

MODELAGEM DA PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS DO LITORAL PARANAENSE: o caso da bacia do rio Nhundiaquara

Rosana de Fátima Colaço Gibertoni¹; Irani dos Santos²; Ingrid Illich Müller³ & Paulo Sérgio Pereira⁴

RESUMO --- Este artigo apresenta os resultados da produção hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, drenante à Baía de Antonina, litoral do Estado do Paraná. Foi utilizada a modelagem distribuída de produção e transporte de sedimentos para avaliar a descarga sólida na Baía de Antonina através de simulações para distintos cenários de usos dos solos da bacia interveniente. Os valores resultantes das simulações foram comparados para compor o diagnóstico e prognóstico da produção sólida da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara transportada pelo rio até a Baía. Os resultados indicaram grandes alterações na produção de sedimentos para os diferentes cenários de uso dos solos. Foram verificados decréscimos significativos na produção de sedimentos quando da recomposição com vegetação natural das poucas áreas urbanizadas ou agricultadas, função da grande fragilidade dos locais ocupados. Os resultados apresentados neste artigo fazem parte do estudo denominado “Influência da Usina Governador Parigot de Souza (GPS) no processo de assoreamento da Baía de Antonina”, realizado pelo LACTEC CEHPAR para a COPEL em 2006.

ABSTRACT --- This paper presents the results of the sediments production on the Nhundiaquara’s river basin, draining into the Antonina Bay, on the shore of Paraná State. It was used a distributed model for production and sediment transport to estimate the solid discharge in the Antonina Bay through the simulation of distinct scenarios of soils use on the upstream basin. The results of the simulations were compared to compose a diagnostic and prognostic of the sediment production from the Nhundiaquara’s catchment and transported into the Bay. The results indicate great alteration in the sediment production for the different soil use scenarios. Significant sediment production decrease was verified with the re-composition of urbanized or cultured areas with natural vegetation, resultant of the great fragility of the occupied areas. The results presented in this article are part of a study entitled “The Influence of the Governador Parigot de Souza Power Plant (GPS) in the Antonina Bay silting”, done by LACTEC CEHPAR for COPEL in 2006.

Palavras-chave: modelagem hidrossedimentológica, transporte de sedimentos, rio Nhundiaquara.

1) Pesquisadora do LACTEC CEHPAR - Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba – PR. Fone: (0xx41)3361-6282. E-mail: rosana@lactec.org.br

2) Professor Assistente da UFPR - Laboratório de Hidrogeomorfologia. E-mail: irani@ufpr.br

3) Pesquisadora do LACTEC CEHPAR - Caixa Postal 1309, CEP 80011-970, Curitiba – PR. Fone: (0xx41)3361-6306. E-mail: ingrid@lactec.org.br

4) Engenheiro Civil da COPEL - Rua José Izidoro Biazzetto, 158 – Bloco A, CEP 81200-240, Curitiba – PR. E-mail: paulo.pereira@copel.com

1 INTRODUÇÃO

Estuários são corpos d'água normalmente sujeitos a sofrerem processos acelerados de assoreamento. As próprias características pedológicas e hipsométricas da região circundante condicionam a instabilidade natural, podendo, inclusive, ocorrer deslizamentos de terras. Este alto potencial erosivo tem suas origens nas intensas declividades, fragilidade dos solos e elevado índice pluviométrico (chuvas intensas) que se verificam neste tipo de região. Além destes fatores naturais, o processo de aceleração do assoreamento do estuário pode ser agravado pela intervenção do homem. Desmatamentos, obras hidráulicas, impermeabilização dos solos, manejo incorreto dos despejos das dragagens, entre outros, podem ser citados como as principais atividades humanas que impactam não somente no assoreamento, como também na qualidade das águas das baías.

As Baías de Antonina e Paranaguá, que fazem parte do chamado Complexo Estuarino de Paranaguá (figura 1), são afetadas por todos os fatores citados acima, sejam naturais ou não. O sistema formado pelo estuário e pelas bacias hidrográficas contribuintes é um sensível e importantíssimo ecossistema, no qual as bacias se constituem em uma relevante reserva hídrica, e a sua vegetação é um importante ambiente para a preservação da vida animal e do equilíbrio físico de todo o sistema referido. O estuário, além de ser um ambiente importante do ponto de vista ecológico marinho, ainda abriga dois importantes portos para a economia brasileira.

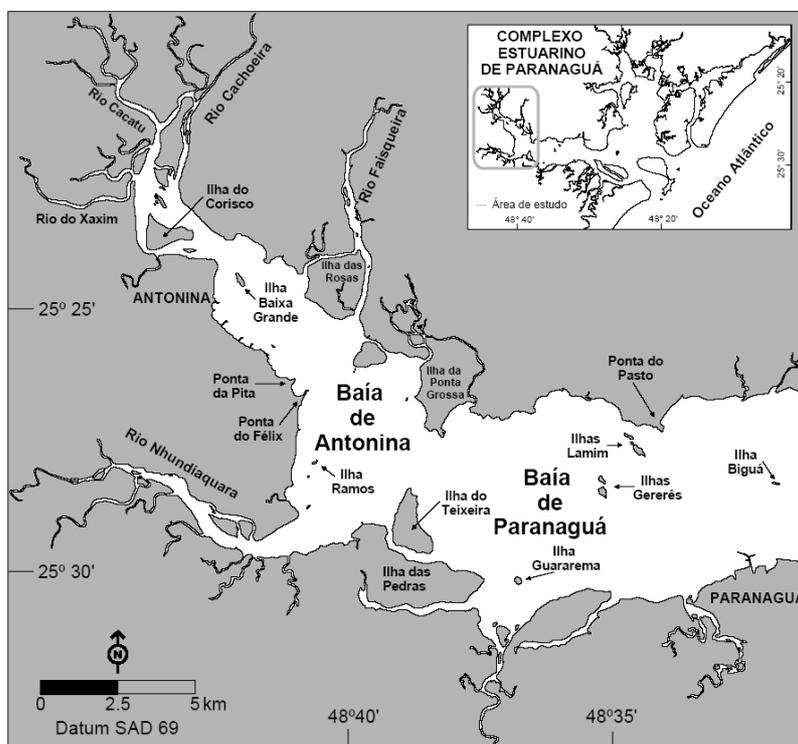


Figura 1 – Baías de Antonina e Paranaguá e Complexo Estuarino de Paranaguá

A COPEL (Companhia Paranaense de Energia) tem realizado e contratado diversos estudos de caráter ambiental, seja para avaliar e mitigar os impactos de suas obras, seja para contribuir na preservação de importantes ecossistemas. Visando estes dois objetivos, a COPEL contratou junto ao LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), o projeto denominado “*Estudo da Influência da Usina Governador Parigot de Souza (GPS) no Processo de Assoreamento da Baía de Antonina*” (LACTEC, 2007). Entre outros objetivos, este trabalho procurou analisar com qual impacto os fatores intervenientes na produção de sedimentos podem afetar a aceleração do processo natural de assoreamento dos corpos d’água. Os locais analisados foram a Baía de Antonina e as 6 principais bacias hidrográficas que drenam para a mesma. Foi avaliada a produção hidrossedimentológica das bacias de drenagem através da utilização da modelagem distribuída da produção e transporte de sedimentos. O modelo matemático utilizado, neste caso, possibilitou a obtenção de distintos cenários de produção de sedimentos mediante a consideração de diferentes usos dos solos da bacia.

Conjuntamente a análise da produção sedimentológica das bacias, foi realizada uma avaliação dos processos que ocorrem dentro do corpo d’água da Baía de Antonina. Este análise teve como finalidade principal avaliar a influência que os sedimentos oriundos dos diversos rios vêm tendo no processo de assoreamento da Baía de Antonina, em especial na região do Terminal Portuário da Ponta do Félix.

Das duas análises efetuadas no projeto contratado pela COPEL, modelagem distribuída sobre as bacias hidrográficas dos 6 principais rios e modelagem hidrodinâmica sobre o estuário, são foco do presente artigo os resultados da modelagem distribuída da bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, sendo esta, uma das áreas estudadas que apresentaram maior produção sedimentológica.

2 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DO ESTUDO

A Baía de Antonina localiza-se na planície costeira do Estado do Paraná, sendo delimitada pelas planícies marginais, com altitudes variando entre 0 e 100 m. Circundando estas planícies encontram-se morros cristalinos com variação de altitude entre 100 e 500 m, e o relevo da Serra do Mar, cujas altitudes ultrapassam os 1000 m e delimita quase a totalidade da bacia de drenagem da baía. A figura 2 apresenta a localização da área de estudo dentro do Litoral e Estado do Paraná.

A bacia hidrográfica da Baía de Antonina possui cerca de 1.597 km² de área, valor este totalmente representado na figura 3, onde são apresentadas as principais bacias hidrográficas contribuintes à Baía de Antonina. Dentre os rios da bacia, os principais são os rios Cachoeira, Nhundiaquara, Faisqueira, Cacatu, Sagrado e Xaxim.

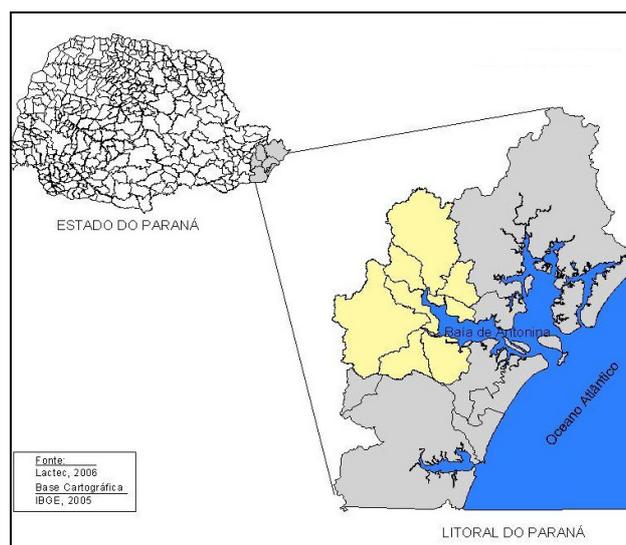


Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo

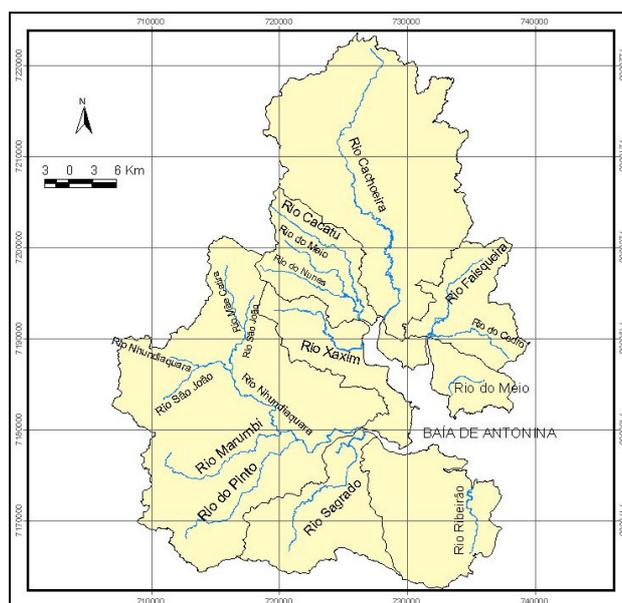


Figura 3 – Principais bacias hidrográficas da área de estudo

Como em outras regiões de entorno de baías, as bacias analisadas são caracterizadas como fortes fornecedoras de sedimentos transportados aos corpos hídricos. Embora grande parte da região da bacia de drenagem da Baía de Antonina esteja inserida em áreas de proteção ambiental, tem-se observado nos últimos anos o crescimento da ocupação destas áreas. A tabela 1 apresenta a situação de uso e ocupação do solo da bacia do rio Nhundiaquara para o ano de 1999, doravante denominada de Situação Atual. Cabe ressaltar que, transcorridos aproximadamente 6 anos entre a data de obtenção dos dados de usos do solo (1999) e a data de realização do estudo (2006), é provável que tenhamos um quadro um pouco mais pessimista em relação ao processo de ocupação das bacias. A

área denominada Agricultura e Pecuária engloba cultivares em geral (sem práticas de conservação) e pastagens. A cobertura vegetal e áreas antropizadas foram obtidas a partir de imagens do satélite orbital LANDSAT ETM datadas de 1999 (PAULA *et al.*, 2005). O conjunto com os usos de siglas RNGB, FRST, FRSE, WETF e WETL (ver tabela) foram tratados neste estudo simplesmente como vegetação natural.

Tabela 1 – Usos do solo para a Situação Atual da bacia do rio Nhundiaquara

Sigla	Descrição	Ocupação
AGRL	Agricultura e Pecuária	4,1%
URML	Áreas Urbanas	0,2%
RNGB	F.P.I.M. ⁽¹⁾ , Bracatingal e Campos de Altitude	0,4%
WATR	Corpos Hídricos	0,2%
FRST	F.O.M. ⁽²⁾ , Capoeira, Capoeirão e Reflorestamento	41,3%
FRSE	Floresta Ombrófila Densa	53,1%
WETF	Caxetais e Manguezais	0,1%
WETL	Várzeas e Campos Salinos	0,6%
Área de drenagem total da bacia		516,26 km ²

Obs. ⁽¹⁾ F.P.I.M. Formações Pioneiras com Influência Marinha

⁽²⁾ F.O.M. Floresta Ombrófila Mista

As figuras 4 e 5 apresentam as coberturas vegetais e outros usos do solo na Situação Atual da bacia do rio Nhundiaquara, respectivamente, a montante e a jusante da seção de controle considerada neste estudo.

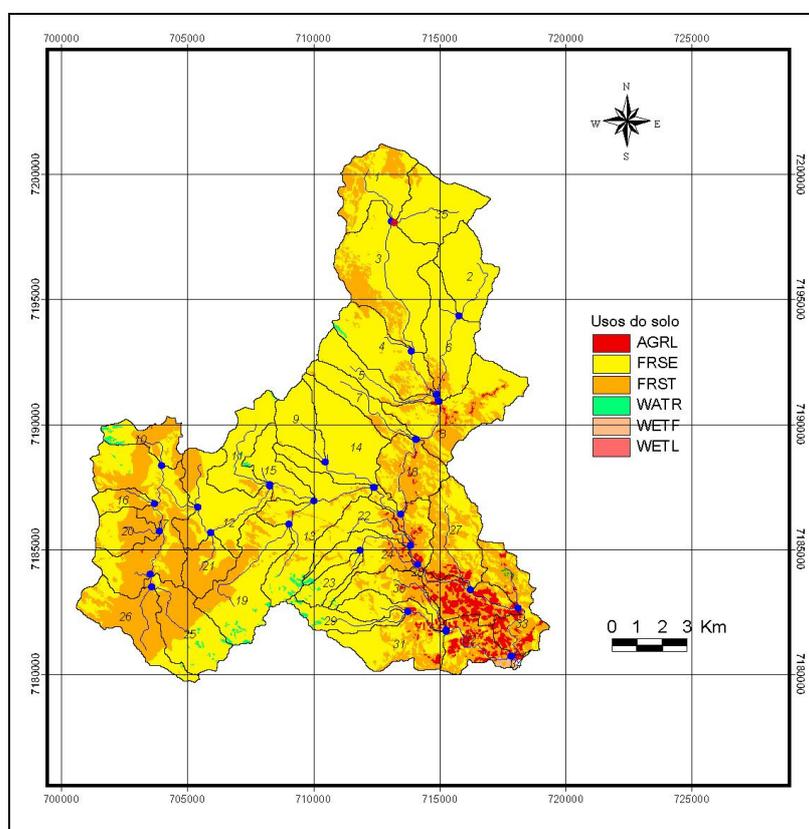


Figura 4 – Mapa de usos do solo da bacia do rio Nhundiaquara a montante da estação Morretes

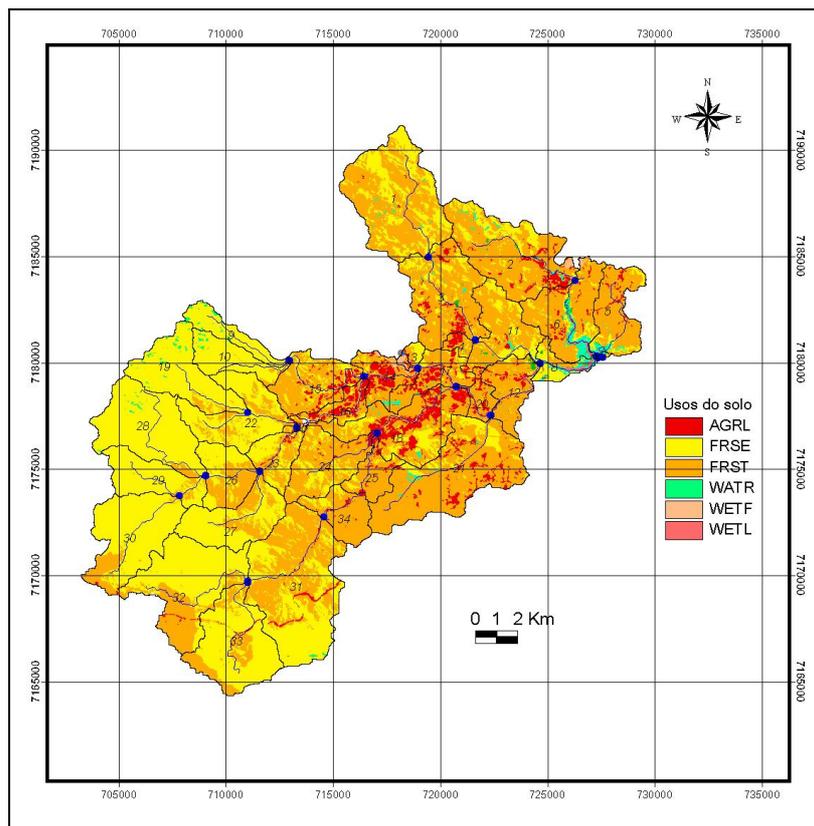


Figura 5 – Mapa de usos do solo da bacia do rio Nhundiaquara a jusante da estação Morretes

3 METODOLOGIA

3.1 Modelo utilizado

O transporte de sedimentos pelos rios é um fenômeno complexo que depende de processos erosivos que ocorrem nas vertentes da bacia e no leito e margens dos rios, e que fornecem material que, por sua vez, depende da energia do fluxo para ser transportado. A combinação dessas variáveis, fornecimento de material e energia do fluxo, resulta em um fenômeno com grande variação no tempo e no espaço. O transporte de sedimentos é um processo natural que envolve remoção, transporte e deposição de material e faz parte da evolução da paisagem originando as formas geomorfológicas (SANTOS *et al.*, 2001).

Existem atualmente diversos modelos para predição da erosão hídrica e do transporte de sedimentos de forma integrada, entre os quais destacam-se: *Water Erosion Prediction Project - WEPP*; *Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation - ANSWERS*; *Kentucky Erosion Model - KYERMO*; *European Soil Erosion Model - EUROSEM*; *Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems - CREAMS*; *Simulator for Water Resources in Rural Basins - SWRRB*; *Routing Outputs to Outlet - ROTO*; e *Soil and Water*

Assessment Tool - SWAT.

Com o desenvolvimento de pesquisas visando o maior conhecimento do comportamento dos processos físicos nas bacias hidrográficas, os modelos hidrológicos tornaram-se mais representativos da realidade física. A maior vantagem dos modelos de base física em relação aos modelos conceituais decorre da relação física entre os parâmetros e a incorporação das características físicas da bacia, o que permite avaliar os efeitos hidrológicos decorrentes da modificação no uso do solo das bacias hidrográficas.

O modelo matemático SWAT, acrônimo de *Soil and Water Assessment Tool*, foi desenvolvido em 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University* (NEITSCH *et al.*, 2002). O SWAT surgiu da junção dos modelos SWRRB e ROTO, incorporando desta forma, grande parte dos avanços contidos nos modelos anteriores. Neste estudo foi utilizada a versão AVSWAT2005, a qual está totalmente integrada ao SIG *ArcView*®. O *software* é de domínio público e pode ser acessado na Internet no endereço <http://www.brc.tamus.edu/swat/>.

O SWAT objetiva prever o impacto do uso e manejo do solo sobre o ciclo hidrológico, o transporte de sedimento e a qualidade da água em grandes e complexas bacias hidrográficas, considerando longos períodos de tempo.

As principais características do modelo SWAT estão apresentadas a seguir:

- possui base física, ou seja, incorpora equações que descrevem a relação entre as variáveis do sistema. Requer informação específica sobre clima, propriedades do solo, relevo, vegetação, e sobre o uso e manejo do solo praticados na bacia. Com base nestas informações modela os processos físicos associados com o movimento da água, movimento de sedimentos, crescimento da vegetação, ciclagem de nutriente, qualidade da água, etc;
- é distribuído, ou seja, a bacia hidrográfica pode ser subdividida em sub-bacias de modo a refletir as diferenças de tipo de solo, cobertura vegetal, topografia e uso do solo, sendo possível a subdivisão de centenas à milhares de células, cada célula representando uma sub-bacia;
- utiliza informações prontamente disponíveis, ou seja, as funções mais básicas do modelo podem ser simuladas com um conjunto mínimo de dados prontamente disponíveis nas agências governamentais;
- é computacionalmente eficiente, pois permite a simulação de bacias em diferentes escalas e uma grande variedade de situações de uso e manejo do solo de forma rápida e eficiente; e
- permite simular longos períodos de forma contínua (>50 anos), sendo que muitos dos problemas relacionados com impactos ambientais só são percebidos quando avaliados por longos períodos de tempo.

Os processos representados no modelo podem ser resumidos conforme apresentado na figura

6. Além dos componentes representados neste esquema o modelo possui ainda um módulo de produção de nutrientes e pesticidas e outro de produção de neve, os quais não foram considerados neste trabalho.

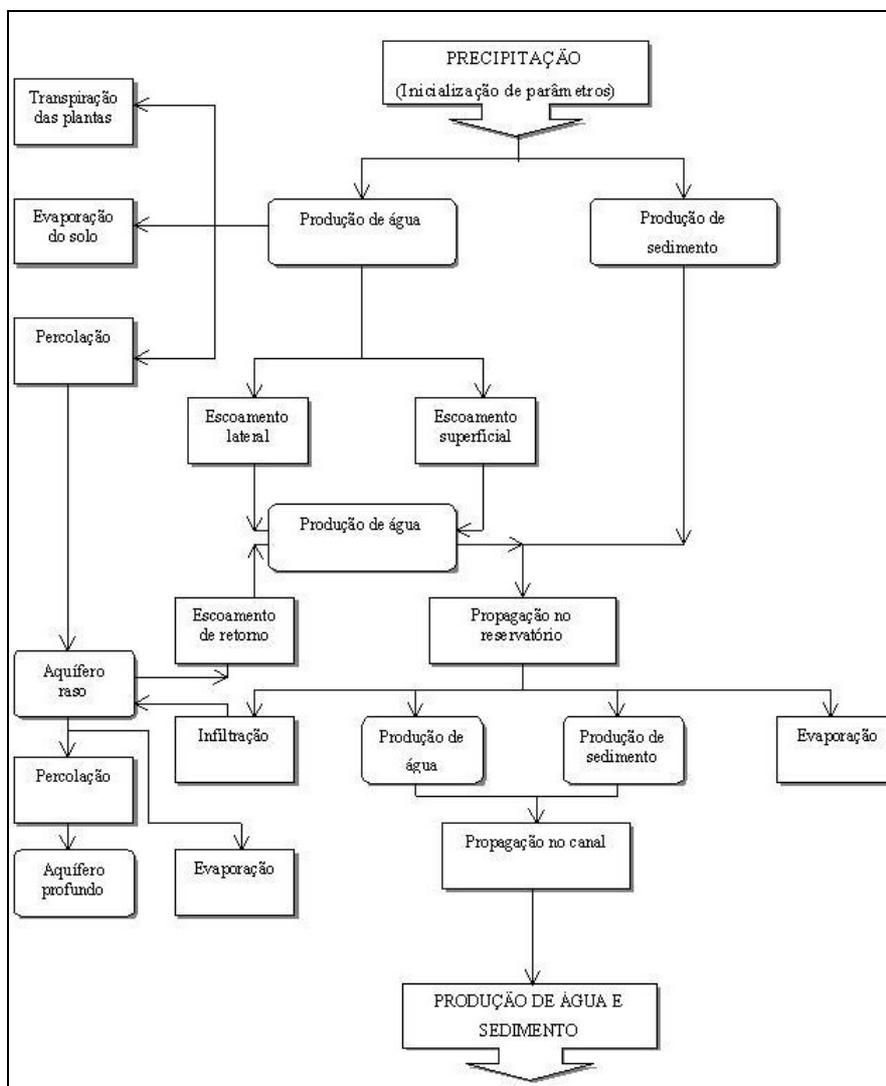


Figura 6 – Fluxograma de processamento do SWAT

3.2 Calibração e verificação da modelagem

A tabela 2 apresenta algumas informações acerca do monitoramento hidrossedimentométrico do rio Nhundiaquara e alguns de seus tributários. A bacia do rio Nhundiaquara possui no total cerca de 516 km². Observa-se pela tabela 2 que o monitoramento da bacia do Nhundiaquara soma 351 km², ou seja, cerca de 70% de sua área total.

A determinação dos parâmetros foi realizada da forma convencional, com a separação da série de dados em dois períodos, um destinado à calibração e outro à verificação. Os parâmetros foram ajustados de forma a aproximar satisfatoriamente os valores calculados dos valores observados na estação Morretes-Nhundiaquara. Os principais parâmetros de calibração adotados para a bacia a

montante deste local foram utilizados na bacia a jusante do mesmo. A tabela 3 reúne os períodos de calibração e verificação.

Tabela 2 – Monitoramento da bacia do rio Nhundiaquara

Monitoramento *	Rio monitorado	Início	Área de drenagem (km ²)
Estação Morretes (Cód. ANEEL: 82170000)	Nhundiaquara	ago/1938	214
Estação Morretes (Cód. ANEEL: 82195002)	Marumbi	set/1975	77
Estação Anhaia (Cód. ANEEL: 82198000)	Pinto	set/1975	60

Obs: * - Estação convencional: duas leituras diárias de nível realizadas por observador, mais medições de vazão e sedimentos em suspensão e de arraste periódicas.

Tabela 3 – Períodos de calibração e verificação adotados

Operação	Nhundiaquara
Calibração	01/09/1975 - 31/12/1991
Verificação	01/01/1992 - 30/06/2007

Como o objetivo do trabalho era simular as vazões líquidas e sólidas, somente os parâmetros relativos ao escoamento e sedimento foram ajustados e calibrados. A calibração dos modelos hidrossedimentométricos deve ser iniciada pelo escoamento, que é a parte básica do processo. Após ajustar valores para os parâmetros que influenciam mais acentuadamente o escoamento, deve-se iniciar a calibração do sedimento. De maneira geral, os parâmetros de escoamento são dominantes e controlam os resultados da simulação dos dados de sedimento e qualidade da água (GRIENSVEN *et al.*, 2006).

O modelo SWAT é sensível a muitas variáveis de entrada, variáveis estas relacionadas à vegetação, uso do solo, manejo da terra (práticas de conservação), clima, aquífero, canal e reservatório (ARNOLD *et al.*, 2000), sendo necessário primeiramente um conhecimento básico sobre os processos físicos envolvidos no sistema antes de se iniciar a calibração (DI *et al.*, 2003). Entretanto, conhecer a sensibilidade de cada parâmetro resulta em um dispêndio de tempo muito grande e a resposta dada pelo modelo não é igualmente sensível a todos estes parâmetros (LENHART *et al.*, 2002).

Para avaliar o desempenho do modelo SWAT em representar as condições hidrológicas e sedimentológicas da bacia estudada, dados diários de escoamento foram simulados e comparados com os dados observados nos períodos de calibração e verificação. Na avaliação efetiva do desempenho do modelo foi utilizado o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe, um método estatístico amplamente utilizado em hidrologia (MACHADO, 2002):

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{obs} - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_{obs} - \bar{E})^2} \quad (1)$$

onde E_{obs} é o valor do evento observado; E_s é o valor do evento simulado e \bar{E} é o valor médio do evento observado.

O coeficiente de Nash e Sutcliffe, também conhecido como coeficiente de eficiência (COE), pode variar de $-\infty$ a 1, sendo que $COE=1$ significa um ajuste perfeito. Valores de COE acima de 0,7 indicam um ajuste razoável. Cabe ressaltar que o coeficiente de Nash e Sutcliffe é tendencioso, pois é mais sensível aos erros nos valores máximos do que nos mínimos. Entretanto, como grande parte da carga de sedimentos está associada aos picos de vazão, a utilização deste coeficiente de eficiência é considerada adequada.

Paralelamente ao COE foram analisados o coeficiente de determinação R^2 (2), coeficiente de correlação R (3), erro de volume total EVT (4), além de comparados os valores estimados e observados de vazões sólidas e líquidas, obtidos para todo o período da série para as variáveis: média, valores mínimo e máximo, e desvio padrão.

$$R^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n (E_{obs} \cdot E_s) - (\sum_{i=1}^n E_{obs}) \cdot (\sum_{i=1}^n E_s)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n (E_{obs}^2) - (\sum_{i=1}^n E_{obs})^2] [n \sum_{i=1}^n (E_s^2) - (\sum_{i=1}^n E_s)^2]}} \quad (2)$$

$$R = \sqrt{R^2} \quad (3)$$

$$EVT = \frac{\sum_{i=1}^n (E_s) - \sum_{i=1}^n (E_{obs})}{\sum_{i=1}^n (E_{obs})} \quad (4)$$

Além da verificação estatística foram analisados métodos gráficos para avaliar a resposta do modelo ao espectro de valores adotados nos parâmetros de calibração.

3.2.1 Calibração da vazão líquida

No estudo foram calibrados os seguintes parâmetros, definidos através de análise de sensibilidade:

- 1) Coeficiente de compensação da evaporação do solo $Esco$;
- 2) Curva número II (solo úmido) $CN2$;
- 3) Interceptação vegetal máxima $CanMx$;
- 4) Declividade média do terreno Hru_Slp ;
- 5) Capacidade de água disponível no solo Sol_Awc ;

- 6) Condutividade hidráulica do solo saturado *Sol_K*;
- 7) Constante de recessão do escoamento de base *Alpha_Bf*;
- 8) Tempo de recarga do aquífero *Gw_Delay*;
- 9) Fração de percolação no aquífero profundo *Rchrg_Dp*;
- 10) Condutividade hidráulica efetiva do canal principal *Ch_K2*;
- 11) Coeficiente de Manning para o canal principal *Ch_N2*.

O parâmetro *Esco* é o fator de compensação da evaporação do solo, ajustando a distribuição da evaporação do solo nas diversas camadas de acordo com o efeito da ação de capilaridade. Quando o valor do parâmetro *Esco* é reduzido, significa que o modelo pode extrair mais água através da evaporação das camadas inferiores do solo.

O SWAT utiliza uma formulação modificada do Método da Curva Número CN do *Soil Conservation Service* (USDA, 1972) para calcular o escoamento superficial. O parâmetro *CN2* é o valor inicial da Curva Número do escoamento superficial para a condição de mistura II (solo úmido).

O parâmetro *CanMx* é a máxima quantidade de água da chuva interceptada pela vegetação plenamente desenvolvida, água esta, disponível para a evaporação sem atingir o solo. O parâmetro *Hru_Slp* é definido como uma média da declividade de cada HRU e influencia fortemente o escoamento superficial e a infiltração.

O parâmetro *Sol_Awc* controla a quantidade de água disponível na camada de solo, isto é, corresponde ao volume total de água disponível para as plantas quando o solo está na condição de capacidade de campo. A capacidade de água disponível é estimada através da determinação da quantidade de água liberada entre a condição de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente.

O parâmetro *Sol_K* relaciona o fluxo de água no solo com o gradiente hidráulico e se refere à facilidade do movimento da água através do solo.

No escoamento de base os parâmetros mais influentes são o *Alpha_Bf*, *Gw_Delay* e *Rchrg_Dp*. O *Alpha_Bf* é a constante de recessão do escoamento de base. O *Gw_Delay* regula o tempo de recarga do aquífero, sendo este o tempo necessário para a água atravessar a camada imediatamente abaixo da zona de raízes até chegar ao aquífero superficial. O parâmetro *Rchrg_Dp* regula a percolação da zona de raízes para o aquífero profundo.

Os parâmetros *Ch_K2* e *Ch_N2* regulam o escoamento dentro da calha do rio principal. O parâmetro *Ch_K2* relaciona o escoamento dentro da calha com o aquífero subterrâneo, categorizando o canal como fornecedor ou receptor de água deste sistema. O *Ch_N2* corresponde ao coeficiente de rugosidade *n* de Manning.

Estas alterações no banco de dados e nos parâmetros de calibração permitiram ao modelo

reproduzir de forma satisfatória as vazões líquidas observadas. A tabela 4 mostra a estatística de eficiência obtida para as vazões diárias e mensais (desconsiderando o período de aquecimento).

Tabela 4 – Coeficiente de eficiência das vazões líquidas

Operação	Escala	COE	R ²	R	Q _{obs}	Q _{calc}	ΔV (%)
Calibração	Diária	0,415	0,468	0,684	13,6	12,8	-6
	Mensal	0,807	0,652	0,807	13,6	12,8	-6
Verificação	Diária	0,531	0,537	0,733	13,9	13,6	-3
	Mensal	0,740	0,717	0,847	14,0	13,6	-3

Ocorreram muitas não correspondências entre a chuva média precipitada na bacia e a vazão observada, o que levou a dificuldades na simulação do modelo e sua respectiva estatística de desempenho. Ainda assim, analisando os diversos coeficientes e o volume de água é possível verificar que a diferença encontrada pode ser considerada aceitável. A título ilustrativo, a figura 7 apresenta as vazões médias mensais observadas e simuladas para toda a série da estação Morretes-Nhundiaquara, excetuando o período de aquecimento.

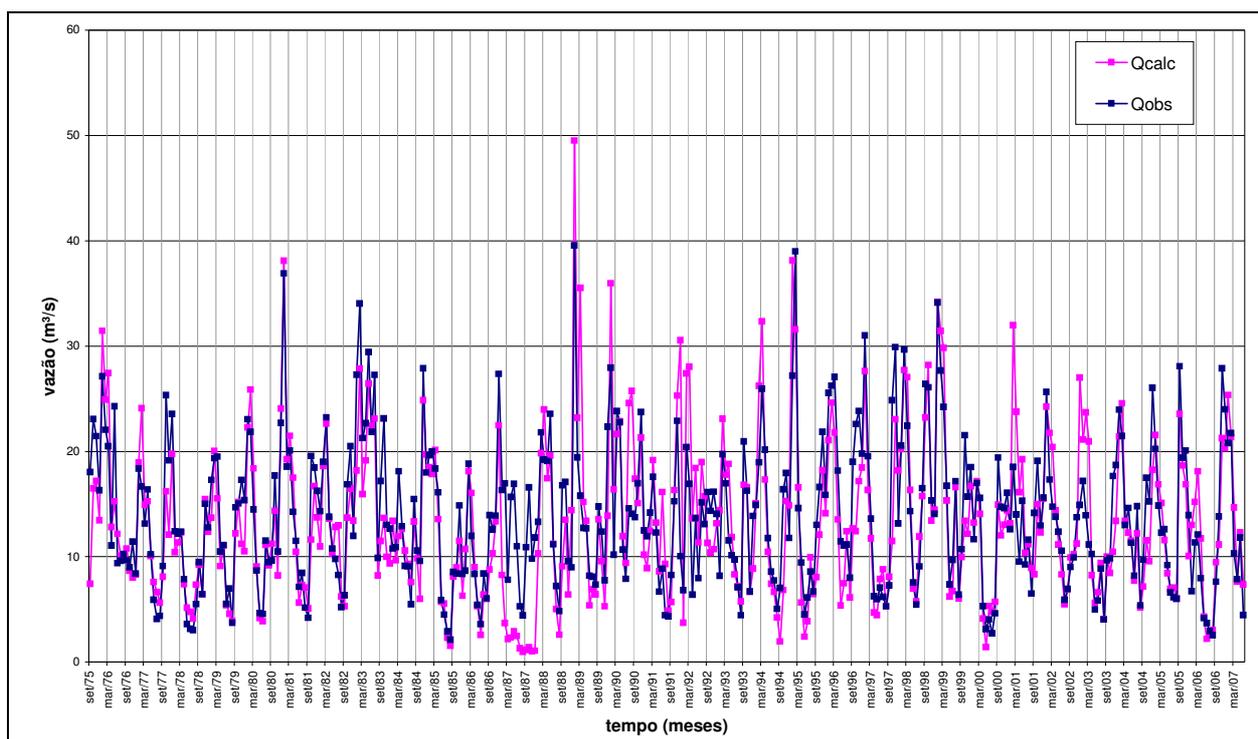


Figura 7 – Vazões mensais observadas e calculadas para a estação Morretes-Nhundiaquara

3.2.2 Calibração da vazão sólida

Após calibrada e validada a simulação do escoamento, foi realizada a calibração do modelo SWAT para a produção de sedimento. Neste trabalho foram calibrados os seguintes parâmetros,

determinados através de análise de sensibilidade:

- 1) Concentração de sedimentos no escoamento lateral e subterrâneo *Lat_Sed*;
- 2) Valor residual de cobertura *Rsdin*;
- 3) Curva número II (solo úmido) *CN2*;
- 4) Fator de cobertura do canal *Ch_Cov*;
- 5) Fator de erodibilidade do canal *Ch_Erod*.

Não se investigou no trabalho a calibração dos parâmetros referentes às práticas de conservação (*Usle_P*) e usos e manejo do solo (*Usle_C*), por não se tratar de bacia predominantemente agrícola.

O parâmetro *Lat_Sed* reflete a concentração de sedimentos no escoamento lateral e subterrâneo e que contribui para o canal principal. O parâmetro *Rsdin* representa o material residual depositado nos primeiros 10 mm do solo. Estes dois parâmetros não interferem de forma consistente na produção total de sedimentos.

O parâmetro *CN2*, valor inicial da Curva Número do escoamento superficial para a condição de mistura II (solo úmido), calibrado inicialmente para representar o escoamento foi ajustado à produção de sedimentos e é um dos mais influentes na produção sólida e líquida.

Foram também ajustados os parâmetros diretamente relacionados às características do canal, *Ch_Cov* e *Ch_Erod*. O parâmetro *Ch_Cov* representa o raio da degradação do canal com sua cobertura vegetal em relação ao canal destituído desta cobertura. A vegetação do canal afeta a degradação por reduzir a velocidade do fluxo e evitar o contato intenso com o material do leito. O parâmetro *Ch_Erod* é conceitualmente similar ao fator de erodibilidade do solo usado na equação USLE, sendo uma função de propriedades do material do leito e margens.

Efetuada as alterações na fase de calibração dos parâmetros acima especificados, foi realizada a validação do modelo segundo os períodos estabelecidos. A tabela 5 mostra a estatística de eficiência obtida para as vazões sólidas diárias e mensais (desconsiderando o aquecimento).

Tabela 5 – Coeficiente de eficiência das vazões sólidas

Operação	Escala	COE	R ²	R	Q _{obs}	Q _{calc}	ΔV (%)
Calibração	Diária	0,410	0,420	0,648	24,2	23,7	-2
	Mensal	0,936	0,629	0,793	728,6	715,1	-2
Verificação	Diária	0,524	0,486	0,697	24,7	25,2	2
	Mensal	0,921	0,697	0,835	750,0	765,7	2

A eficiência do modelo para reproduzir as vazões sólidas é da mesma ordem de grandeza da eficiência obtida para vazões líquidas, sendo que em termos de volume, os valores estimados e observados são bem próximos tanto na calibração quanto na verificação.

A figura 8 apresenta as vazões sólidas médias mensais observadas e simuladas para toda a série da estação Morretes-Nhundiaquara, excetuando o período de aquecimento.

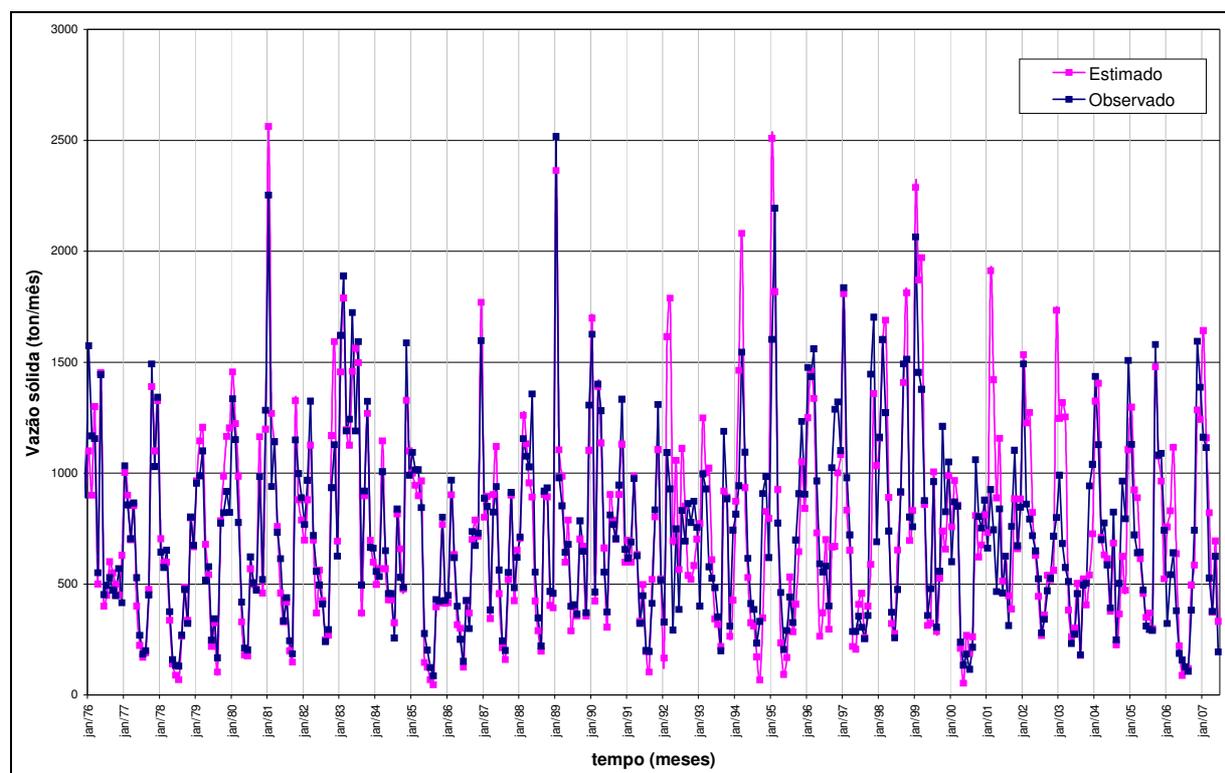


Figura 8 – Vazões sólidas mensais observadas e calculadas para a estação Morretes-Nhundiaquara

Em virtude dos valores da estatística de eficiência obtida para a produção hídrica e de sedimentos, considerou-se que os valores definidos para os parâmetros possuem precisão suficiente para a simulação dos cenários pretendidos.

3.3 Cenários analisados

O intuito da simulação dos cenários foi avaliar as variantes da ocupação da bacia, que eventualmente podem ocorrer no futuro, e confrontá-las com a Situação Atual e com o cenário de condições naturais (sem antropização), ocorrido no passado.

No presente estudo foram simulados, além da Situação Atual, os seguintes cenários:

- **Cenário Natural:** as áreas Agricultura e Pecuária foram substituídas por Florestas. Objetivo: representar a situação mais próxima possível da ocorrida no passado, quando as bacias hidrográficas possuíam a totalidade da vegetação no estado natural.
- **Cenário Pessimista:** todas as áreas, exceto Áreas Urbanas e Água, foram substituídas por Agricultura e Pecuária. Objetivo: fornecer um panorama global da efetiva importância das áreas de vegetação natural para o ambiente analisado através do alerta de qual seria o

impacto com a degradação total destas áreas.

- **Cenário Provável:** cerca de 25% da bacia foi considerada com uso de Agricultura e Pecuária. A cobertura natural das sub-bacias com áreas que indicam maior tendência de expansão das atividades de agricultura e pastagens foram completamente substituídas por este uso. Objetivo: fornecer a produção total de sedimentos para uma situação provável de ocorrer a médio prazo (em torno de 20 a 30 anos).

3.4 Resultados e discussões

A tabela 6 apresenta um resumo dos resultados das simulações da Situação Atual e dos Cenários realizadas através do modelo distribuído. Os valores correspondem aos volumes passantes pela foz dos respectivos rios e simulados para o período 1/01/1993 a 30/06/2007. São apresentados os valores resultantes para a área de drenagem total do rio Nhundiaquara, e a título de comparação são apresentados os valores sumarizados considerando todas as bacias simuladas no Projeto. Na última coluna são apresentadas as percentagens dos acréscimos de volume produzido de sedimentos simulados pelos Cenários em comparação com a Situação Atual.

Tabela 6 – Resultados na foz dos rios das bacias analisadas

Bacia	Cenário	Volume total água (hm ³)	Vazão média (m ³ /s)	Vazão específica (l/s/km ²)	Vol. total sedimentos (ton)	Vazão sólida média (ton/dia)	Vazão sólida específica (ton/dia/km ²)	% diferença volume de sedimentos
Nhundiaquara AD = 516 km ²	Atual	13670	29.89	57.93	364665	68.88	0.133	-
	Natural	13520	29.56	57.29	304401	57.50	0.111	-16.5
	Pessimista	12741	27.856	53.99	4547440	858.98	1.665	1147.0
	Provável	13447	29.40	56.98	617310	116.61	0.226	69.3
Todas as bacias AD = 1327 km ²	Atual	41636	91.03	68.60	988973	186.81	0.141	-
	Natural	41484	90.69	68.34	838548	158.40	0.119	-15.2
	Pessimista	40663	88.9	66.99	10684556	2018.24	1.521	980.4
	Provável	41391	90.49	68.19	1796362	339.32	0.256	81.6

Legenda: AD – Área de drenagem.

A título ilustrativo, a figura 9 apresenta os fluvio-sedimentogramas para o ano de 2000, considerando todas as situações simuladas para a bacia do rio Nhundiaquara.

Diferentemente da produção hídrica, a produção de sedimentos sofreu grandes alterações com as mudanças de usos do solo consideradas nos diferentes cenários.

Na Situação Atual, do aporte total de sedimentos para a Baía de Antonina, 37% advém do rio Nhundiaquara, valor semelhante à proporção entre áreas de drenagem.

Observa-se que o decréscimo na produção de sedimentos é alto (16,5%) ao se considerar a reconstituição de cerca de 5% de áreas urbanizadas ou agricultadas com vegetação natural. O fato de pequenas áreas antropizadas afetarem de forma muito significativa a produção de sedimentos está relacionado à fragilidade dos locais onde ocorreu a ocupação. As áreas utilizadas nestas bacias,

principalmente para a agricultura, estão situadas muito próximas aos cursos de água, bem como sobre aluviões, solos não consolidados e com sedimentos recentes.

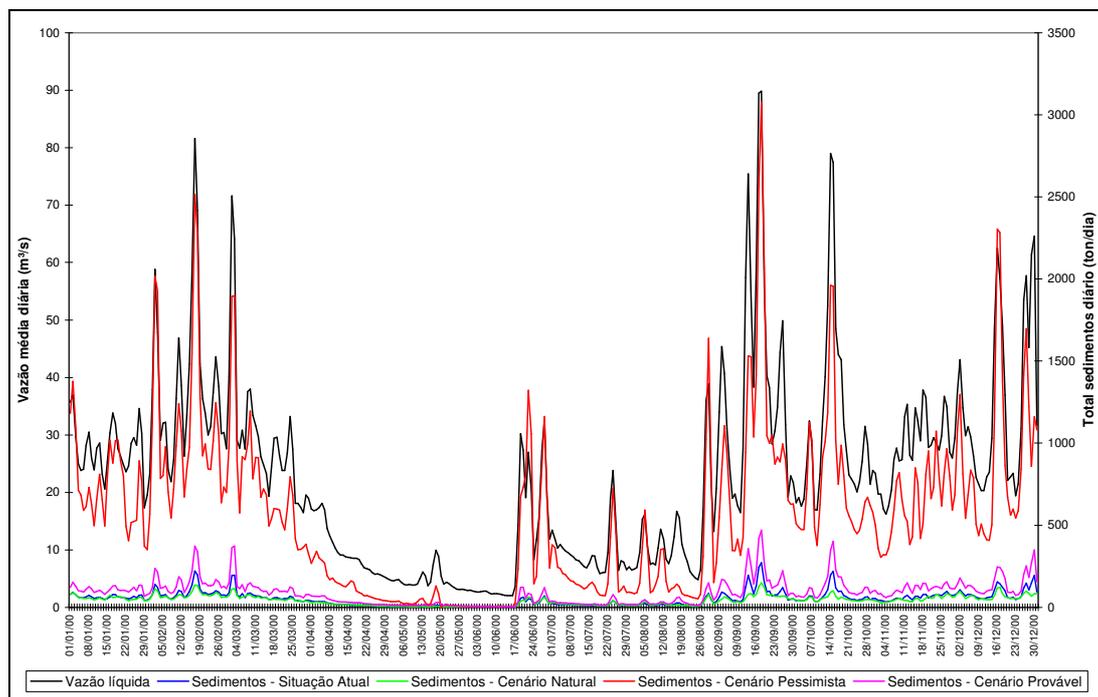


Figura 9 – Fluvio-sedimentogramas do ano 2000 para da bacia do rio Nhundiaquara

O Cenário Pessimista aumentou de forma considerável a produção de sedimentos em relação à Situação Atual, sendo que o acréscimo foi de cerca de 11 vezes.

No Cenário Provável, criado para simular uma situação possível de ocorrer a médio prazo, os resultados também mostraram a fragilidade da bacia, com acréscimo de volume de sedimentos igual a cerca de 69%. Cabe lembrar que os resultados para o Cenário Provável dependem não somente da proporção da área considerada, como também, em qual tipo de solo pode ocorrer a tendência de crescimento da agricultura e pecuária, características do relevo e distância aos cursos de água.

É importante destacar que, muito provavelmente, a influência da antropização obtida está um pouco subestimada devido à impossibilidade na época, de ter acesso a dados mais recentes de uso do solo.

4 CONCLUSÕES

Para entender o processo de produção e transporte de sedimentos que ocorre nas bacias hidrográficas e seus canais é necessário analisar todos os fatores que possam de alguma forma atuar sobre este processo. Sob este enfoque o modelo SWAT é adequado para analisar este fenômeno visto que permite a inserção das informações mais relevantes para esta avaliação.

As simulações de diferentes cenários na modelagem distribuída mostraram que, para uma bacia relativamente antropizada, como a do rio Nhundiaquara, houve grandes alterações na produção de sedimentos entre a situação atual de uso dos solos e um cenário que buscou reproduzir o passado. Este fato ressalta a fragilidade das bacias litorâneas que contornam a Baía de Antonina, reforçando a necessidade de urgência na adequada gestão econômica e ambiental destes locais. Considerando-se uma visão mais pessimista, na qual toda a vegetação seria substituída por agricultura e pastagens, os resultados indicaram os graves problemas que toda a região sofrerá em termos de assoreamento, pois a produção de sedimentos apresentou um acréscimo de muitas vezes ao que hoje se verifica para o rio Nhundiaquara.

Apesar das análises estarem condicionadas a diversas limitações, sua função mais relevante reside no confronto relativo entre as situações simuladas. Sob este aspecto, acredita-se que as modelagens atingiram os objetivos propostos de indicar a problemática do transporte de sedimentos e podem auxiliar na tomada de futuras decisões e medidas mitigadoras para esta área de vital importância para a economia e desenvolvimento do Estado do Paraná.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à COPEL, que contratou a pesquisa, ao Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná, que gentilmente forneceu alguns dados para o projeto e à SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, que instalou e operou as estações hidrométricas contratadas pela COPEL.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. (2000). “*Regional estimation of base flow and groundwater recharge in Upper Mississippi river basin*”. Journal of Hydrology, v.227, p.21-40.

DI, J.; GUHA, A.; SACKFIELD, C. (2003). *SWAT 2000 Model Review part II*.

GRIENSVEN, A. V.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M. & SRINIVASAN, R. (2006). “*A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models*”. Journal of Hydrology, v.324, p.10-23.

LACTEC – INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO. (2007). *Estudo da influência da usina Governador Parigot de Souza no processo de assoreamento da Baía de Antonina - Relatório final*. Curitiba: LACTEC. Relatório Técnico.

LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHER, N. FREDE, G-G. (2002). “*Comparison of two different approaches of sensitivity analysis*”. Physics and Chemistry of the Earth. v.27, p.645-654.

MACHADO, R. E. (2002). *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. Tese de doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINITY, J. R.; WILLIAMS, K. W. K. (2002). *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2000*. Grassland, Soil & Water Research Laboratory, Texas. Blackland Research and Extension Center.

PAULA, E. V.; CUNICO, C.; GLUFKE, D.; LIMA, I. L. (2005). *Contaminantes, Assoreamento, Dragagem / Hidrodinâmica e Biota Aquática da Baía de Antonina: Caracterização Físico-Geográfica e Biológica da Baía de Antonina e Bacias de Dragagem*. Curitiba: ADEMADAN. Relatório Técnico.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E. & LAUTERT, L. F. (2001). *Hidrometria aplicada*. LACTEC, Curitiba.

USDA - U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (1972). Soil Conservation Service. Hydrology. National Engin. Handb. Washington: USDA.