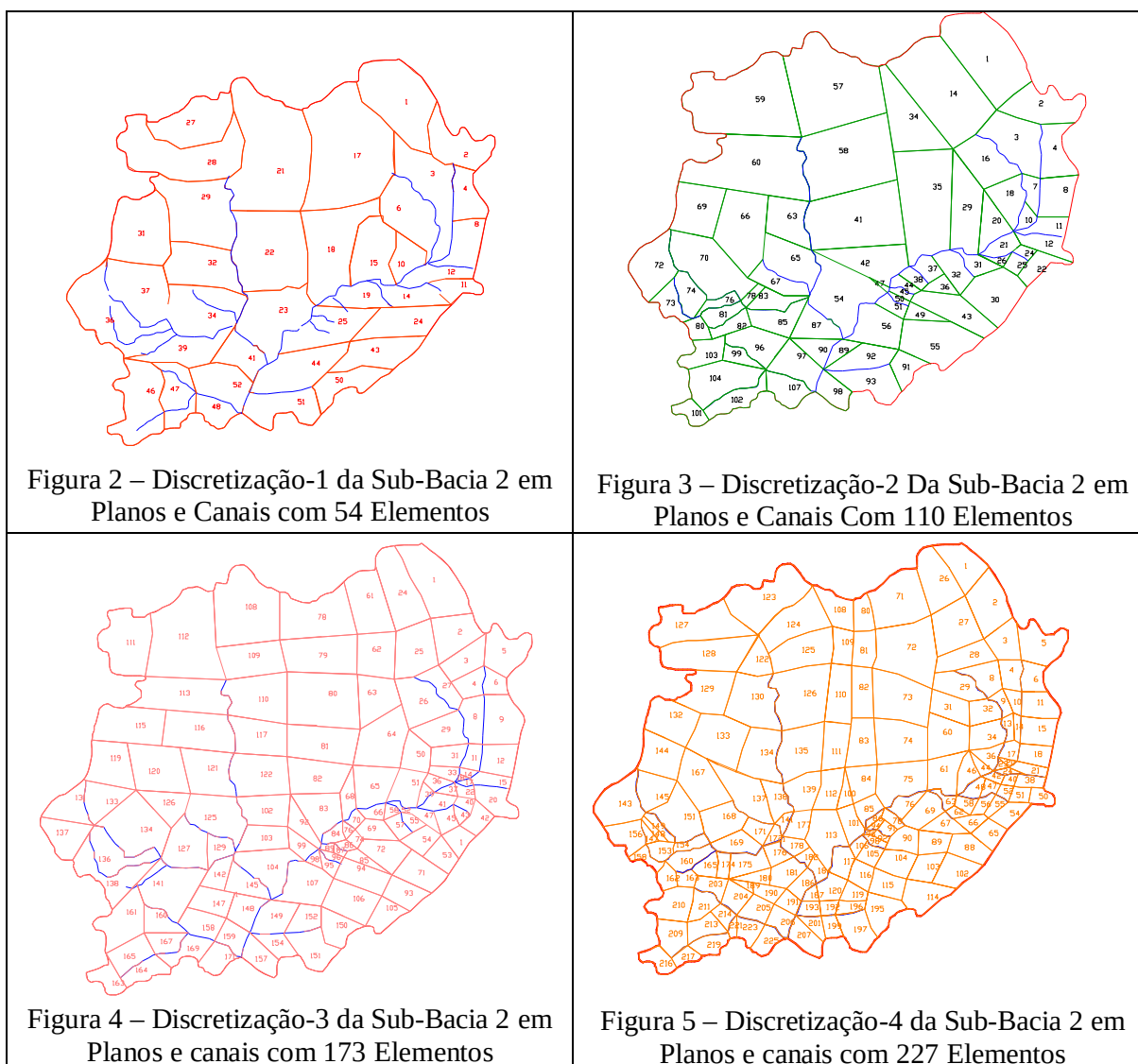
4.1 - Discretização da Bacia

Dentre os objetivos do presente estudo, temos a estimativa de produção anual de sedimentos e de produção de sedimento, evento a evento com a parametrização adequada do modelo. Como os resultados do modelo também podem ser afetados pela forma de representar a bacia em planos e canais, um dos objetivos principais é analisar a influência que a discretização da bacia exerce sobre o escoamento superficial e de produção de sedimentos. Neste intento, a bacia em estudo foi discretizada em quatro diferentes configurações de 54 (17 canais e 37 planos), 110 (36 canais e 74 planos), 173(52 canais e 121 planos) e 227(63 canais e 164 planos) elementos. No processo destas discretizações foram consideradas as características de cobertura vegetal, rede de drenagem, declividade e a topografia da sub-bacia (Figuras 2 a 5).

4.2 - Calibração dos parâmetros

Inicialmente, os arquivos de parâmetros referentes a cada elemento a ser modelado (P1, P2, SB2) tiveram de ser montados e, para tanto, as características fisiográficas, pedológicas e de cobertura vegetal tiveram de ser levantadas, o que foi feito durante as visitas periódicas a BESJC. A

partir destas visitas e de trabalhos anteriores (Aragão, 2006; Srinivasan et al., 2006) o coeficiente de rugosidade de Manning, n , foi fixado em 0,02 para planos e 0,03 para canais. Vale salientar que



este é um parâmetro que influencia mais a forma do hidrograma simulado do que o volume escoado e como neste estudo, procurou-se simular as lâminas totais escoadas, os valores de n estão adequados para as condições da sub-bacia e portanto não foi considerada necessária a sua verificação.

A partir de várias amostras de solo coletadas, foi possível determinar a composição granulométrica (Aragão, 2006) e a textura do solo foi identificada como do tipo franco arenoso argiloso. O diâmetro médio (D_{50}) utilizado nesse trabalho conforme as amostras foram de 0,50 mm. De acordo com estes dados e baseado no trabalho de Rawls et al. (1982), os parâmetros G , K_s , ϕ foram atribuídos, inicialmente, os seguintes valores: $K_s = 3,65$ mm/h; $G = 263$ mm e $\phi = 0,398$. Segundo Rawls et al. (1982) o valor máximo para a saturação inicial, S_i , para este tipo de solo poderia ser igual a 0,83 e o valor mínimo 0,17, porém procurou-se testar os limites máximos e

mínimos de S_i através de calibração, existindo casos onde estes limites foram ultrapassados. Visto que esta bacia uma cobertura vegetal natural preservada, a parte da interceptação da chuva precisava de ser considerada e esta foi assumida igual a 1 mm.

Os valores recomendados por Rawls et al. (1982) são apenas indicações baseadas no tipo do solo e não necessariamente correspondem às características do solo da BESJC. Uma vez que os valores de K_s e G influenciam bastante a resposta do modelo, foi efetuada uma análise de sensibilidade para determinar os limites práticos destes parâmetros e, por consequência, os valores mais adequados para a região da BESJC. Para tanto foram utilizados os dados de escoamento superficial das duas parcelas de erosão de 100 m² (P1 e P2). Inicialmente, os valores de $K_s = 3,65$ mm/h e $G = 263$ mm foram admitidos e a saturação inicial, S_i , foi calibrada evento a evento pelo método da tentativa e erro, procurando igualar o valor simulado de lâmina ao observado. Posteriormente, utilizando o valor médio de S_i , o valor de K_s foi ajustado evento a evento. Este procedimento foi repetido para outros valores de G próximo ao valor admitido, para em fim, obter as melhores estimativas dos parâmetros de K_s e G que foram fixados em $K_s = 4$ mm/h e $G = 330$ mm.

Assim, os valores dos parâmetros acima descritos foram aplicados aos elementos planos da SB 2, para que, posteriormente, fosse determinado os parâmetros referentes à erosão (C_o e C_f) nos planos e nos canais, sendo utilizada para este fim a discretização com 54 elementos (37 planos e 17 canais). Tanto para esta discretização como para as outras citadas (110, 173, 227 elementos), o parâmetro de saturação inicial, S_i , foi calibrado evento a evento, através de tentativa e erro. Para determinar os valores de C_f e C_o para os planos e para os canais, o mais adequado possível para esta bacia, foi utilizado um processo de calibração utilizando para este fim, os eventos com dados da produção volumétrica de sedimentos.

Segundo Leprun (1979), as chuvas na região do semi-árido nordestino são de curta duração, mas medianamente intensa, o que é fato comum para outras regiões semi-áridas (Lopes e Canfield, 2004). Sendo assim, o agente desagregador seria o impacto de gotas de chuvas já que o escoamento superficial nas vertentes é muito raso e não possui energia suficiente para desagregar grandes cargas de material, servindo somente para o transporte do material desagregado pela chuva. Lopes (2003) mostrou que a erosão causada pelo fluxo superficial tinha um efeito secundário, se comparado ao efeito da erosão por impacto. Isto foi refletido nos valores dos parâmetros calibrados por ele, nas micro-bacias de Sumé (Lopes, 2003) tendo o C_o sido fixado em 0,01 e o C_f calibrado evento a evento. Contudo, Aragão et al. (2006) após análise de sensibilidade destes parâmetros para a SB1 mostraram que quando a escala cresce, a influencia de C_o ou a erosão pelo fluxo aumenta e o parâmetro do impacto da chuva(C_f) passa ser menos importante. No trabalho de Aragão et al. (2006)

C_f variou de 1 até 1×10^6 sem exercer uma influencia significativa no cálculo de sedimento produzido pelo modelo. Sendo assim, o valor de C_f foi fixado em 1,0 e o valor de C_o calibrado.

Deve-se lembrar que o parâmetro C_o representa uma propriedade física do solo e, portanto não deve ser o alvo de calibração. Entretanto, como esta propriedade varia muito dentro da bacia, a calibração deste utilizando dados da erosão é o melhor caminho para estimar seu valor. Como os sedimentos transportados pelo fluxo para os canais seriam praticamente livres de material coesivo, o valor deste parâmetro seria bem menor em canais do que nos planos. Desta forma, procurou-se determinar o valor de C_o (planos) e de C_o (canais) que levasse o modelo a simular um valor de produção de sedimento o mais próximo dos valores medidos. O parâmetro C_o foi calibrado evento a evento, e em 11 eventos de um total de 22 nos quais a produção volumétrica de sedimentos tinha sido medida, foi possível obter ótimos resultados dentro dos limites dos parâmetros. Os valores médios destes parâmetros de erosão calibrados em 11 eventos foram considerados como valores representativos e foram utilizadas nas simulações. Quando os 22 eventos foram simulados com estes parâmetros, em 19 eventos a relação entre o valor simulado da erosão e o valor medido ficou na faixa da variação ampla geralmente encontrada. Com este procedimento, o valor de C_o (planos) foi fixado em 0,00000715 e de C_o (canais) foi fixado em 0,000000122.

Uma vez definidos estes parâmetros, foram feitas as simulações dos mesmos 19 eventos em todas as quatro configurações da representação da sub-bacia. Como foi dito anteriormente, a erosão pelo fluxo se torna mais importante do que erosão pelo impacto da chuva, nas bacias. Assim, uma simulação distorcida da lâmina do escoamento pode provocar distorções ainda maiores na simulação da erosão e transporte de sedimentos. Por este motivo, a saturação inicial nos planos foi ajustada para cada evento e cada configuração da bacia, para aproximar a lâmina observada o melhor possível, respeitando os limites físicos estabelecidos para o parâmetro S_i . Desta forma, a variação da saturação inicial entre as 4 configurações indicaria a influência relativa da configuração sobre o parâmetro S_i . A variação da produção de sedimentos erodidos entre as 4 alternativas seria uma indicação do grau da influência da divisão da bacia sobre a produção de sedimentos. As Tabelas 1 e 2 mostram a relação de 19 eventos, os valores do escoamento e erosão observados, valores da saturação inicial para cada evento e configuração e os valores de escoamento e erosão simulados pelo modelo. As Tabelas 1 e 2 também apresentam para cada evento e configuração, a razão (L_c/L_o) entre lâmina calculada (L_c) e lâmina observada (L_o) bem como a razão (E_c/E_o) entre a erosão calculada e observada. Evidentemente, quanto mais próximo ao valor 1 estas razões, tanto melhor seriam as simulações. A Tabela 3 apresenta as estatísticas destas razões para lâmina escoada (L_c/L_o) em cada uma das configurações testadas. Como as medições da vazão tinham muito mais registros (Srinivasan et al., 2006), estas estatísticas foram baseadas em 61 dos 91 eventos em que o valor de S_i foi obtido dentro dos valores limites, para cada evento em cada configuração. A Tabela 4

apresenta as estatísticas referentes às razões da erosão calculada e observada (E_c/E_o) em 19 eventos referidos anteriormente.

Tabela 1 – Relação dos eventos com escoamento e erosão observados e simulados nas configurações 1 e 2.

		Discretização 01							Discretização 02				
		54 ELEMENTOS							110 ELEMENTOS				
	DATA	L_o mm	E_o kg/ha.	S_i	L_c mm	L_c/L_o	E_c kg/ha.	E_c/E_o	S_i	L_c mm	L_c/L_o	E_c kg/ha.	E_c/E_o
1	25/01/2004	6.612	23.202	0.305	6.624	1.002	21.301	0.918	0.299	6.613	1.000	14.866	0.641
2	28/01/2004	1.421	5.210	0.949	1.126	0.792	3.725	0.715	0.949	1.311	0.923	3.360	0.645
3	30/01/2004	1.091	7.346	0.010	1.130	1.036	2.871	0.391	0.010	1.490	1.366	3.111	0.424
4	04/02/2004	13.260	20.43	0.010	19.756	1.490	55.204	2.701	0.010	20.178	1.522	46.209	2.261
5	05/02/2004	1.729	3.439	0.753	1.730	1.001	6.488	1.886	0.727	1.725	0.998	3.390	0.986
6	12/02/2004	0.504	5.810	0.584	0.496	0.984	1.110	0.191	0.570	0.509	1.011	1.008	0.174
7	27/02/2004	3.475	5.356	0.820	3.441	0.990	10.935	2.042	0.797	3.471	0.999	7.122	1.330
8	28/02/2004	0.551	0.793	0.950	0.204	0.371	0.473	0.597	0.950	0.211	0.383	0.424	0.535
9	29/03/2005	0.869	5.33	0.010	8.343	9.600	23.514	4.412	0.010	8.676	9.982	19.188	3.600
10	25/04/2005	5.896	13.550	0.770	5.852	0.992	18.787	1.386	0.753	5.880	0.997	13.710	1.012
11	26/04/2005	1.975	16.630	0.075	1.951	0.988	6.608	0.397	0.010	2.087	1.057	5.600	0.337
12	28/04/2005	7.811	17.620	0.900	7.803	0.999	23.638	1.342	0.885	7.826	1.002	17.052	0.968
13	14/06/2005	6.638	39.650	0.738	6.631	0.999	22.069	0.557	0.731	6.638	1.000	14.842	0.374
14	18/06/2005	1.256	6.850	0.883	1.252	0.997	3.927	0.573	0.861	1.254	0.998	2.512	0.367
15	05/12/2005	11.952	66.660	0.010	13.221	1.106	38.830	0.583	0.010	34.427	2.880	76.258	1.144
16	06/12/2005	2.803	6.610	0.765	2.810	1.003	8.346	1.263	0.721	2.802	1.000	7.000	1.059
17	07/12/2005	0.029	2.200	0.782	0.027	0.925	0.108	0.049	0.780	0.029	1.005	0.107	0.049
18	13/05/2006	0.343	12.110	0.010	0.618	1.801	1.385	0.114	0.010	0.872	2.541	1.659	0.137
19	21/06/2006	4.359	33.95	0.010	64.729	14.849	207.591	6.115	0.010	64.814	14.869	150.890	4.444

Tabela 2 – Relação dos eventos com escoamento e erosão observados e simulados nas configurações 3 e 4.

		Discretização 03							Discretização 04				
		173 ELEMENTOS							227 ELEMENTOS				
	DATA	L_o mm	E_o kg/ha.	S_i	L_c mm	L_c/L_o	E_c kg/ha.	E_c/E_o	S_i	L_c mm	L_c/L_o	E_c kg/ha.	E_c/E_o
1	25/01/2004	6.612	23.202	0.302	6.622	1.001	16.671	0.719	0.302	6.616	1.001	20.661	0.890
2	28/01/2004	1.421	5.210	0.949	1.233	0.868	3.056	0.587	0.949	1.251	0.880	3.735	0.717
3	30/01/2004	1.091	7.346	0.010	1.387	1.272	2.993	0.407	0.010	1.432	1.313	4.050	0.551
4	04/02/2004	13.260	20.43	0.010	20.094	1.515	45.623	2.233	0.010	20.156	1.520	64.552	3.159
5	05/02/2004	1.729	3.439	0.740	1.731	1.001	3.550	1.032	0.740	1.769	1.023	4.679	1.360
6	12/02/2004	0.504	5.810	0.580	0.516	1.024	0.886	0.153	0.573	0.508	1.008	1.117	0.192
7	27/02/2004	3.475	5.356	0.803	3.470	0.998	8.296	1.549	0.801	3.485	1.003	10.713	2.000
8	28/02/2004	0.551	0.793	0.950	0.206	0.374	0.327	0.412	0.950	0.209	0.380	0.441	0.556
9	29/03/2005	0.869	5.33	0.010	8.488	9.766	19.106	3.585	0.010	8.460	9.734	43.260	8.116
10	25/04/2005	5.896	13.550	0.760	5.894	1.000	14.561	1.075	0.755	5.846	0.992	18.807	1.388
11	26/04/2005	1.975	16.630	0.019	1.973	0.999	5.371	0.323	0.010	1.936	0.980	6.383	0.384
12	28/04/2005	7.811	17.620	0.887	7.806	0.999	18.065	1.025	0.885	7.807	0.999	24.082	1.367
13	14/06/2005	6.638	39.650	0.735	6.642	1.001	16.403	0.414	0.735	6.648	1.002	21.002	0.530
14	18/06/2005	1.256	6.850	0.868	1.257	1.001	2.576	0.376	0.870	1.317	1.049	3.505	0.512
15	05/12/2005	11.952	66.660	0.010	34.372	2.876	79.482	1.192	0.010	34.419	2.880	107.622	1.614
16	06/12/2005	2.803	6.610	0.736	2.813	1.004	7.200	1.089	0.730	2.808	1.002	9.323	1.410
17	07/12/2005	0.029	2.200	0.781	0.029	1.005	0.069	0.031	0.778	0.028	0.974	0.041	0.019
18	13/05/2006	0.343	12.110	0.010	0.781	2.276	1.478	0.122	0.010	0.806	2.349	2.006	0.166
19	21/06/2006	4.359	33.95	0.010	64.900	14.889	159.486	4.698	0.010	64.932	14.896	210.707	6.206

Tabela 3 – Análise estatística das lâminas simuladas nas quatro configurações

Estatística Lâmina	Discretização 1	Discretização 2	Discretização 3	Discretização 4
Média	1.023	1.085	1.070	1.074
Mediana	0.999	1.001	1.001	1.001
Desvio padrão	0.189	0.354	0.334	0.341
Mínimo	0.457	0.533	0.492	0.498
Máximo	1.801	2.880	2.876	2.880
Contagem	61	61	61	61

Tabela 4 – Análise estatística das erosões simuladas nas quatro configurações

Estatística Erosão	Discretização 1	Discretização 2	Discretização 3	Discretização 4
Média	1.381	1.078	1.106	1.639
Mediana	0.715	0.645	0.719	0.890
Desvio padrão	1.564	1.169	1.215	2.112
Mínimo	0.049	0.049	0.031	0.019
Máximo	6.115	4.444	4.698	8.116
Contagem	19	19	19	19

4.3 - Produções Anual de Sedimentos

Definidos todos os parâmetros do modelo KINEROS2, seria possível obter uma estimativa da produção anual de sedimentos e uma estimativa da produção média interanual. Para este fim, foram simulados todos eventos de todos os anos que tinham registro de dados consistentes e verificados da chuva e a lâmina do escoamento. Como foi explicada anteriormente, a saturação inicial do solo sendo um variável para cada evento, tinha que ser determinada pelo ajuste entre a lâmina simulada e observada para cada evento para poder gerar a seqüência do fluxo sobre os planos e canais da cada configuração. Feito isto, a erosão foi simulada evento por evento em cada ano para obter pela soma das produções individuais, a produção anual. A tabela 5 mostra a simulação feita nas 4 configurações para todos os eventos do ano 1992. Encontram-se na Tabela 6 os totais anuais para diversos anos nos quais não tinham falhas e todos os eventos com a produção de sedimentos pela erosão na sub-bacia tinham sido simulados. A partir dos valores anuais individuais, a média e desvio padrão dos valores interanuais foram determinados conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 5 – Simulação do escoamento e erosão em eventos individuais do ano de 1992.

				Discretização 1		Discretização 2		Discretização 3		Discretização 4	
				54 Elementos		110 Elementos		173 Elementos		227 Elementos	
	DATA	Chuva	L _O	L _C	E _C	L _C	E _C	L _C	E _C	L _C	E _C
		mm	mm	mm	kg/ha.	mm	kg/ha.	mm	kg/ha.	mm	kg/ha.
1	27/01/1992	54.5	2.630	2.611	8.182	2.642	5.583	2.627	6.078	2.642	7.773
2	28/01/1992	97.7	71.878	70.696	205.337	71.248	154.383	71.175	158.248	71.268	222.054
3	10/02/1992	26.0	6.592	6.587	18.302	6.596	14.028	6.593	14.531	6.595	19.509
4	02/04/1992	44.4	1.765	1.749	4.504	1.763	3.765	1.771	3.975	1.765	4.943
5	03/04/1992	20.0	2.025	2.018	4.864	2.028	3.841	2.037	3.570	2.030	4.882
6	04/04/1992	27.6	4.728	4.675	15.495	4.711	10.970	4.737	11.736	4.741	14.908
7	05/04/1992	13.5	2.353	2.380	6.135	2.357	6.108	2.359	5.723	2.349	7.724
	Total	283.700	91.970	90.716	262.819	91.345	198.678	91.299	203.861	91.390	281.793

Tabela 6 – Produção de sedimentos gerados pela simulação nas quatro configurações em diversos anos.

Ano	Chuva total anual	Chuva com escoamento	L _O	Erosão anual em diferentes configurações (kg/ha)			
	mm	mm	mm	54 Elementos	110 Elementos	173 Elementos	227 Elementos
1987	471.5	107.0	14.11	42.214	29.508	31.229	41.561
1988	792.6	441.0	154.75	411.028	322.498	321.408	470.018
1989	606.8	112.5	16.352	55.715	44.580	44.488	58.312
1992	526.4	283.7	91.97	262.819	198.678	203.861	281.793
1994	425.1	108.3	13.171	53.880	30.531	29.684	38.889
1995	546.6	180.4	27.487	144.911	103.320	96.694	118.194
1996	458.4	173.4	52.64	162.257	126.218	128.876	178.074
2004	747.6	148.8	14.832	46.430	32.857	35.452	44.955
2005	701.9	251.9	38.36	122.314	137.081	143.727	190.765
Média	586.322	200.778	47.075	144.619	113.919	115.047	158.062
Mediana	546.600	173.400	27.487	122.314	103.320	96.694	118.194
Desvio padrão	133.720	109.660	47.854	123.501	98.073	98.393	144.137
Mínimo	425.100	107.000	13.171	42.214	29.508	29.684	38.889
Máximo	792.600	441.000	154.750	411.028	322.498	321.408	470.018
Contagem	9	9	9	9	9	9	9

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - Variação da Resposta do Modelo de acordo com a Discretização

Encontra-se na literatura vários estudos mostrando a influência da discretização da bacia na resposta dos modelos hidrológicos (Goodrich, 1990; Hernandez et al., 1997; Gove et al., 2001; Lopes e Canfield, 2004). Sabe-se que, dependendo da representação da bacia, um maior ou menor número de aspectos poderão ser considerados e com eles haverá ou não a oportunidade de haver ou maior infiltração, incremento na erosão, como também a retenção da carga de sedimentos produzida nas vertentes em algum lugar a montante da seção em análise.

O modelo KINEROS2 mostrou-se sensível as discretizações da bacia, uma vez que para os mesmos eventos de precipitação, valores diferentes do parâmetro Si e da produção de sedimentos

foram obtidos quando houve aumento no número de elementos que compõe a bacia. Trabalhos anteriores realizados com dados da mesma região (Lopes, 2003; Aragão et al., 2006; Srinivasan et al., 2006) mostraram o efeito que a escala exerce sobre o parâmetro de Saturação Inicial (S_i). No presente trabalho, foi observado que S_i também sofreu uma pequena, mas perceptível variação de acordo com a discretização. Este fato pode ser explicado visto que o S_i calibrado representa, em termos globais, a saturação inicial sobre toda a bacia e desta forma quanto menor for o número de elementos, maior será a área de cada um e, sendo assim, haverá uma maior infiltração. Como resposta, para que o modelo possa simular a lâmina observada será necessário que o valor de saturação inicial, S_i , seja maior do que o encontrado para um maior número de elementos. Além disso, quanto menor for a lâmina escoada, menor será a capacidade de transporte e muito pouco do que foi desagregado chegará a seção de medição. Isto pode ser observado através das Tabelas 1 a 2.. Observa-se que, apesar de ser pequena a diferença do valor de S_i entre uma discretização e outra, ocorre um decréscimo do valor de S_i com o aumento do número de elementos. Além disso, os valores de S_i para a discretização 1 se aproximaram daqueles para discretização 4, ao passo que os valores de S_i para a discretização 2 ficaram próximos dos valores da discretização 3. A Figura 6 apresenta a variação da saturação inicial nos 19 eventos entre as 4 configurações avaliadas. De uma forma geral quanto maior o numero dos planos, tanto menor seria o tempo do escoamento sobre os planos e isto implica num menor infiltração. Daí, para compensar isto, o modelo apresenta uma diminuição na saturação inicial. As diferenças, porém, dependem das variações da intensidade da precipitação durante o evento e desta forma, podem ser pequenos ou significativos.

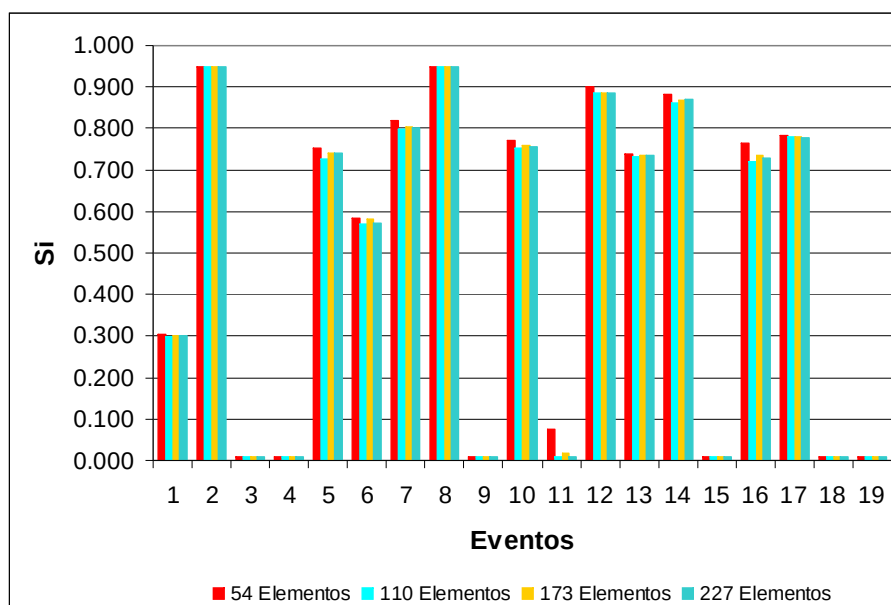


Figura 6 – Variação da saturação inicial do solo conforme a discretização da bacia

Em termos da produção de sedimentos ou da erosão, deve-se salientar que os valores dos parâmetros de erosão foram calibrados apenas na configuração 01 de 54 elementos e os mesmos utilizados na simulação nas outras três configurações de 110, 173 e 227 elementos. Os resultados da simulação estão mostrados nas Tabelas 1 e 2 nas quais é possível comparar tanto os valores simulados pelo modelo, quanto as razões entre os valores simulados e observados das lâminas escoadas e erosões produzidas.

Neste contexto deve enfatizar a importância dos parâmetros da erosão. Enquanto não é realizada uma observação física em campo para verificar o processo real, o parâmetro C_f deve ser analisado de forma indireta. Considerar que os planos discretizados na sub-bacia seriam perfeitamente planos - o que seria favorável à erosão pelo impacto das gotas de chuva (C_f) – não seria totalmente correta. A melhor representação de um plano seria a própria parcela de erosão, e nesse caso a erosão ocorre pelo impacto das gotas de chuva. Em uma Sub-bacia, quando discretizada, os planos são muito maiores do que as parcelas e as próprias micro-bacias, logo, nem toda a região do plano é realmente plana, e em algumas partes começa a ocorrer à presença de sulcos formados pela concentração do escoamento superficial. A presença desses sulcos, causando erosão concentrada, com a predominância da ação de cisalhamento na erosão das partículas e a coesão resistindo essa erosão. Dessa forma o parâmetro C_f pode não ser o parâmetro mais sensível no processo de erosão em sub-bacias e bacias. Daí, no processo de erosão e transporte o parâmetro básico da influência seria C_o que representa a coesão entre as partículas do solo e, no modelo, determina o parâmetro de intercâmbio C_g .

No que diz respeito à produção de sedimento, para todas as discretizações os resultados foram semelhantes a do escoamento. As configurações com o menor número (54 elementos) e maior número dos elementos (227 elementos) geraram resultados bem próximos e as configurações intermediárias de 110 e 173 elementos ficaram próximos com produções menores do que as outras. Desta forma, nota-se uma tendência de redução da produção da configuração de 54 elementos para a de 110 elementos, ficando quase estável para a configuração de 173 elementos e aumentando para a de 227 elementos. Isto significa que um aumento de número dos elementos na representação da bacia não necessariamente melhora os resultados da simulação ou da previsão. No presente caso, as configurações 2 e 3 com 110 e 173 elementos apresentam resultados melhores do que as configurações 1 e 4 com 54 e 227 elementos respectivamente. A Figura 7 mostra uma comparação, entre as quatro configurações, em relação das quantidades de sedimentos produzidos pela erosão nos 19 eventos.

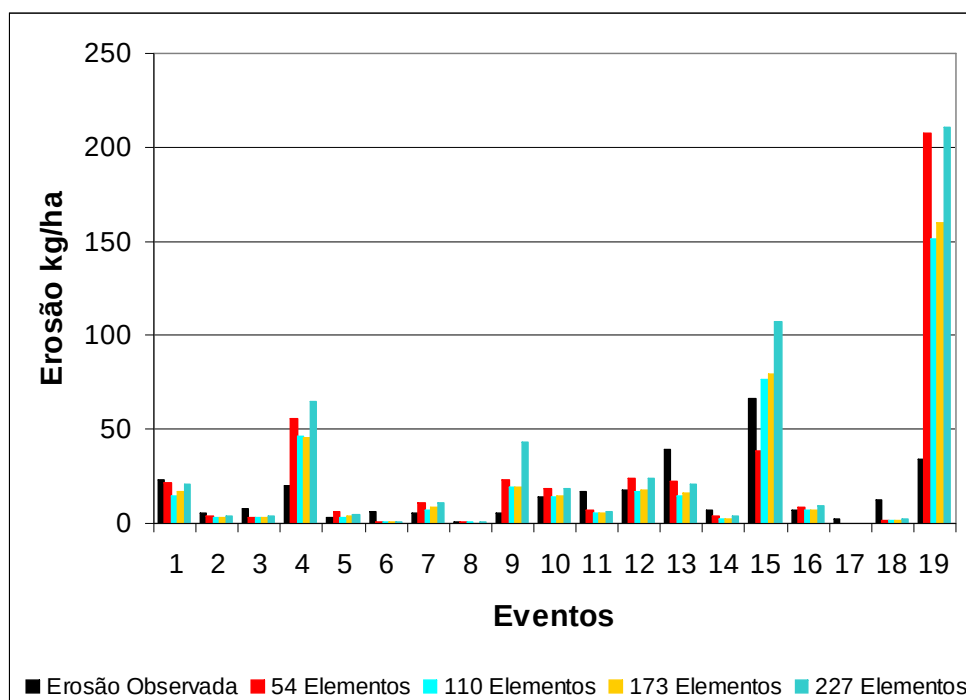


Figura 7 – Comparação da produção de sedimentos de acordo com a discretização.

Uma análise estatística foi realizada com os resultados obtidos com todas as discretizações através da relação entre os valores calculados pelo modelo e os valores observados de escoamento superficial e de produção de sedimentos. As Tabelas 3 e 4 mostram os valores da média, mediana, desvio padrão, e valores máximo e mínimo para cada configuração das razões do escoamento e erosão calculados e observados. No caso de escoamento, a configuração 3 parece dar melhores resultados enquanto a configuração 2 parece a melhor para simulação da erosão. Entretanto, a diferença entre as configurações 2 e 3 são muito pequenas e assim, ambas as configurações podem ser consideradas como apropriados para a simulação hidrossedimentológica da sub-bacia 2.

5.2 - Estimativa da Produção de Sedimentos

Uma das informações importantes para planejamento e gestão dos recursos naturais de uma bacia hidrográfica é a taxa média anual de sedimentos erodidos. A melhor forma de estimar este valor é através de modelos calibrados e validados. Desta forma, os parâmetros calibrados da sub-bacia 2 foram utilizados para simular os eventos do registro e calcular a produção de sedimentos em cada ano e o valor médio dos anos simulados. A simulação foi efetivada em todas as 4 configurações para todos os anos com registros completos e sem falhas nos eventos. A soma de produção de todos os eventuais resultaram na produção anual mostrada na Tabela 6. Os valores médios, desvio padrão e outras estatísticas também estão apresentadas na Tabela 6. Contudo, a tendência geral da produção segue o mesmo comportamento nos eventos individuais. Isto é, a produção anual na configuração 1 aproxima a da configuração 4. As produções anuais obtidas nas

configurações 2 e 3 são bastante próximos. Em todas as configurações a produção de sedimentos apresenta uma tendência consistente e crescente com o escoamento anual. A Figura 8 mostra a produção comparativa entre as 4 configurações, para os diversos anos de registro.

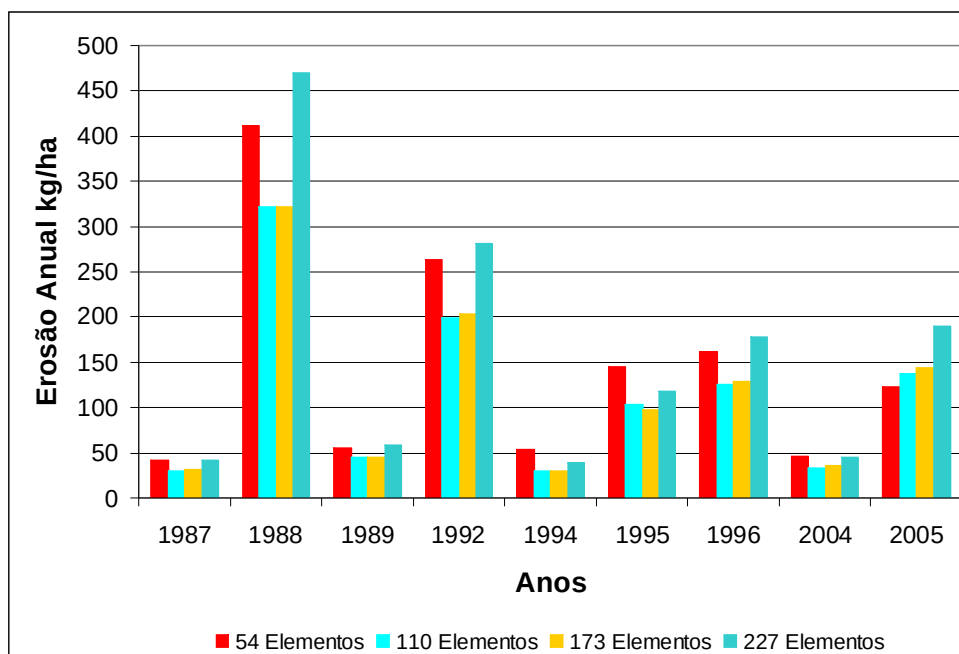


Figura 8 - A produção anual de sedimentos de acordo com a discretização.

6 – CONCLUSÕES

O modelo KINEROS2 foi aplicado com êxito a uma sub-bacia de 39 ha, localizada no semi-árido nordestino com a finalidade de gerar a estimativa de produção de sedimentos em cada evento da precipitação e durante o ano. Apesar de ter conseguido em apenas 11 eventos a calibração dos parâmetros de erosão, estes foram capazes de fornecer bons resultados tanto a nível individual de eventos, quanto a nível anual da produção de sedimentos.

As quatro configurações da bacia resultaram em respostas diferentes do modelo tanto para escoamento superficial, quanto para produção de sedimentos pela erosão. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que, o parâmetro de saturação inicial do modelo é sensível às variações na representação da bacia. Ainda, que na sub-bacia, a erosão por impacto de gotas de chuva deixa de ser o processo erosivo predominante para dar lugar à erosão por fluxo concentrado, o que pode ser explicado pela concentração do fluxo superficial em sulcos que não ocorreu em parcelas de erosão. O modelo é capaz de estimar, com fidelidade, a produção de sedimentos em eventos individuais e a nível anual e, portanto serve como uma boa ferramenta de previsão onde não existem dados medidos sobre esta variável. Por fim, dentre as quatro discretizações utilizadas, aquela onde houve a melhor representação das características fisiográficas foi à discretização com 110 elementos, mas a de 173 elementos pode ser considerado igualmente bom.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelo apoio recebido na forma de auxílio e bolsas através dos Fundos Setoriais CT HIDRO e programas do fomento.

BIBLIOGRAFIA

ARAGÃO, R.; SRINIVASAN, V.S.; FIGUEIREDO, E.E.; GALVÃO, C.O.; REGO, J.C.; MORAES, H.A. e SANTOS, L.L. (2005) “*Modelização Hidrológica em Bacias Experimentais no Cariri Paraibano*”. In Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa: ABRH.

CHOW, V. T. (1959). “*Open-channel hydraulics*”. Tokyo, McGraw-Hill/Kogakusha, 680p.

FIGUEIREDO, E. E. (1998). “*Scale effects and land use change impacts in sediment yield modeling in a semi-arid region of Brazil*”, Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle, UK.

FIGUEIREDO, E.E, DAVI, H. H. R. C. ALCÂNTARA, H. M., SANTOS, A.F. (2002). “*Processamento e análise de dados da bacia escola da UFPB como suporte aos estudos de modelagem e ao gerenciamento*”. CD-ROM do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Belo Horizonte.

LOPES, W. T.A. (2003). “*Efeito de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-Árida da Paraíba*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, 174p.

LOPES, V.L. e CANFIELD, H.E. (2004). “*Effects of Watershed Representation on Runoff and Sediment Yield Modeling*”. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 40(2):311-319.

MOLINIER, M.; AUDRY, P.; DESCONNETS, J. C. & LEPRUN, J. C. (1988) Projeto: “*Dinâmica da água e das matérias em um ecossistema representativo do Nordeste brasileiro. Condições de extrapolação espacial na escala regional*” Relatório de andamento dos trabalhos. Recife, ATP-PIREN, ORSTOM, 15p.

RAWLS, W.J. e SAXTON, K.E. (1982). *Estimation of Soil Water Properties*. Trans. ASAE, 25(5), 1316-1320, 1328.

SINGH, V.P. (1995). Watershed Modelling. In: V.P. Singh (editor). *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, United States.

SMITH, R.E., GOODRICH, D.C., WOOLHISER, D.A., UNKRICH, C.L. (1995). *KINEROS – A Kinematic Runoff and Erosion Model*. In: Computer Models of Watershed Hydrology, V.J.Singh (Editor) Water Resources Publications, Chapter 20, pp. 697-632.

SRINIVASAN, V. S., GALVAO, C. O., SANTOS, C. A. G., FIGUEIREDO, E.E., REGO, J. C., ALBUQUERQUE, J. P. T., ARAGÃO, R., M., R. N., CRUZ, E., GUEDES, G. A., LACERDA, I. SANTOS, L. L., ALVES, F. M. (2004). “*Bacia Experimental de São João do Cariri*. In: *Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido*”. Projeto IBESA FINEP/FUNPEC 22010453-00 – pp. 93-126.

WOOLHISER, D.A., SMITH, R. E., e GOODRICH, D.C.(1990) “*KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*”, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service ARS -77, 130p.