



APRH

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS
NUCLEO REGIONAL DO SUL

DEBATE
RIO GUADIANA
PASSADO PRESENTE FUTURO

**MODELAÇÃO HIDROLÓGICA EM SUB-BACIAS DO RIO
GUADIANA**

Fernanda Gomes
Teresa Álvares
Teresa Pimenta
João Ribeiro da Costa

MODELAÇÃO HIDROLÓGICA EM PEQUENAS BACIAS DE ALBUFEIRAS UTILIZANDO O MODELO AGNPS

Gomes F.*; Álvares T*.; Pimenta T.*; Ribeiro da Costa J.**

* INAG - Instituto da Água, Direcção de Serviços Recursos Hídricos

Av. Almirante Gago Coutinho, 30 - 13 Piso

1000 LISBOA

** Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre

2825 Monte de Caparica

Resumo: A integração dos modelos hidrológicos num Sistema de Informação Geográfica (SIG), alarga consideravelmente o âmbito das suas aplicações, nomeadamente em termos de calibração e análise de sensibilidade, contribuindo deste modo para uma melhor compreensão dos fenómenos naturais. A integração do modelo AGNPS no sistema GRASS é um bom exemplo deste tipo de ferramentas.

Na perspectiva da implementação de novas ferramentas de estudo e planeamento hidrológico, o INAG iniciou um projecto de modelação hidrológica em que se testa a aplicação destas ferramentas, em casos concretos em Portugal, mais precisamente em três bacias hidrográficas de pequenas albufeiras situadas na Bacia do Guadiana: as bacias da Abegoaria, da Tinoca e do Cabaço.

Nesta comunicação discute-se a metodologia utilizada, apresentando-se a sua aplicação ao caso da Abegoaria. Numa primeira fase faz-se a caracterização hidrológica e biofísica, que termina com o cálculo do *curve number* (CN). Numa segunda fase visualiza-se o SIG para a área em estudo, começando pela geração do modelo digital do terreno, cálculo de cartas derivadas, como o declive e o aspecto e, elaboração das restantes cartas necessárias para fazer a simulação hidrológica do escoamento e erosão.

1- ANTECEDENTES

Os modelos são uma ferramenta fundamental no diagnóstico dos problemas ambientais e na avaliação de soluções correctivas. Ao passar do campo das aplicações teóricas ou experimentais para a aplicação prática, com o objectivo específico de realizar tarefas bem definidas, encontram-se múltiplas dificuldades, nomeadamente em termos de existência, fiabilidade e custo dos dados necessários.

Consciente do papel que os modelos podem ter enquanto ferramenta de estudo e planeamento hidrológico, e da necessidade de implementar procedimentos claros e bem documentados para passar da teoria à prática, o INAG incluiu no plano de actividades da Direcção de Serviços de Recursos Hídricos um projecto de implementação e teste de modelos hidrológicos distribuídos em bacias de pequenas dimensões, com vista à avaliação da erosão hídrica e sedimentação em albufeiras. Estes projectos são realizados em colaboração com outras entidades, nomeadamente a UNINOVA e o IST.

2- MODELOS E SIG'S

Os modelos hidrológicos distribuídos permitem aplicar os algoritmos de cálculo a unidades espaciais bastante reduzidas, permitindo assim captar a variabilidade espacial natural, nomeadamente em termos de topografia, tipo de solo e usos do solo. A primeira vantagem deste tipo de modelos é o seu potencial em fornecer simulações mais precisas do sistema a ser modelado. A segunda vantagem é a sua capacidade para, simultaneamente, simular a situação em todos os pontos dentro da bacia, o que permite simular processos que mudam espacial e temporalmente ao longo desta.

Apesar das suas vantagens evidentes, a aplicação dos modelos hidrológicos distribuídos depara-se sempre com a dificuldade na preparação dos dados de entrada devido ao enorme volume envolvido. A ligação destes modelos aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) parece a forma mais evidente de superar esta dificuldade. Nos últimos dois anos surgiram múltiplas aplicações neste campo, sobressaindo como SIG's com maior potencial para este fim o GRASS (CERL 1993) e o Arc/Info (ESRI 1994).

As vantagens desta integração são múltiplas: i) facilita a preparação dos dados, permitindo uma maior resolução espacial e um maior rigor na entrada de dados; ii) abre novos horizontes em termos de calibração, verificação e análise dos resultados do modelo; iii) permite fazer uma análise de sensibilidade adequada; iv) dá imediatamente um meio de apresentação dos resultados sem paralelo, para integração em equipas pluridisciplinares. Este conjunto de ferramentas (modelos integrados em SIG) afigura-se bastante promissor, sendo de fácil implementação no dia-a-dia, desde que sejam definidos procedimentos de utilização. Um dos

primeiros exemplos deste tipo de ferramenta é a integração do modelo AGNPS (Agricultural Nonpoint Source) no GRASS.

3- O MODELO AGNPS/GRASS

O Sistema GRASS

O sistema GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) é um SIG *raster* com capacidades gráficas (2D e 3D) e ferramentas de análise espacial poderosas. Foi inicialmente desenvolvido como um projecto do U.S. Army, contando com inúmeras contribuições de universidades e instituições de investigação. Para além das capacidades de processamento, este sistema é bastante atractivo por disponibilizar o código dos programas, permitindo assim ao utilizador alterá-lo para adequar a casos concretos.

O modelo AGNPS

O modelo AGNPS foi desenvolvido pelo Agricultural Research service (ARS) em cooperação com Minnesota Pollution Control Agency e Soil Conservation Service (SCS) (Young 1989). Mais tarde viria a ser integrado no ambiente GRASS na Universidade de Purdue (Engels 1992).

É um modelo de simulação hidrológica, capaz de simular o escoamento, erosão e poluição difusa numa bacia hidrográfica. Trata-se de um modelo discreto, simulando a resposta da bacia a uma chuvada significativa, e distribuído, dividindo a bacia em células de cálculo elementares. As características de escoamento e processos de transporte de sedimentos e nutrientes, são simulados em cada célula e transportados para o ponto terminal da bacia. Esta abordagem permite calcular o escoamento, a erosão e a poluição difusa em qualquer ponto da bacia.

Os componentes básicos do modelo são: hidrologia; erosão; transporte de sedimentos; transporte de azoto e fósforo; e carência química de oxigénio (CQO). O modelo funciona com base em 22 parâmetros.

Cálculo do volume do escoamento

O cálculo do escoamento no AGNPS baseia-se na aplicação do método do Número de Escoamento (Curve Number), desenvolvido pelo Soil Conservation Service (U.S.D.A. 1972, 1975), (Srinivasan 1991). Este método sintetiza as características hidráulicas da bacia, num parâmetro único: o número de escoamento, CN, descrevendo o tipo e uso do solo, as práticas agrícolas e as condições hidrológicas do solo. O cálculo do CN é obviamente o ponto crítico da simulação (Chow et al, 1989).

A integração do AGNPS no GRASS permite discretizar o cálculo do CN para cada uma das células de cálculo, aumentando assim o rigor na sua determinação. O cálculo é feito com base em quatro cartas: tipo de solo, uso do solo, práticas agrícolas e condição hidrológica do solo.

Determinado o CN o modelo procede ao cálculo do escoamento, aplicando a equação:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1)$$

em que

Q = volume de escoamento (mm)

P = precipitação (mm)

S = parâmetro de retenção (mm)

O parâmetro de retenção S é definido com base no CN, por:

$$S = \frac{1}{CN} - 10 \quad (2)$$

Cálculo do Caudal de Ponta

Para além do volume total da cheia o AGNPS/GRASS determina ainda o caudal de ponta usando a relação empírica proposta por Smith e Williams (Young 1989):

$$Q_p = 3.79 A^{0.7} CS^{0.16} (RO/25.4)^{(0.903 A^{0.017})} LW^{-0.19} \quad (3)$$

em que:

Q_p = caudal de ponta (m³/s)

A = área de escoamento (km²)

CS = declive do canal (m/km)

RO = volume de escoamento (mm)

LW = razão comprimento/largura da bacia

Cálculo da Erosão

De forma consistente com a adoptada para a hidrologia, o AGNPS utiliza um método agregado empírico para o cálculo da erosão, uma forma modificada da equação universal da perda de solo, USLE (Young 1989). A erosão é calculada para cada um dos eventos como:

$$SL = (EI) KLSCP (SSF) \quad (4)$$

em que:

SL = perda de solo (ton/acre)

EI = produto da energia cinética pela intensidade máxima em 30 minutos, de cada acontecimento pluviométrico (ton/acre)

K = factor de erodibilidade do solo

LS = factor fisiográfico

C = factor de uso do solo

P = factor de práticas agrícolas

SSF = factor de ajustamento da forma da encosta em cada célula (uniforme, convexo e concavo)

Cálculo do transporte e concentração de sedimentos

Os sedimentos são subdivididos em 5 classes de partículas - limo, argila, pequenos agregados, grandes agregados e areia. O procedimento utilizado envolve transporte de sedimentos e relações de deposição, que são descritas por Foster et al e por Lane (Young 1989). A equação básica de dispersão é derivada da equação de continuidade do estado de equilíbrio:

$$Q_s(x) = Q_s(0) + Q_{sl}(x/L_r) - D(x) w dx \quad (5)$$

em que:

$Q_s(x)$ = descarga de sedimentos a jusante do ponto inicial (kg/s)

$Q_s(0)$ = descarga de sedimentos na origem (kg/s)

Q_{sl} = entrada lateral de sedimentos (kg/s)

x = distância (m)

L_r = comprimento de chegada (m)

w = largura do canal (m)

$D(x)$ = taxa de deposição (kg/s.m^2)

Cálculo do transporte e concentração de nutrientes

A componente de transporte químico do modelo faz estimativas do transporte de azoto, fósforo e carência química de oxigénio ao longo da bacia. As relações utilizadas para calcular o transporte químico foram adaptadas a partir do modelo CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) e de um modelo de avaliação de "feedlots", com modificações devido aos efeitos de variação da textura do solo (Young 1989).

Os cálculos são divididos em duas fases: fase líquida e fase adsorvida aos sedimentos. Na estimativa de azoto (N) e fósforo (P) solúvel, consideram-se os efeitos da concentração de nutrientes nas águas pluviais, na incorporação de fertilizantes e no processo de lixiviação. A concentração de nutrientes na fase de adsorção aos sedimentos é calculada usando o seu teor no solo e a concentração total de sedimentos na célula. No modelo o CQO é considerado solúvel e o seu cálculo é baseado nos volumes de escoamento e na sua concentração média.

A equação básica utilizada nos cálculos de previsão das concentrações do N e P solúvel no escoamento é a seguinte:

$$RO = C E Q 0.01 \quad (6)$$

em que:

RO = concentração de N ou P no escoamento (mg/l)

C = concentração média do nutriente solúvel na superfície do solo durante o escoamento (mg/l)

E = coeficiente de extracção do movimento para o escoamento

Q = escoamento total (mm)

4 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA À BACIA DA ALBUFEIRA DA ABEGOARIA

Introdução

Considerando que a utilização de modelos sem dados de campo suficientes para proceder a uma calibração e verificação rigorosas, pode apenas ser um exercício de computação, o teste da aplicabilidade desta metodologia em Portugal passa em primeiro lugar pela criação de bacias experimentais, onde se possa dispôr dos dados necessários para a sua aplicação.

Nesta perspectiva, a equipa de trabalho seleccionou três bacias de albufeiras de pequenas dimensões: as bacias da Abegoaria, Tinoca e Cabaço. Nesta comunicação, discute-se a aplicação à bacia da Abegoaria, analisando cada um dos passos da metodologia.

Caracterização Hidrológica

A caracterização hidrológica é o primeiro passo para a aplicação do modelo. Pretende-se nomeadamente fazer uma caracterização da precipitação, começando pelo enquadramento a nível anual, e passando depois para a caracterização das precipitações intensas.

A selecção das estações pluviométricas para o estudo foi feita com base em 3 critérios:

- 1) critério de proximidade: considerando-se que para este tipo de estudo, de características locais, se deveriam utilizar estações localizadas num raio inferior a 40 km;
- 2) critério morfológico: considerando-se que postos localizados em pontos com características morfológicas completamente distintas não deveriam ser considerados;
- 3) critério de disponibilidade de dados: considerando-se que são necessários pelo menos 30 anos de medição para dispôr de uma caracterização efectiva da precipitação.

Quadro I - Selecção das estações consideradas válidas.

Código	Nome da estação	Tamanho da série	Nº de falhas	Resultado
24N/01	Amareleja INAG	42	0	Aceite
24N/02	Amareleja IM	27	2	Rejeitada
24L/01	Amieira	41	0	Aceite
23L/01	Reguengos Monsaraz	42	0	Aceite
23M/02	Ponte Mourão	41	1	Rejeitada
22M/02	Foro Espanhol	12	1	Rejeitada

Da aplicação destes critérios resultou a escolha de 6 estações, que foram depois sujeitas a um processo de validação semelhante ao adoptado em Costa et al 1993. Este inclui análise directa da série, análise da estabilidade da média ao longo do tempo, dupla acumulação com a média das estações válidas, análise do histograma e análise estatística. Foram consideradas válidas as estações Amareleja INAG, Amieira e Reguengos de Monsaraz. Dada a sua proximidade da bacia a estação da Amareleja é tomada como referência.

A caracterização hidrológica foi feita em três escalas temporais: anual, mensal e diária. À escala anual fez-se uma análise estatística simples, baseada no histograma da série, nos parâmetros estatísticos básicos e na curva de probabilidades empírica. À escala mensal fez-se uma análise dos valores mês a mês, na dupla perspectiva da verificação da variabilidade dentro do ano e da validação dos dados.

Como o AGNPS se baseia em precipitações em 24 horas, o estudo incidiu sobretudo nas precipitações diárias intensas. Foi feita uma primeira recolha de todos os eventos de precipitação intensa, considerando o valor de 10 mm como o limiar para precipitação intensa. Uma análise destes valores mostra que há forte ocorrência de fenómenos com duração superior a um dia, podendo mesmo os dois maiores valores de precipitação ocorrer em dias seguidos. Este facto levou ao abandono da abordagem por limiares de precipitação intensa.

A caracterização das precipitações intensas foi assim feita com base no máximo diário em cada ano. O processamento estatístico destes valores para as estações consideradas válidas, deu resultados bastante consistentes, não havendo diferenças significativas entre as 3 estações (Figura 1). Como se pode verificar não ocorreram precipitações diárias superiores a 90 mm, verificando-se que 90% dos eventos são inferiores a 60 mm.

Para além do valor da precipitação diária é ainda necessário determinar a energia cinética da precipitação EI30. Este cálculo é feito evento a evento, com base na análise do respectivo udograma.

Caracterização biofísica

A bacia da Abegoaria, com uma área de 3,03 km², situa-se no interior do Alentejo, entre Mourão e Granja. A caracterização biofísica inicial foi feita com base na cartografia à escala 1:25 000 e, nas fotografias aéreas Infra-Vermelho falsa cor de 1992 (ACEL). Considerando que esta escala não tem a precisão suficiente em termos de altimetria, optou-se pela utilização da carta à escala 1:5.000 do Instituto Português de Cartografia e Cadastro.

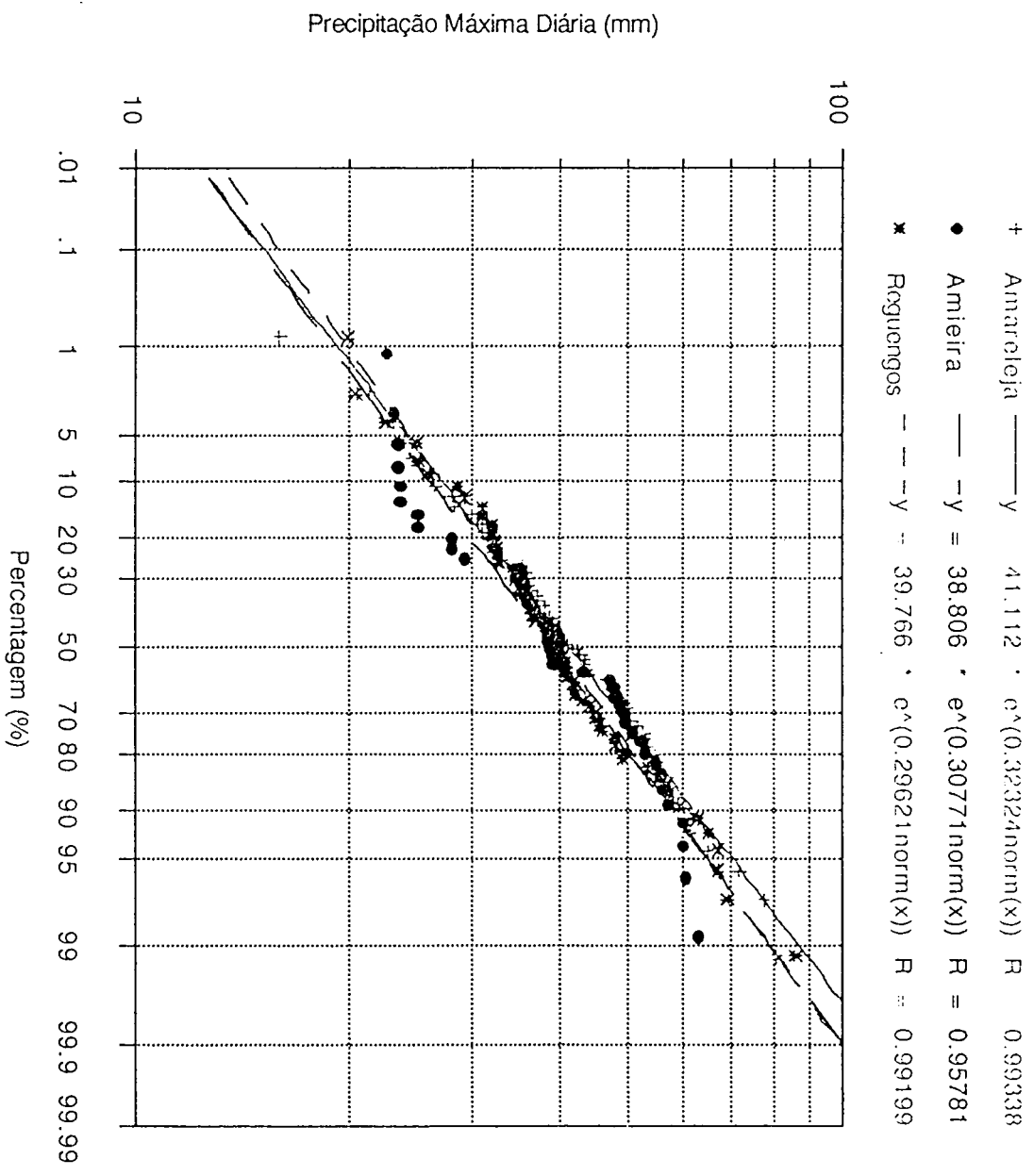


Fig. 1 - Curva de probabilidades da precipitação máxima diária das 3 estações válidas.

As cartas foram digitalizadas e carregadas em GRASS, constituindo os seguintes temas base: altimetria, tipo de solo, uso do solo e hidrografia. Foram realizados trabalhos de campo para verificação da morfologia e práticas agrícolas na bacia, levantamento das características dos canais e validação dos usos do solo. Verificase que predominam os solos mediterrânicos vermelhos (Pc) e solos calcários pardos (Vc); o uso do solo é quase exclusivamente culturas arvenses de sequeiro (Ca). Nos quadros seguintes apresentam-se os principais tipos de solo e, os diferentes usos do solo, pelas respectivas áreas.

Quadro II - Uso do solo na bacia da Abegoaria

Culturas	Área (ha)
Ca	274.8
Ic+Ca	13.9
Ol	3.6

Quadro III - Tipo de solos na bacia da Abegoaria

Solos	Área (ha)
àrea social	1.9
Ex+Arx	17.1
Pac+Vcm	33
Pcx	36.1
Px	16.3
Vc+Vcm	31.1
Vcm+Pac	33.2
Vcm+Pac+Vc	19.8
Vcm+Pac+Vct	22.1
Vcx+Vcm	52.4

A construção do modelo digital de terreno (DTM), foi precedida de testes dos diferentes métodos, tendo sido seleccionado um método baseado em interpolação dos pontos cotados (comando GRASS s.surf.tps). Uma vez construído o DTM, o GRASS calcula a hidrografia, limites da bacia, declives e orientação de encostas. Da análise destas cartas constata-se que a altitude média da bacia da Abegoaria é cerca de 180.8 metros, e o declive médio 4.8 (%).

A partir destas cartas base e dos dados recolhidos no trabalho de campo foram produzidas os 8 mapas indispensáveis para iniciar o processo de simulação no GRASS/AGNPS, (Quadro IV). A partir destes mapas o sistema elabora os 22 mapas necessários para fazer uma simulação de AGNPS, (Quadro V). Cada um destes mapas é analisado em pormenor, para introduzir potenciais correcções, com base nomeadamente na informação recolhida no campo.

Quadro IV - Mapas de base para simulação AGNPS

MAPA	ORIGEM
1. solos	carta complementar de solos (1:25000)
2. elevação	pontos cotados da carta 1:5.000 IPPC
3. uso do solo	fotografia aérea 1:15000
4. práticas agrícolas	fotografia aérea + levantamento local
5. níveis de fertilizantes e nutrientes	levantamento de campo
6. tipo de maquinaria utilizada	levantamento de campo
7. declive do canal	levantamento de campo
8. factor do comprimento do declive	levantamento de campo

Quadro V - Elementos de entrada do modelo

Mapa	Origem
1. numero da célula	calculado pelo GRASS/AGNPS
2. numero da célula para a qual drena cada célula	calculado pelo GRASS/AGNPS
3. SCS "número de escoamento"	calculado pelo GRASS/AGNPS
4. declive médio (%)	calculado a partir do DTM
5. factor de forma do declive	calculado pelo GRASS/AGNPS
6. comprimento médio da encosta	calculado pelo GRASS/AGNPS
7 declive médio do canal	preparado a partir de trabalho de campo
8. factor de forma do comprimento	calculado pelo GRASS/AGNPS
9. coef. de rugosidade de Manning's do canal	corrigido com base no trabalho de campo
10. factor K	calculado pelo GRASS/AGNPS
11. factor C	calculado pelo GRASS/AGNPS
12. factor P	calculado pelo GRASS/AGNPS
13. condições da superfície do solo	preparado com base no mapa de usos de solo e no trabalho de campo
14. exposições	calculado a partir do DTM
15. textura do solo (areia, argila, limo)	preparado com base na informação dos solos

16. nível de fertilizante	preparado com base na carta de ocupação e nas informações recolhidas no campo
17. factor de incorporação	idem
18. mapa das fontes de poluição pontual	não existem significativas
19. nível ravinas de origem	calculado pelo GRASS/AGNPS
20. factor de carência química de oxigénio	não usado de momento
21. factor de empocamento	elaborado com base no levantamento local e na análise do DTM
22. indicador do canal	idem

Simulação

Uma vez elaborados os mapas de base para a simulação é necessário definir o evento de precipitação a simular, em termos de quantidade da precipitação e erosividade. O cálculo de índice de erosividade, EI_{30} , é efectuado, dividindo a chuvada em períodos de intensidade constante, para os quais se calcula a energia cinética (Wischmeier et al 1978).

Uma vez criados todos os mapas de base e definidas as características do evento de precipitação procede-se à *corrida* do modelo. Os resultados são armazenados num ficheiro próprio, podendo depois ser analisados no contexto do GRASS.

Os resultados dividem-se em espaciais e tabulares. Os primeiros são representáveis sob a forma de mapas; os segundos dão as características principais do evento. No Quadro VI apresenta-se a lista dos resultados.

Quadro VI - Informação produzida pelo modelo

TIPO	TEMA	DESCRIÇÃO
tabular	hidrologia	volume do escoamento superficial
tabular		caudal de ponta
mapa		fracção do escoamento gerado dentro da célula
tabular		sedimentos produzidos
tabular	sedimentação	concentração de sedimentos
tabular		distribuição dos sedimentos por fracção
mapa		erosão produzida a montante
tabular		percentagem depositada
mapa		sedimentos gerados dentro da célula
mapa		taxa de sedimentação de cada célula
mapa		taxa de erosão de cada célula

O ano de 1989 foi tomado como caso de simulação, dada a ocorrência de uma série de eventos pouco usuais nos primeiros meses do ano. Neste momento, está-se a proceder aos primeiros testes de simulação, para verificar a validade de cada um dos 22 mapas de entrada.

5 - FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Implementado o modelo e o sistema de informação geográfica, o trabalho no futuro próximo centrar-se-á em 4 pontos cruciais:

- 1) instrumentação das bacias experimentais, para permitir a recolha de dados rigorosos para calibração e verificação dos modelos;
- 2) trabalho de campo para obter os dados necessários;
- 3) calibração e verificação dos modelos e reajuste do trabalho de campo em função dos resultados;
- 4) definição e documentação dos procedimentos de cálculo.

Não é por acaso, que os dois primeiros pontos dizem respeito a trabalho de campo. Como se afirmou de início, a aplicação deste tipo de modelos sem a existência de dados experimentais fidedignos não passa de um exercício computacional. Prevê-se por isso, um esforço considerável na instalação de instrumentos nas bacias seleccionadas, seguindo os princípios definidos no âmbito do Projecto COVEPLAM / MEDSPA (Gamboa, Santos 1994).

A calibração e verificação dos modelos deve seguir-se passo a passo com a recolha de dados, criando um processo de *feed-back*, que permite validar os dados e melhorar progressivamente quer os modelos quer as técnicas experimentais.

Para passar da fase experimental para a fase de aplicação rotineira destas metodologias, é necessário definir claramente os procedimentos técnicos, documentando-os por forma a que qualquer técnico, com a formação adequada, possa produzir o mesmo tipo de resultados, no mesmo espaço de tempo e com os mesmos meios.

6 - BIBLIOGRAFIA

Costa et al 1993 - Caracterização hidrológica sumária da bacia do Guadiana. Relatório MEDSPA / COVEPLAM, DGA, Lisboa.

Engel B. A., Srinivasan R., and Rewerts C. - A Spatial Decision Support System for Modelling and Managing Agricultural Non-point Source pollution. Agricultural Engineering Department, Purdue University.

Gamboa, Santos 1994 - O Papel do Coberto Vegetal no Planeamento Ambiental Mediterrânico: bacias experimentais. Relatório MEDSPA / COVEPLAM, DGA, Lisboa.

Srinivasan R., Arnold J. G. 1993 - Basin Scale Water Quality Modelling Using GIS. Associate Agricultural Engineering.

Srinivasan R., Engel B. A. 1992 - GIS: A Tool for Sensitivity Analysis of Nonpoint Source Pollution Model. 1992 International Summer Meeting sponsored by The American Society of Agricultural Engineers.

Srinivasan R., Engel B. A. 1991 - GIS: A Tool for Visualization and Analyzation. 1991 International Summer Meeting sponsored by The American Society of Agricultural Engineers.

Srinivasan R., Engel B. A. 1991 - A Knowledge Based Approach to Extract Input Data From GIS. 1991 International Summer Meeting sponsored by The American Society of Agricultural Engineers.

Srinivasan R., Engel B. A. 1991 - GIS Estimation of Runoff Using the CN Technique. 1991 International Summer Meeting sponsored by The American Society of Agricultural Engineers.

Young R. A., and Onstad C. A.. 1987 - AGNPS, Agricultural Non-Point-Source Pollution Model - A Watershed Analysis Tool. United States Department of Agriculture, Conservation Research Report 35.

Young R. A., and Onstad C. A.. - AGNPS: A Tool for Watershed Planning. Agricultural Research Service, North Central Soil Conservation Research Laboratory.

Young R. A., Onstad C. A., Bosch D.D., and Anderson W. P. 1989 - AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. Journal of Soil and Water Conservation.

U.S.Department of Agriculture 1972 - Engineering Handbook. Soil Conservation Service, Washington.

U.S.Department of Agriculture 1975 - Urban Hydrology for small watersheds. Soil Conservation Service, Washington.