

INFLUÊNCIA DO AUMENTO DA ÁREA URBANA NO REGIME HIDROLÓGICO DE PEQUENAS RIBEIRAS

The Influence of the Increase of the Urban Area on the Hydrologic Regime of Small Urban Rivers

PAULO MONTEIRO ⁽¹⁾, DANIEL MELO E SILVA ⁽²⁾, ANA CRISTINA PADILHA ⁽³⁾ e TIAGO GOMES ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Professor Auxiliar, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, psm@fe.up.pt

⁽²⁾ Mestre em Engenharia do Ambiente, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, Daniel.melo1@gmail.com

⁽³⁾ Pós-graduação em Engenharia do Ambiente, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, acfp@fe.up.pt

⁽⁴⁾ Bolseiro de Investigação, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, tfgg@fe.up.pt

Resumo

A crescente pressão a que os recursos hídricos estão submetidos tem particular expressão em meio urbano e encontra-se associada a factores como os resultantes do crescimento populacional e da consequente artificialização dos solos. Com a modelação efectuada pretende-se simular regimes hídricos, assim como determinar as áreas de risco e áreas inundáveis para diferentes cenários resultantes das alterações introduzidas pelo aumento da área urbana.

Na presente comunicação apresenta-se a metodologia utilizada para determinar os regimes hidrológicos e a influência da urbanização na ribeira de Valadares, Vila Nova de Gaia. O estudo teve como base uma plataforma SIG de gestão das bases de dados cartográficas e numéricas. Os resultados obtidos comparam o cenário existente em 1964 com o de 2005.

As ferramentas utilizadas permitirão a construção de cenários para avaliar alterações urbanísticas introduzidas e disponibilização de informação relativa ao efeito prático de possíveis medidas que venham a ser implementadas.

Palavras-chave: Recursos hídricos; modelação hidrológica; modelação hidráulica; Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Abstract

Valadares river basin is an ungauged small coastal and perennial watershed located at Vila Nova de Gaia Municipal suburban area, northern Portugal. Given its geography and increased floodplain occupation by urban infrastructures, water management, especially during intense precipitation events, as become problematic in recent years. This study presents the results of a basin scale rainfall-runoff modelling of Valadares basin using hydrologic model HEC-HMS, followed by hydraulic modelling, in a GIS environment. The models, in combination with GIS extensions, were used to produce floodplain cartography for different scenarios. In order to evaluate the urban impact of recent urbanization, results were compared to a hypothetical 1964 scenario. This planning exercise revealed the evolution of Valadares basin not only in its hydrologic and hydraulic behavior as well as on its socio-economic dimension and highlighted the strong interactions between those factors.

Keywords: Waters resources; hydrologic modeling; hydraulic modeling; Geographic Information System (GIS).

1. Introdução

Ao longo do tempo tem havido uma crescente pressão urbanística, principalmente nos grandes centros urbanos.

Simultaneamente, com o aumento da área urbana, temos assistido a uma maior ocorrência de cheias nessas áreas, sugerindo-se uma ligação directa entre os fenómenos físicos relacionados com a alteração dos regimes hidrológicos e a ocorrência de cheias em pequenos cursos de água, fruto da pressão urbanística.

A crescente artificialização dos solos altera significativamente as condições de drenagem natural das águas pluviais, assim como, os processos de infiltração de água no solo.

Neste contexto, a gestão dos recursos hídricos em meio urbano adquire uma especial importância, tornando-se uma questão essencial na procura de uma relação mais harmoniosa entre a natureza e a sociedade, numa perspectiva de sustentabilidade.

Para tentar controlar ou prever estes problemas, torna-se cada vez mais evidente a necessidade da existência de modelos de simulação que possam servir como ferramentas de suporte ao planeamento.

A modelação hidrológica é uma componente crucial, e que está na base de qualquer estudo que tenha como objectivo a caracterização de um determinado meio hídrico, independentemente da sua dimensão.

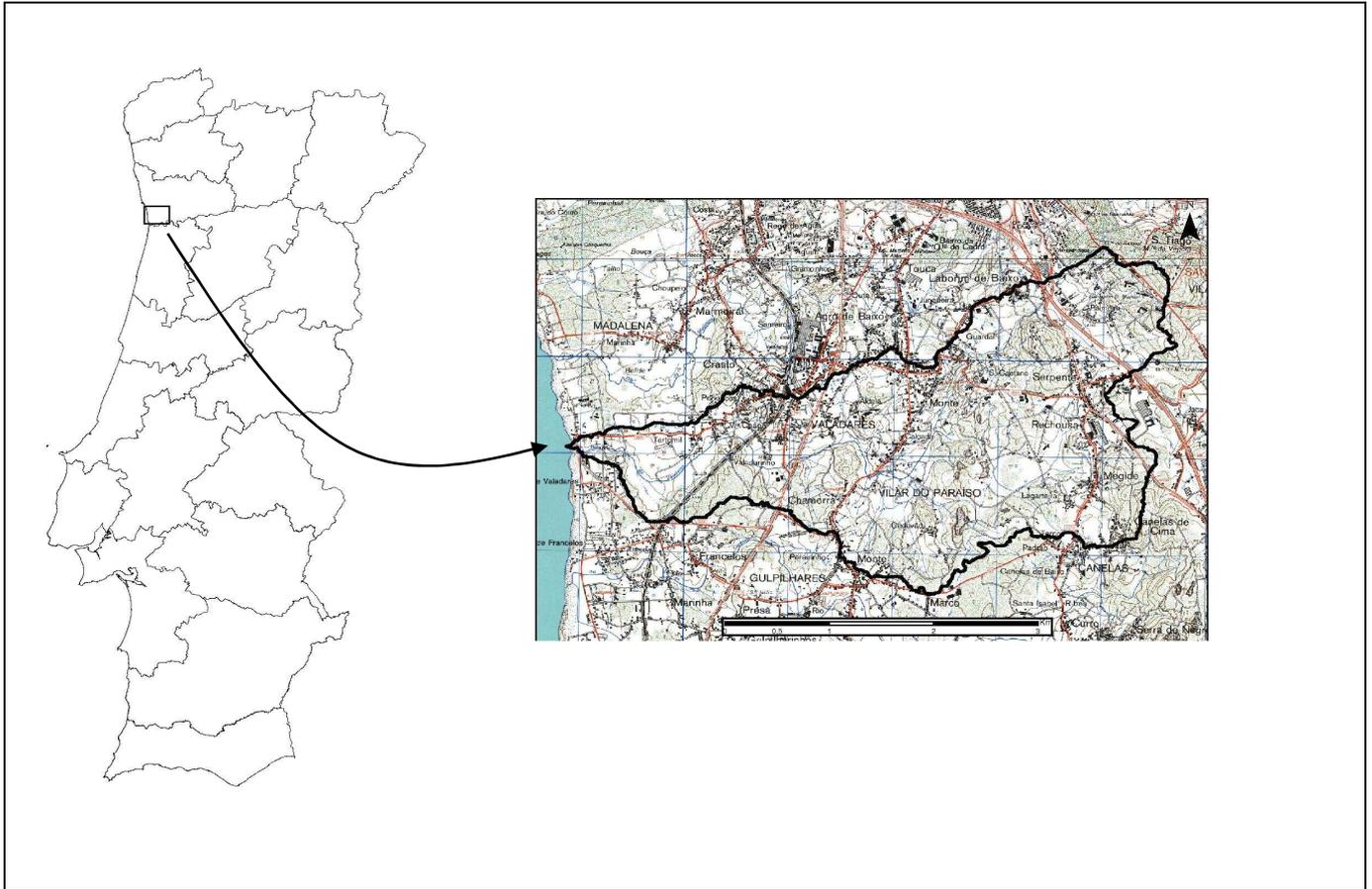


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica da Ribeira de Valadares.

Através desta modelação pretendem-se conhecer os regimes de escoamento verificados nas linhas de água, interpretando e avaliando, quando possível, o impacto que as alterações morfológicas existentes em meio urbano têm nos regimes hidráulicos naturais das linhas de água.

Durante muitos anos, os modelos hidrológicos serviram como uma ferramenta valiosa na gestão de recursos hídricos para prever os impactos de possíveis cenários de uso de solo, e para avaliar as estratégias de planeamento (Green *et al.*, 1995). Mais recentemente, a aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ganhou relevo, levando a avanços significativos em diferentes tipos de modelos hidrológicos de natureza conceptual.

A chave para compreender a razão da alteração da morfologia das linhas de água como resposta à urbanização, requer uma examinação de cada componente do ciclo hidrológico, desde a precipitação, ao escoamento, passando pela dinâmica dos canais (McMaster, 2004). Estes problemas de análise, podem ser parcialmente ultrapassados através da integração de ferramentas de modelação hidrodinâmica num ambiente SIG.

O objectivo de utilizar tal combinação de tecnologias, é auxiliar o utilizador do modelo, prepará-lo para encontrar respostas adequadas, e demonstrar os efeitos da urbanização em canais naturais.

As ferramentas utilizadas permitirão a construção de cenários para avaliar alterações urbanísticas introduzidas, e disponibilização de informação relativa ao efeito prático de possíveis medidas que venham a ser implementadas.

2. Zona de Estudo

A bacia hidrográfica da ribeira de Valadares corresponde a uma pequena linha de água perene, sem monitorização hidrométrica, situada na zona costeira do tecido suburbano de Vila Nova de Gaia (Figura 1). Esta era uma zona maioritariamente rural até há cerca de duas décadas. Devido à sua geografia e aumento da urbanização em zona de cheia, a gestão dos recursos hídricos, especialmente durante eventos de precipitação intensa, tornou-se problemática em anos recentes.

A bacia em estudo tem uma área de aproximadamente 10Km² e recebe uma precipitação média anual de 903mm, a temperatura média anual situa-se entre os 12 e os 15°C, e a evapotranspiração média anual é de cerca de 600mm. Estes dados foram cedidos pela Empresa Municipal Gaiurb (gestão urbanística e da paisagem urbana de Gaia) e alvo de uma análise subsequente em SIG. A altitude da bacia varia desde os 0m (na foz), atingindo os 204m no seu ponto mais alto.

Dada a ausência de um registo hidrológico, entendeu-se ser recomendável a utilização de modelos hidrológicos com parâmetros baseados em características físicas.

Para prosseguir estes estudos, foram recolhidos os seguintes dados:

- Imagens *raster* da textura de solos disponíveis no site do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH);

- Valores médios mensais de evapotranspiração disponíveis no site do SNIRH;
- Ortofotomapas de 2005, de toda a área da bacia, disponibilizados pelo município;
- Fotografias aéreas de 1964, obtidas através do Instituto Geográfico do Exército (IGeoE);
- Cartografia à escala 1:2.000 disponibilizada pelo município;
- Levantamento topográfico da linha de água principal da ribeira.

3. Objectivos do Estudo

Este estudo efectuado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) tinha por objectivo avaliar as áreas inundáveis na bacia da Ribeira de Valadares, e também estimar o escoamento médio da ribeira para posterior modelação de qualidade, permitindo assim, auxiliar na gestão das áreas em risco de inundação, por parte das entidades responsáveis.

Os modelos de simulação hidrológica contínua, ao contrário dos modelos de eventos, têm em consideração o balanço hidrológico da bacia durante um longo período de tempo, e são apropriados para simular valores de escoamento médio diário, mensal, ou mesmo sazonal (Ponce, 1989).

Recentemente, o Hidrologic Engineering Center (HEC) adicionou ao programa Hydrologic Modeling System (HMS) um algoritmo, denominado Soil Moisture Accounting (SMA), capaz de assegurar a modelação em contínuo (Bennett, 1998; HEC, 2000a, 2000b). O primeiro objectivo consistiu assim no desenvolvimento de um modelo HMS incorporando o algoritmo SMA.

A modelação do processo de precipitação e escoamento baseado em eventos tem uma importância significativa na hidrologia, tendo sido reconhecido como fundamental a uma grande gama de aplicações em práticas hidrológicas. Um dos métodos mais utilizados para estimar o volume de escoamento de superfície para determinado evento de precipitação é o método Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) (SCS, 1993), agora renomeado como o método Natural Resource Conservation Service Curve Number (NRCS-CN). O método é simples, de fácil compreensão, e muito útil para bacias não monitorizadas. De modo a prever escoamentos para eventos de precipitação extremos, o segundo objectivo do estudo considerou a concepção de um modelo HMS com o método NRCS-CN.

Foi feita uma tentativa de comparar as respostas de ambos os modelos. Para tal deu-se enfoque aos eventos mais significativos de precipitação, os quais tiveram um peso maior, questionando-se se ambos os modelos eram capazes de prever o escoamento para eventos de precipitação mais significativos. Tentou-se reduzir a incerteza dos parâmetros característicos de ambos os modelos, tendo sido utilizadas para esse efeito ferramentas SIG.

O facto de ser possível fazer aproximações e prever os efeitos das cheias de uma forma eficiente, tem grande valor no processo de planeamento a um nível regional e local.

A avaliação de áreas em risco e a implementação de medidas de mitigação deste, delineiam um contexto dinâmico, no qual a representação do comportamento hidráulico da linha de água desempenha um papel relevante no suporte ao planeamento ambiental e urbano.

Assim, como terceiro objectivo, procurou-se implementar um modelo de análise da linha de água, River Analysis System (RAS).

Finalmente, como objectivo final e exercício de planeamento, fizeram-se reflectir as alterações no tipo de uso de solo da bacia no mapa de áreas inundáveis, comparando dados de 1964 com os de 2005, tornando possível evidenciar eventuais nexos de causalidade.

4. Metodologia

4.1. Trabalho de campo

Com o objectivo de caracterizar a zona de estudo, o trabalho de campo dividiu-se fundamentalmente em três etapas.

4.1.1. Levantamentos topográficos

Foi efectuado o levantamento topográfico do leito menor da ribeira, ao longo do seu troço principal.

4.1.2. Medições

Para calibração dos modelos, foram efectuadas medições de caudal nas secções terminais das sub-bacias definidas aquando do seu prévio estudo no SIG utilizado. Foram também instalados dois udómetros na bacia, permitindo correcções locais dos valores de precipitação.

4.1.3. Visitas de campo

Foram feitas várias visitas de campo para verificação das condições do terreno, e também para fazer levantamento de singularidades ao longo da linha de água que pudessem ter sofrido alterações no decurso do estudo.

4.2. Modelação do terreno

Com o objectivo de obter o Modelo Digital do Terreno (MDT) foram introduzidos dados relativos à altimetria do terreno numa plataforma SIG. Assim, foram introduzidos os pontos altimétricos, as curvas de nível e os levantamentos topográficos efectuados no terreno, e foi feita uma análise tridimensional recorrendo à extensão 3D Analyst do software ArcGIS, tornando possível construir o MDT (Figura 2).

Este MDT foi elaborado inicialmente num formato de "Rede de Triângulos Irregular" (Triangular Irregular Network - TIN), resultando numa representação fiável do terreno a ser modelado. Através de uma análise inicial é imediatamente perceptível que a bacia em estudo é bastante plana.

Com base nos ortofotomapas de 2005, foi criada uma carta de ocupação de solo da bacia de Valadares (Figura 3). Esta informação foi utilizada para estimar parâmetros hidrológicos, utilizando o SIG, para os diferentes algoritmos usados na sua modelação.

A estimação de parâmetros hidrológicos utilizando SIG é descrita em publicações recentes, incluindo Fleming e Neary (2004), Oliveira (2001), Xu *et al.* (2001), e Bennett (1998).

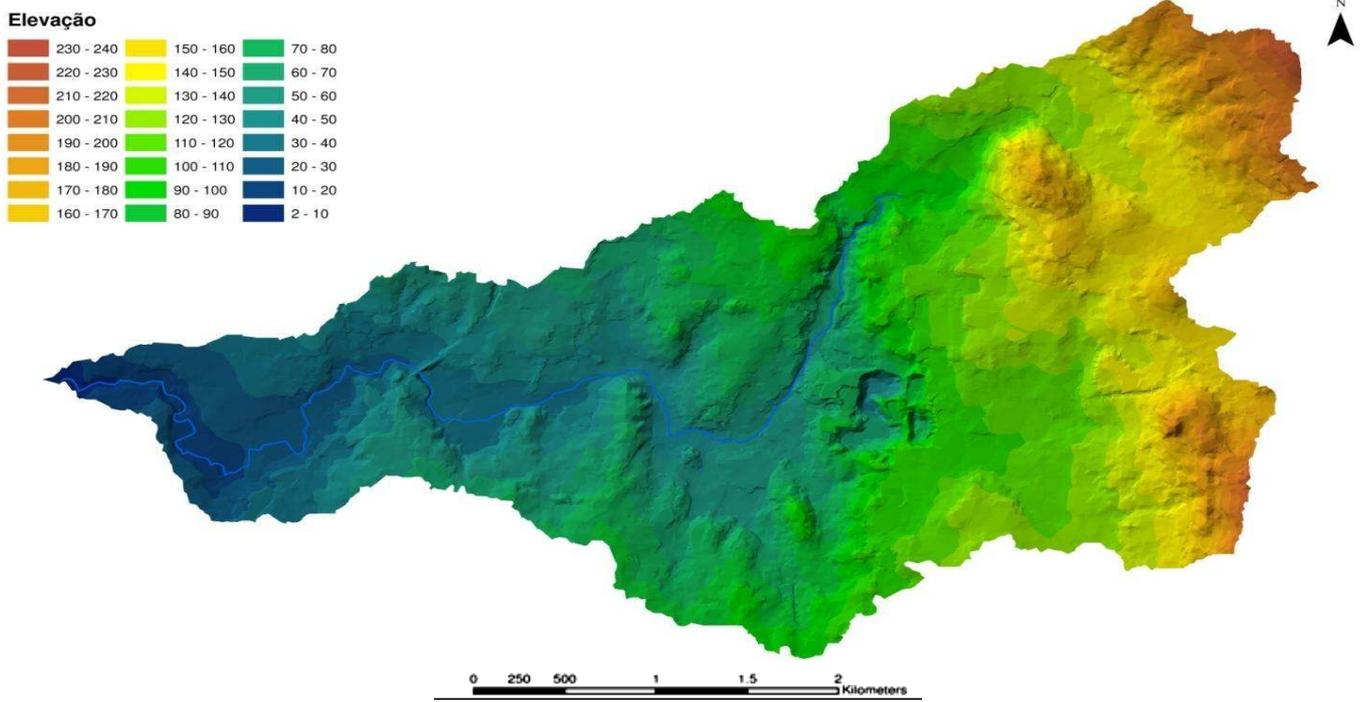


Figura 2. Modelo digital do terreno da bacia hidrográfica da ribeira de Valadares.

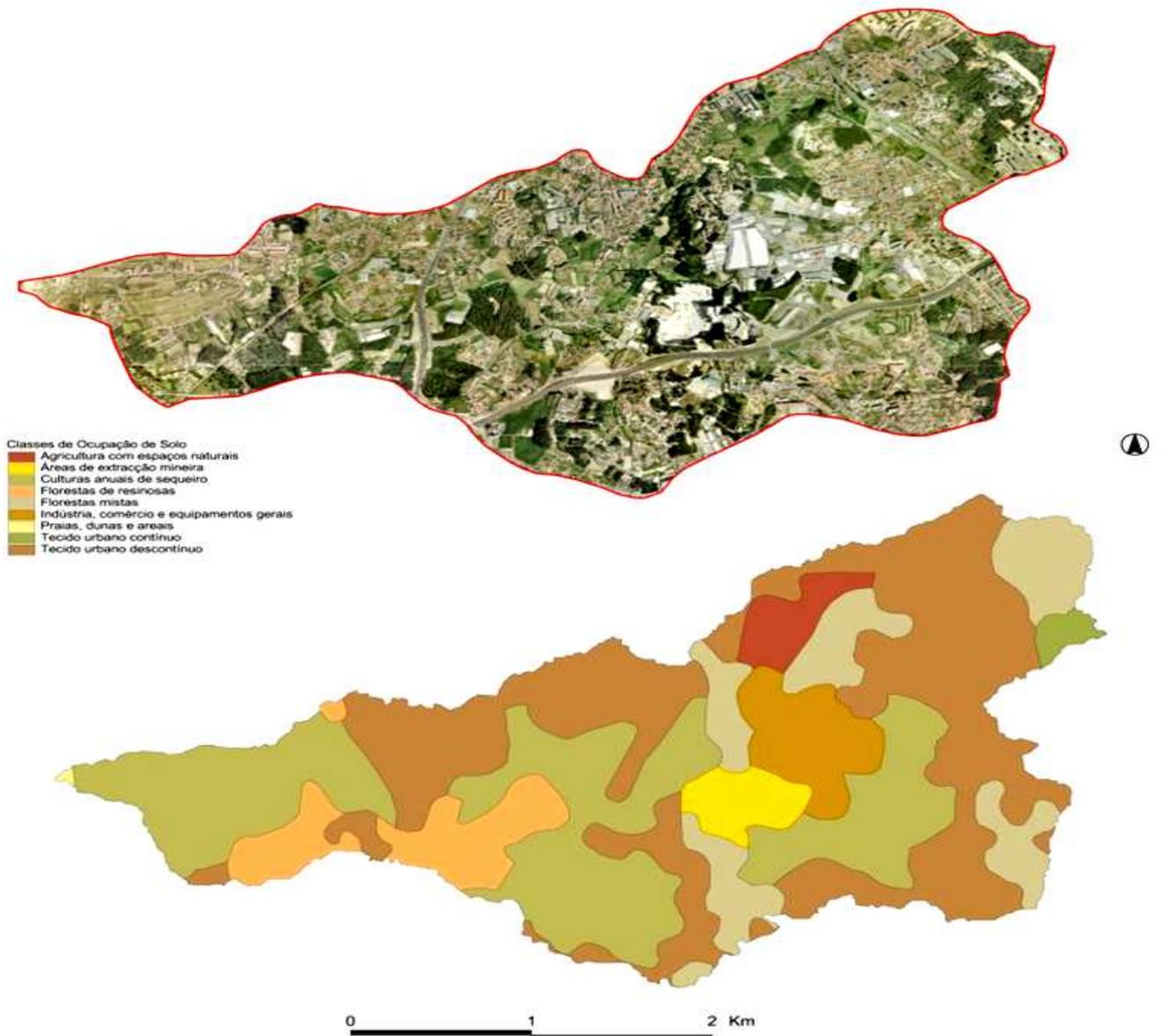


Figura 3. Ortofotomapas e carta de ocupação de solo da bacia da ribeira de Valadares em 2005.

A carta de uso de solo inclui informação como o tipo de cobertura vegetal, que vai desde tecido urbano descontínuo até áreas de florestas de pinheiros.

A classe hidrológica do solo também foi utilizada na parametrização dos modelos hidrológicos. A informação necessária foi obtida através do geoprocessamento em SIG dos dados raster da textura do solo. Essa classe da textura do solo foi utilizada como identificadora das propriedades físicas do solo, como a porosidade, e a capacidade de armazenamento.

Cosby et al. (1984) confirmaram que a variabilidade na textura do solo, ao contrário da variabilidade de outras propriedades do solo, é a que se encontra mais relacionada com a variabilidade dos parâmetros do modelo SMA.

Merz e Plate (1997) constataram que a variabilidade espacial exibida pelo modelo SMA e as propriedades do solo alteram com a dimensão da precipitação, sendo que o escoamento de eventos maiores é menos dependente da variabilidade espacial das propriedades do solo e do modelo SMA.

Dada a necessidade imperativa de calibrar os modelos hidrológicos, foi instalado um caudalímetro na secção da foz da bacia, de Setembro de 2007 até Fevereiro de 2008. Obtiveram-se valores observados de caudal num período de tempo de 15 minutos, permitindo uma calibração do modelo através do ajuste dos parâmetros em que não tinha havido a possibilidade de os estimar com precisão no ambiente SIG.

4.3. Modelos hidrológicos

Ambos os modelos hidrológicos foram gerados através do HEC Geospatial Hydrologic Modeling Extensão (HEC-GeoHMS) (HEC, 2000a) utilizando o MDT no seu formato raster e com uma resolução de 1m² (Figura 4). Com os dados do terreno na forma do MDT, uma extensão do SIG ArcView, criou ficheiros de input ao software HMS na forma de uma rede de linhas de água, limites das sub-bacias, conectividade das vários elementos hidrológicos, e extracção suplementar de parâmetros geométricos incluídos nas bases de dados destes elementos. Tal foi obtido através de uma série de passos que, na sua totalidade, se denominam como pré-processamento do terreno e processamento da bacia. A representação física das sub-bacias e das linhas de água foi configurada no modelo de bacia. Os elementos hidrológicos foram ligados através de uma rede dendrítica de modo a simular os processos de escoamento. A bacia foi dividida em cinco sub-bacias (Figura 5), procurando obter-se homogeneidade do uso do solo.

O procedimento referido prosseguiu com a utilização do HEC-HMS através da inclusão dos modelos subsequentes:

- Transformação da precipitação em excesso em escoamento de superfície (escoamento directo) e modelação do caudal do canal das linhas de água foi feita utilizando o método da Onda Cinemática, que admite uma solução da equação da quantidade de movimento desprezando as forças de inércia e de pressão. Este modelo foi utilizado dado que a bacia apresentava baixa declividade (HEC, 2000b);

- O caudal de base pode ser um parâmetro importante em estudos de cheias porque define uma profundidade mínima do rio, sobre a qual se acumula o escoamento adicional. Os modelos que ignoram o caudal de base podem sub-estimar os níveis de água e, conseqüentemente, falhar na identificação das áreas inundáveis (Knebl *et al.*, 2005). Neste estudo foi utilizado o algoritmo de recessão do escoamento de base;
- Os registos de precipitação horária disponíveis, dos dois udómetros, foram utilizados no modelo meteorológico, tendo a análise de recobrimento sido feita por recurso a polígonos de Thiessen. Esses registos de precipitação referem-se a datas para as quais também estavam disponíveis registos de caudal (de Setembro de 2007 a Fevereiro 2008), os quais foram incorporados numa série temporal.

Tratando-se de um modelo hidrológico com parâmetros baseados em características físicas, o modelo da Onda Cinemática foi parametrizado recorrendo ao SIG.

Os parâmetros geométricos foram obtidos directamente através da geo-análise do MDT, a rugosidade foi estimada através do processamento da informação de uso de solo. Este procedimento encontra-se bem documentado em Singh (2007).

Como referido anteriormente, foi criado um modelo contínuo utilizando o algoritmo SMA.

Conceptualmente, este algoritmo divide o percurso potencial da precipitação na bacia em cinco zonas: armazenamento da interceptação na copa; armazenamento da interceptação na superfície; armazenamento da zona de tensão; armazenamento subterrâneo da camada 1; armazenamento subterrâneo da camada 2.

Foram necessários doze parâmetros para modelar os processos hidrológicos da interceptação, armazenamento da superfície, infiltração, armazenamento do solo, percolação, e armazenamento subterrâneo.

São necessários os valores de profundidade máxima de cada uma das zonas de armazenamento, a percentagem a que cada zona de armazenamento se encontra no início da simulação, e as taxas de transferência, para simular o movimento da água através das zonas de armazenamento (Fleming e Neary, 2004).

Para além da precipitação, o outro único input para o algoritmo SMA é uma taxa de evapotranspiração potencial (HEC, 2000a, 2000b).

Sete dos doze parâmetros necessários foram estimados através do geoprocessamento da base de dados geográfica do uso do solo. Este procedimento encontra-se de acordo com o estudo do algoritmo efectuado por Bennett (1998). A classe de textura do solo também foi utilizada nesta parametrização.

Os restantes cinco parâmetros (profundidade da água subterrânea 1 e 2, coeficientes de armazenamento, e a taxa de percolação da água subterrânea 1 e 2) foram ignorados neste estudo dado a falta de dados relativos ao aquífero, limitando, assim, as capacidades de análise do modelo.

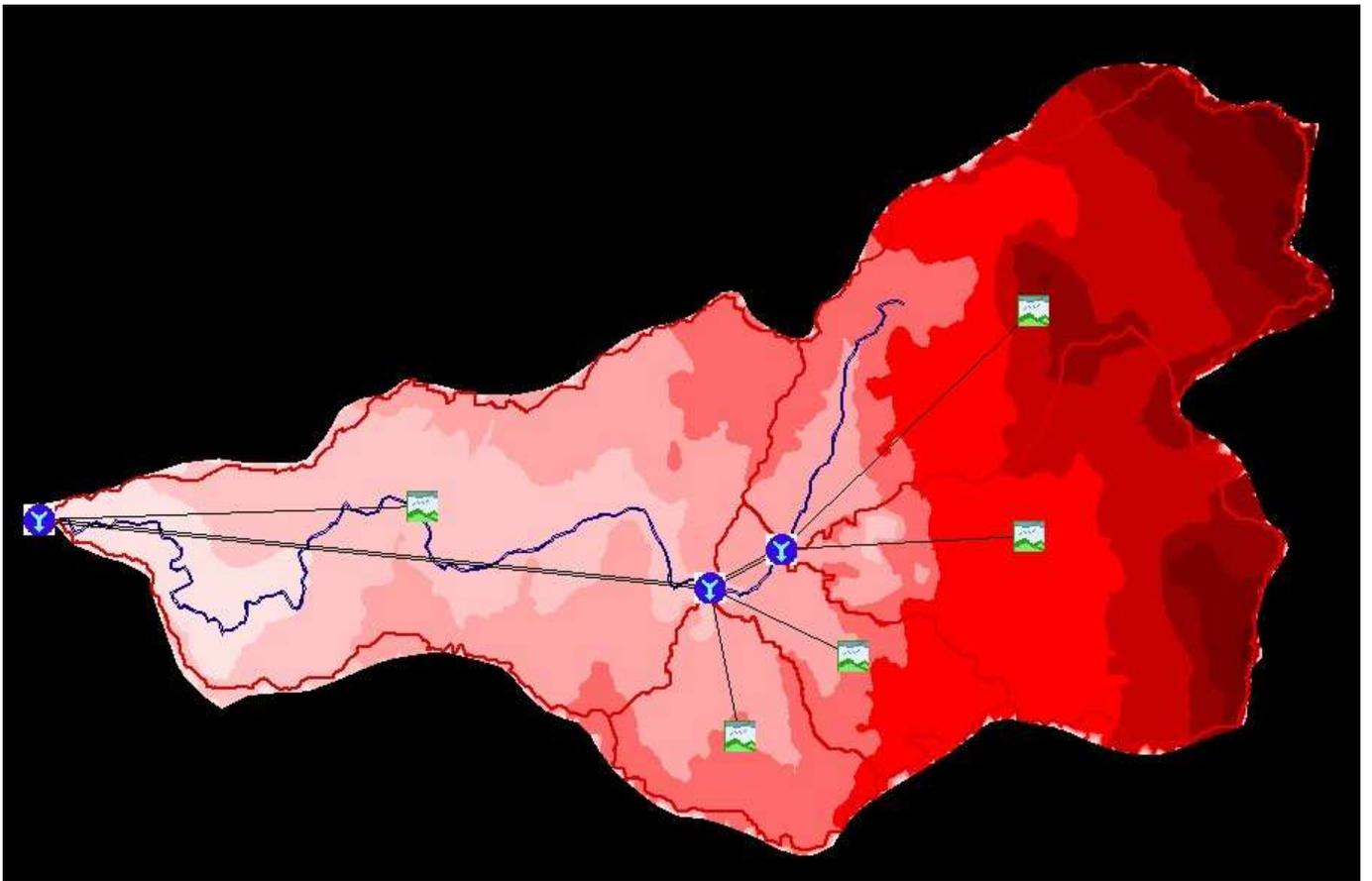


Figura 4. Imagem obtida através da extensão HEC-GeoHMS.

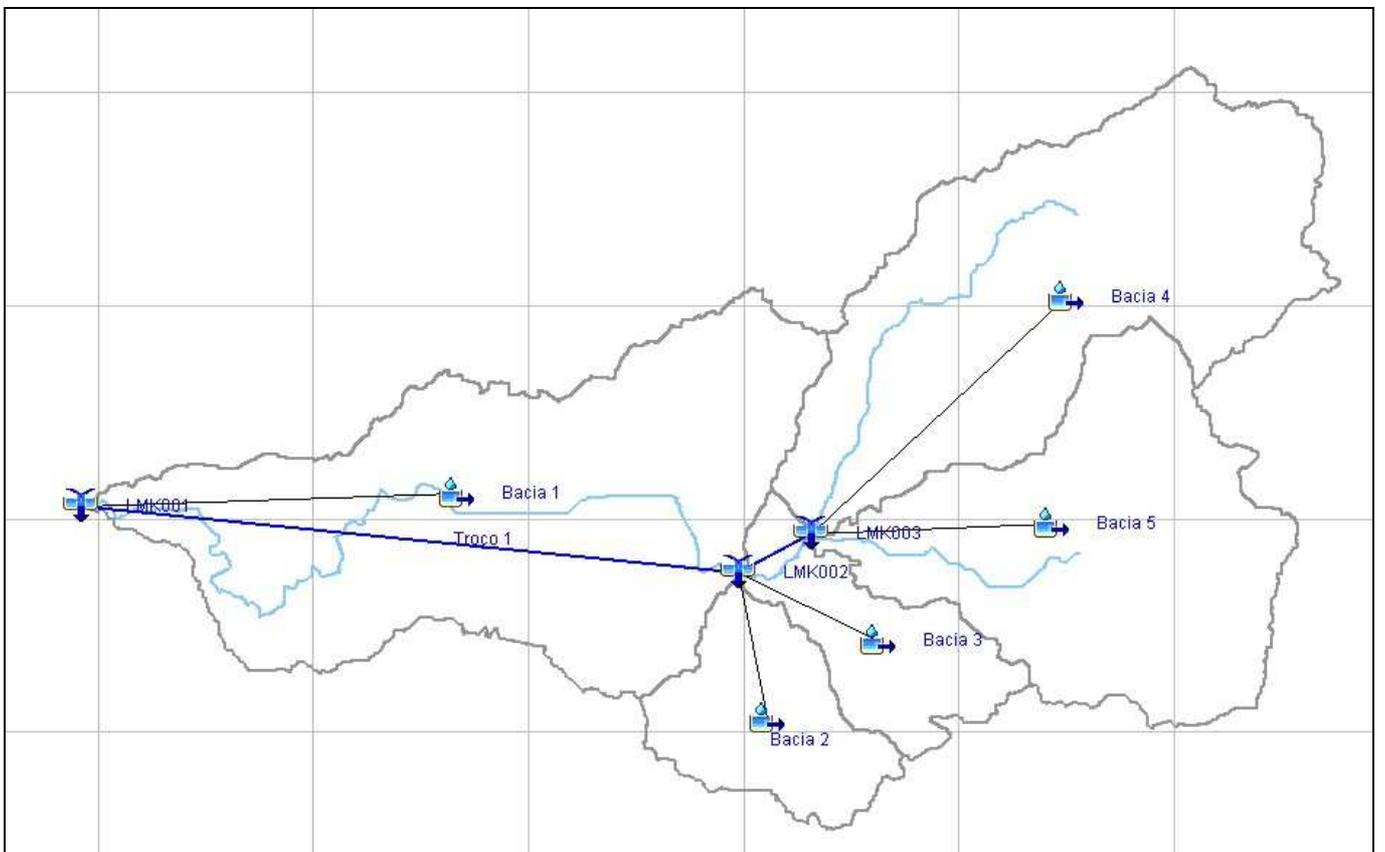


Figura 5. Imagem obtida através da extensão HEC-GeoHMS.

Foi também criado um modelo de eventos utilizando o método de perdas de precipitação NRCS-CN. Após se ter procedido à determinação das condições existentes para o uso do solo/cobertura do solo, escolher o grupo hidrológico do solo, e de se terem seleccionado as condições antecedentes de humidade, a qual para este estudo foi modelada como sendo média (AMCII), foi então estabelecida uma relação para estimar o valor do número de escoamento (NRCS - Curve Number (CN)) para as diferentes sub-bacias, fazendo uso de tabelas publicadas pelo NRCS. O CN atribuído às diversas classes contidas na carta de usos de solo, para cada sub-bacia, permitiu o cálculo da área de cada secção do tema como uma percentagem da área total da sub-bacia, tendo esse valor sido multiplicado pelo valor do CN.

Os valores de percentagem obtidos foram distribuídos por sub-bacia para atribuir um valor de CN ponderado a cada uma. A função objectivo tem como base estabelecer a comparação entre pares de ordenadas do hidrograma observado e do simulado.

O procedimento de calibração automático no software HMS utiliza um método iterativo que visa minimizar o valor de uma função objectivo específica, como a soma do erro absoluto, a soma do erro quadrático, a percentagem do erro no pico, ou a média ponderada da raiz quadrada do pico (HEC, 2000a, 2000b). Tal como descrito por Fleming e Neary (2004), as condicionantes de base definidas pelo HMS resultam em valores de parâmetros que, após calibração, nem sempre eram razoáveis. Assim, foram adoptados métodos de calibração manual, auxiliando no cálculo de uma gama de parâmetros de valores. Os parâmetros seleccionados para a calibração foram:

- Para ambos os modelos, a rugosidade do plano da Onda Cinemática;
- Para cada modelo, os parâmetros de recessão do escoamento de base;
- Para o modelo de eventos, o parâmetro da abstracção inicial para o NRCS-CN;

Para o modelo contínuo, os sete parâmetros do SMA mencionados anteriormente. Ao restringir o número de parâmetros seleccionados para a calibração, também foram testadas as capacidades de inferência dos parâmetros em ambiente SIG.

4.4. Modelo hidráulico

A visualização das zonas inundáveis foi desenvolvida utilizando um modelo numérico unidimensional, HEC-RAS. A extensão do ArcView, HEC-GeoRAS, foi utilizada como interface entre o HEC-RAS e o SIG para pré-processar e pós-processar os dados em SIG. Os dados geométricos da zona inundável e da linha de água foram obtidos através do MDT no seu formato TIN. Os perfis da superfície da água, juntamente com a linha principal de água, para um evento de precipitação com um período de retorno de 100 anos, foram analisados com simulações de escoamento subcrítico, constante, e gradualmente variável, para um caudal extremo, e para um determinado evento teórico de precipitação desenvolvido no modelo hidrológico NRCS-CN.

Quando se efectuou a modelação hidrológica de tal evento de precipitação extremo, relativamente às condições antecedentes de humidade na bacia, no algoritmo de perda do NRCS-CN, assumiu-se a situação AMCIII, que corresponde à situação antecedente de humidade elevada.

Os perfis gerados foram exportados para o SIG e foi gerada uma TIN da superfície da água. A intercepção da TIN do terreno com a TIN da superfície da água, resultou no mapa de inundação.

As capacidades de visualização de dados do SIG permitiram que os resultados fossem analisados com um grau de detalhe que não seria possível de obter apenas com o modelo HEC-RAS.

Utilizando as fotografias aéreas de 1964, devidamente georreferenciadas, foi criada uma nova base geográfica dos dados relativos à cobertura e uso de solo (Figura 6).

Isto permitiu estimar uma re-parametrização do modelo hidrológico de eventos, e com isso, uma alteração de resposta ao evento teórico de precipitação extrema para um período de 100 anos, resultando numa extrapolação do mapa de inundação para 1964.

Desta forma, as alterações na urbanização da bacia hidrográfica foram reflectidas de modo mensurável, permitindo o reconhecimento dos factores responsáveis pelos recentes problemas referidos anteriormente.

5. Resultados

No Quadro 1, são apresentados os valores dos parâmetros de SMA após calibração para o modelo hidrológico contínuo. Este quadro apenas mostra os resultados para os parâmetros que variaram durante a calibração.

Como referido anteriormente, os parâmetros associados às águas subterrâneas não foram objecto de modelação devido à inexistência de dados. Não obstante essa falta de dados, a pós-calibração dos valores não se desviou mais de 58% dos valores estimados.

Como referido por Fleming e Neary (2004), estes resultados demonstram que a utilização de um SIG no cálculo das estimativas dos parâmetros iniciais pode reduzir bastante a incerteza associada a valores de outros parâmetros introduzidos antes da calibração do modelo, ao contrário dos valores escolhidos aleatoriamente.

O facto do fluxo de águas subterrâneas não ter sido modelado, provavelmente explica os valores do desvio padrão relativos ao escoamento médio (Quadro 2).

O erro médio tanto no tempo para atingir o pico, como no erro médio da magnitude dos picos (%) foi, de certa forma, satisfatório.

Isto deve-se ao facto da calibração ter tido como parte fundamental os eventos extremos de precipitação, aos quais foi atribuído um maior peso.

Embora exista, até certo ponto, uma concordância nos picos de escoamento simulados e observados em alguns eventos de precipitação, em termos gerais, o modelo não conseguiu prever estes picos com precisão, tanto no tempo como na sua magnitude.

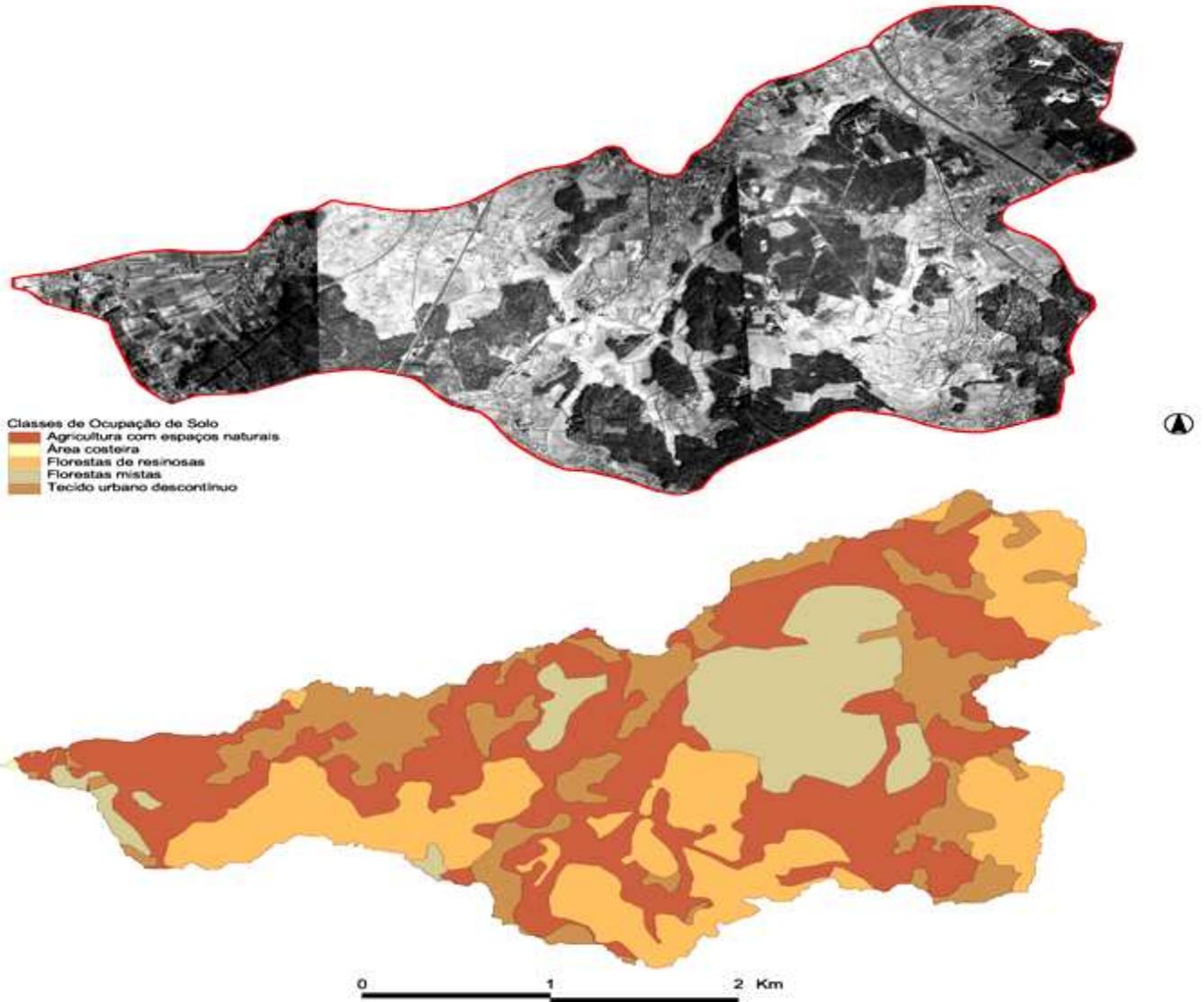


Figura 6. Fotografias aéreas e carta de ocupação de solo da bacia da ribeira de Valadares em 1964.

Quadro 1. Valores dos parâmetros após a calibração e percentagem de ajuste entre os valores estimados e pós-calibrados.

Plano sub-bacia	Armaz. Copa (mm)	Ajuste %	Armaz. Superf. (mm)	Ajuste %	Infilt. Max. (mm/h)	Ajuste %	Armaz. Solo (mm)	Ajuste %	Armaz. Tensão (mm)	Ajuste %	Perc. Solo (mm/h)	Ajuste %
1Norte	0,55	31	27,78	57	125,37	37	353,82	27	313,64	13	6,08	27
1Sul	2,85	40	38,52	39	121,27	-36	472,53	-32	276,12	14	5,59	25
2Norte	1,10	-30	27,77	-52	120,76	44	365,38	41	336,18	-19	4,87	-15
2Sul	0,95	45	41,92	58	140,00	40	449,21	39	312,49	29	8,23	21
3Norte	0,74	-44	38,39	49	137,10	35	422,62	-39	361,35	-12	7,68	13
3Sul	1,96	36	23,61	39	107,98	-44	360,43	23	370,79	28	2,94	22
4Norte	1,27	40	15,73	30	106,77	30	319,85	48	359,53	14	2,30	13
4Sul	1,73	-56	17,73	-54	91,42	36	332,54	-39	265,09	-20	2,03	-21
5Norte	0,40	37	17,88	36	88,46	50	300,66	41	278,55	21	3,33	17
5Sul	1,10	37	24,38	41	109,24	47	351,35	29	251,42	28	4,07	27

Quadro 2. Resultados estatísticos comparando os caudais simulados com os medidos na foz da bacia de Valadares.

ESTATÍSTICA	OBSERVADO	MODELO CONTÍNUO
Caudal médio (m ³ /s)	0,084	0,042
Desvio padrão (m ³ /s)	0,349	0,137
Erro médio absoluto (m ³ /s)	---	0,046
Raiz quadrada do erro médio (m ³ /s)	---	0,137
Erro no volume (%)	---	42
Erro médio no tempo para os picos (h)	---	0,45
Erro médio na magnitude dos picos (%)	---	66

A Figura 7 mostra uma comparação dos caudais do modelo contínuo calibrado e dos caudais observados para o período de tempo em que estavam disponíveis os dados (de Setembro de 2007 a Fevereiro de 2008).

Estes gráficos são representativos dos resultados para a bacia da ribeira de Valadares, sendo de notar que durante os meses de Inverno o modelo teve um comportamento melhor. Os valores dos parâmetros estimados para a recessão do caudal de base após a calibração, dado o seu pequeno peso, foram de 0,1 e 0,2 para a constante de recessão e para a razão ao pico, respectivamente.

Foi atribuído o valor de 0,0055 m³/s/km² para a descarga inicial. Este valor bastante baixo parece reflectir o comportamento da bacia durante um evento de precipitação.

O valor atribuído ao parâmetro “razão ao pico”, em particular, parece simular correctamente a curva descendente do gráfico, onde provavelmente se reflecte o reduzido declive das sub-bacias. Nenhum dos valores dos parâmetros do algoritmo da onda cinemática estimados pelo SIG foi alterado.

Muito provavelmente, o modelo contínuo falhou na previsão do escoamento médio horário devido ao facto de não ter sido modelado o escoamento subterrâneo. Isto aponta para a necessidade de um período de tempo de análise do escoamento mais longo.

A utilização de um SIG permitiu uma estimativa inicial dos parâmetros que possibilitaram a construção de um modelo contínuo para reprodução de eventos de precipitação, semi-anual, e com bastante exactidão. É necessário adquirir mais experiência na utilização do algoritmo SMA. Existem poucos autores a tentar desenvolver os modelos contínuos no contexto da gestão dos rios Portugueses.

O modelo hidrológico de evento criado foi calibrado utilizando eventos de precipitação ordenados pela sua magnitude. Estes eventos datavam de 19 de Novembro de 2007, 25 de Dezembro de 2007, 1 a 3 de Janeiro de 2008, 1 de Janeiro de 2008, e 3 de Fevereiro de 2008. Utilizando os valores (pós-calibrados) dos parâmetros encontrados para o algoritmo da recessão do escoamento de base, a calibração limitou-se a reduzir o parâmetro do método “perdas da abstracção inicial” do NRCS-CN da precipitação, ao valor de 1,7mm para cada sub-bacia.

A Figura 8 mostra a comparação dos escoamentos simulados dos cinco eventos mencionados, com o caudal observado desses mesmos eventos. O erro médio quadrático (EMRQ) situou-se entre 0,13 e 0,15.

Os resultados deste método frequentemente utilizado, revelaram que o SIG é, sem dúvida, uma poderosa ferramenta na estimativa de parâmetros para todos os algoritmos compreendidos no modelo de bacia. Ao parâmetro da abstracção inicial, sendo algo controverso, e na ausência de dados de escoamento observado para cada sub-bacia, foi-lhe atribuído o valor já referido. À parte deste valor, o modelo de eventos gerado respondeu com bastante exactidão, como indica o EMRQ obtido. O método de estimação de parâmetros através do SIG utilizado, serviu de base à metodologia da análise hidrológica de 1964. Foi desenvolvido um hidrograma para cada junção hidrológica, com uma técnica alternada de três blocos, utilizando o modelo hidrológico de eventos calibrado e gerando um evento de precipitação para um período de retorno de 100 anos. O tempo de concentração foi calculado de acordo com o método proposto pelo NRCS-CN, produzindo um resultado de 2,7 horas. Os caudais máximos para cada uma das junções foram utilizados no modelo HEC-RAS para efectuar a simulação. Os caudais máximos obtidos foram: 21,5; 26,5; e 39,7 m³/s, nas secções de montante para jusante da bacia. As fotografias aéreas de 1964 foram utilizadas para redefinir uma nova cobertura do uso do solo. Seguindo o mesmo procedimento do SIG mencionado anteriormente, o modelo hidrológico de evento para a bacia foi parametrizado para o cenário de 1964, tendo sido atribuídos novos CN e rugosidades do terreno.

Assumiu-se que o parâmetro da abstracção inicial seria 20% de cada CN ponderado da sub-bacia (de acordo com o método proposto pelo NRCS-CN). Seguindo o procedimento aplicado para 2005, foi criado um evento de precipitação teórico para um período de retorno de 100 anos para as condições de 1964. O tempo de concentração calculado foi de 4,1 horas e os caudais máximos obtidos foram: 5,7; 6,2; e 9,3 m³/s, nas secções de montante para jusante da bacia. Os resultados do pós-processamento dos dados no HEC-RAS são apresentados na Figura 9, para ambos os cenários (1964 e 2005), nomeadamente as áreas de inundação no canal principal da ribeira.

Na Figura 10 pode-se ver um pormenor de uma zona da bacia, onde é visível a diferença na área inundável. A área total de inundação aumentou de 0,08 km² em 1964 para 0,31 km² em 2005, demonstrando assim um aumento dramático. Tal como esperado, este aumento fez-se sentir principalmente nas secções terminais da bacia. Para além de serem áreas bastante planas, estas eram as secções da bacia onde se denotava um aumento da urbanização na presente década. Também, como ficou demonstrado por estragos recentes provocados pelas cheias, esta urbanização cresceu em áreas de leito de cheia. O estudo realizado evidencia o planeamento de recursos hídricos como uma prática transversal para um desenvolvimento sustentável. As autoridades locais deveriam ter acesso a ferramentas de modelação adequadas para que, situações como a apresentada, possam ser atendidas atempadamente.

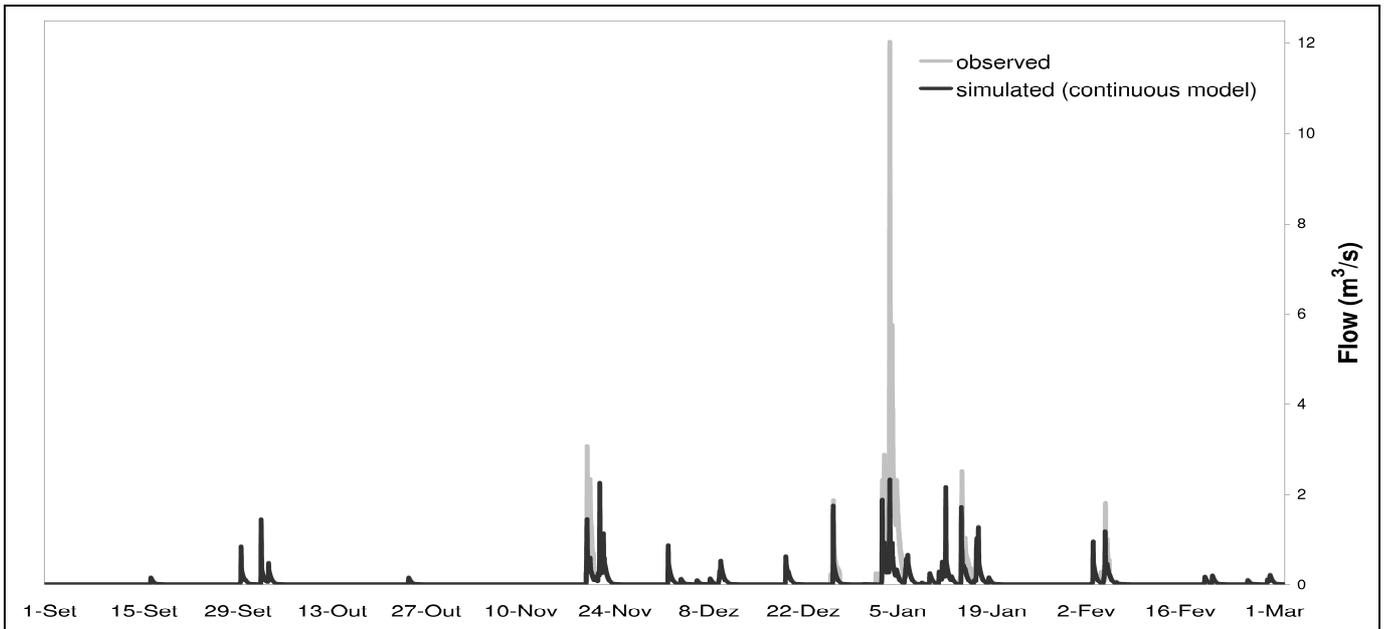


Figura 7. Caudais simulados e observados no modelo hidrológico contínuo.

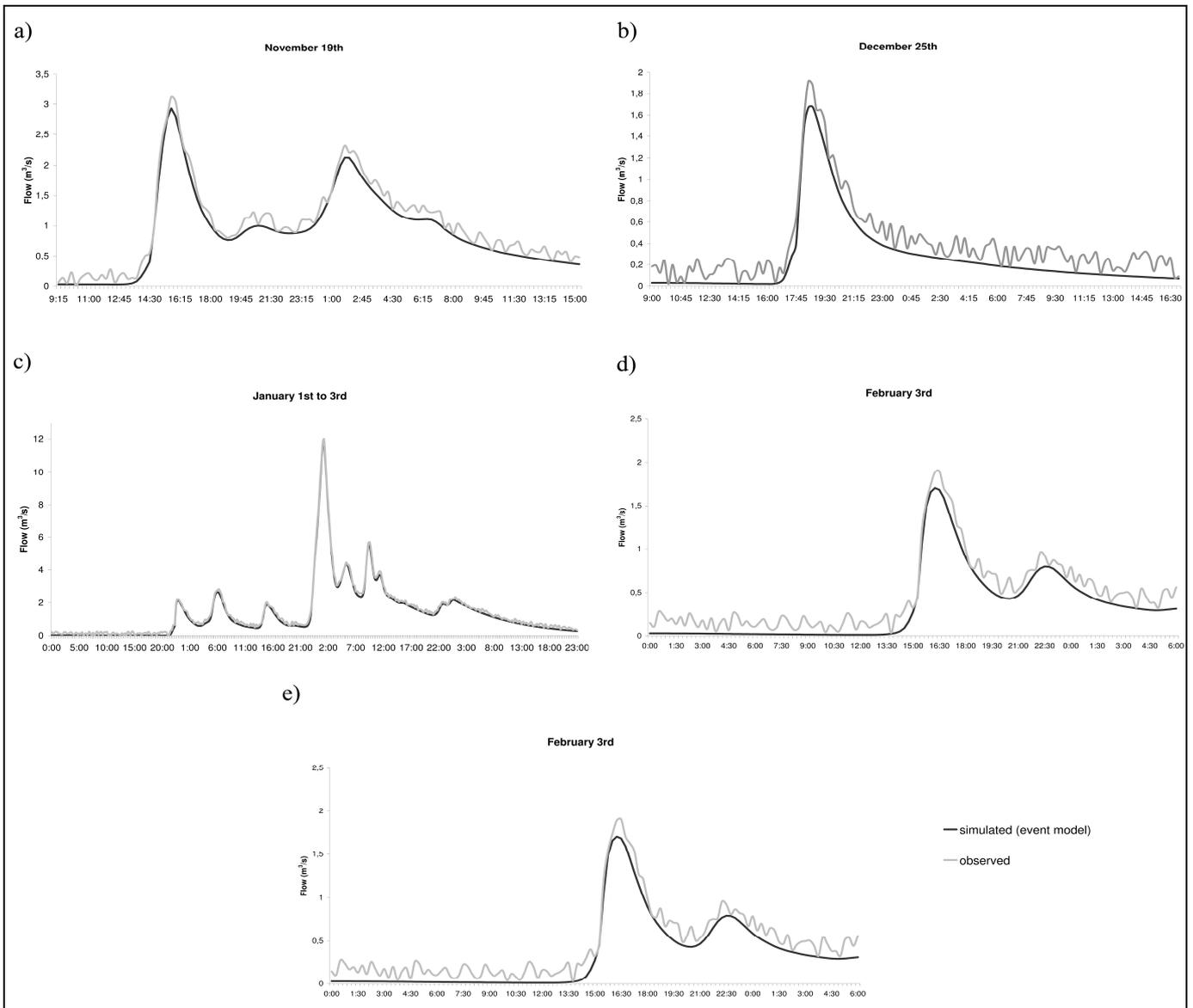


Figura 8. Caudais observados e simulados para o modelo hidrológico de eventos, para os eventos de 19 de Novembro 2007 (a), 25 de Dezembro de 2007 (b), 1 a 3 de Janeiro de 2008 (c), 13 de Janeiro de 2008 (d), e 3 de Fevereiro de 2008 (e).

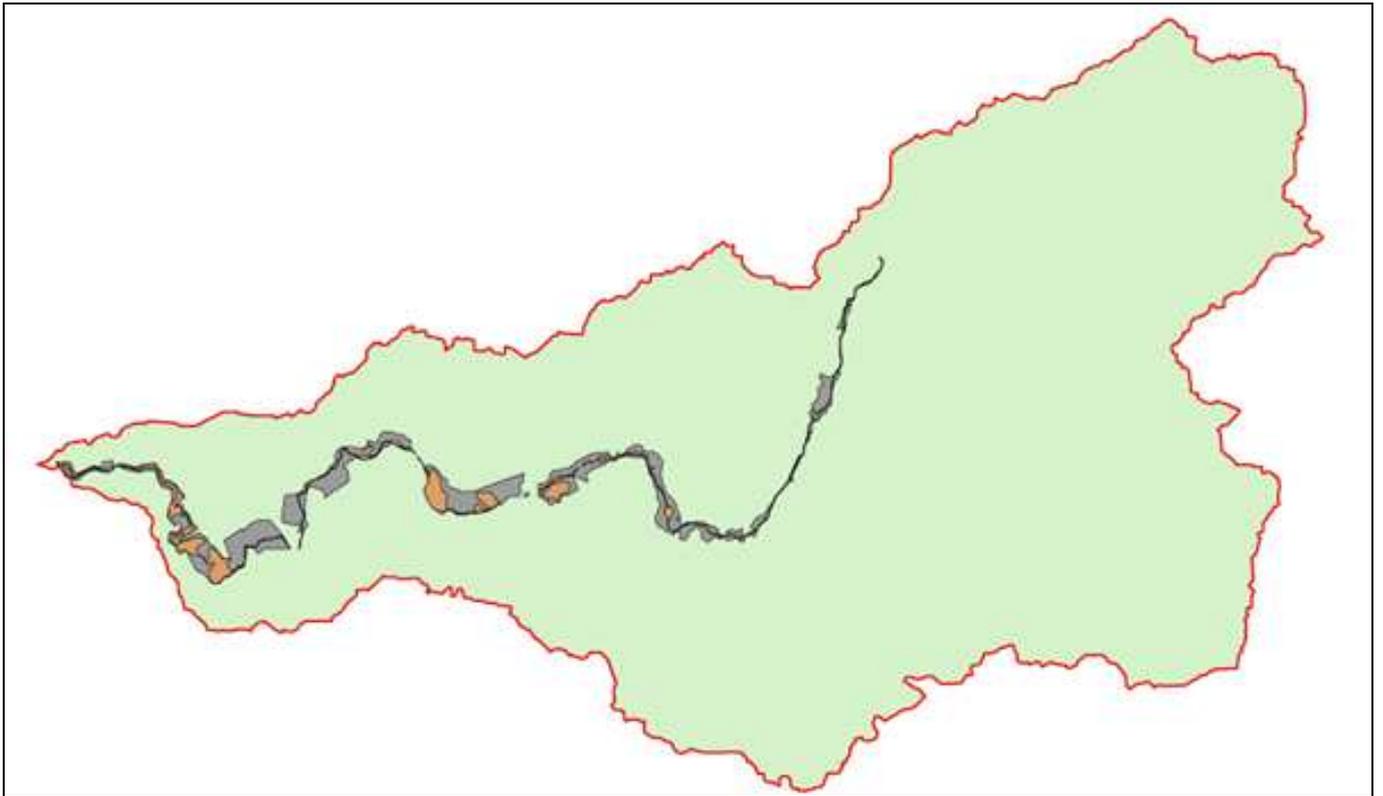


Figura 9. Mapa das áreas inundáveis na bacia da ribeira de Valadares: os polígonos cinzentos são as áreas inundáveis em 2005, e os polígonos cor-de-laranja são as áreas inundáveis em 1964.



Figura 10. Pormenor de uma zona da bacia de Valadares, onde é visível que a área inundável em 2005 (riscas cinzentas), é muito superior à de 1964 (riscas cor-de-laranja).

6. Conclusões

Tal como já tinha sido concluído por Fleming e Neary (2004), o desenvolvimento de metodologias de parametrização recorrendo a SIG, torna-se cada vez mais importante nas aplicações de modelação hidrológica, especialmente dado o contexto da informação geo-espacial disponível.

Este estudo exemplifica que os parâmetros para ambos os modelos hidrológicos (contínuo e de eventos), podem ser obtidos através de bases de SIG disponíveis ao público e de registos do caudal. Ambos os modelos foram capazes de produzir informação útil, apesar das limitações referidas. Também, como admitido por Correira *et al.* (1998), as zonas suburbanas em áreas com um desenvolvimento rápido são muito dinâmicas em termos de ocupação humana.

Este facto deve ser tido em consideração quando se estudam os perigos de inundações nestas áreas. É essencial analisar diferentes cenários que podem incluir diferentes condições de precipitação, diferentes medidas de protecção de cheias, e diferentes práticas de uso de solo. Tal como na modelação hidrológica, os cálculos preliminares dos parâmetros podem ser feitos em SIG utilizando vários tipos de informação disponível, os resultados utilizados como *input* dos modelos, e os resultados transferidos novamente para SIG onde serão gerados cálculos complementares, como a aferição de estragos previstos provocados pelas cheias.

O resultado global desta abordagem proporciona ferramentas úteis, não só do ponto de vista técnico, mas também na comunicação dos resultados de uma forma simples e fácil de compreender para todas as partes envolvidas, nomeadamente as autoridades implicadas no processo de tomada de decisão e o público em geral. Assim, esta metodologia é satisfatória para uma abordagem ampla e participativa na gestão das bacias hidrográficas.

Referências

- Bennett T. (1998). Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS, MS thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of California, Davis Calif.
- Correira F., Rego F., Saraiva M., Ramos I. (1998), Coupling GIS with hydrologic and hydraulic flood modelling, *Water Resources Management*, Vol. 12, pp 229-249.

- Cosby B. J., Hornberger G. M., Clapp R. B., Ginn T. R. (1984), *A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils*, *Water Resource Research*, Vol. 20, N.º 6, pp 682-690.
- Fleming M., Neary V. (2004), Continuous hydrologic modeling study with the Hydrologic Modeling System, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 9, N.º 3, pp 175-183.
- Green R., Cruise J. (1995), Urban watershed modeling using geographic information systems, *Journal of Water Resources*, Vol. 121, N.º 4, pp 318-325.
- HEC, 2000a. HEC-GeoHMS User's Manual. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers, Davis, EUA. Approved for Public Release - Distribution Unlimited CPD-77.
- HEC, 2000b. Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers, Davis, EUA. Approved for Public Release - Distribution Unlimited CPD-74B.
- Knebl M., Yang Z., Hutchinson K., Maidment D. (2005), Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: A case study for the San Antonio River Basin summer 2002 storm event, *Journal of Environmental Management*, Vol. 75, pp 325-336.
- McMaster K. (2004), Stream modeling: channel stabilization and visualization using ArcView.
- Merz B., Plate E. (1997), An Analysis of the Effects of Spatial Variability of Soil and Soil Moisture on Runoff, *Water Resources Research*, Vol.33, pp 2909-2922.
- Oliveira F. (2001), Extracting hydrologic information from spatial data for HMS modeling, *Journal of Hydrology Engineering*, Vol. 6, N.º 6, pp 524-530.
- Ponce V. (1989). *Engineering hydrology*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- SCS (1993). *Hydrology*, National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Singh V. P. (2007), Kinematic Wave modeling in Hydrology, American Society of Civil Engineering, Hydraulic Division, San Francisco.
- Xu Z. X., Ito K., Schultz G. A., Li J. Y. (2001), Integrated Hydrologic Modeling and GIS in Water Resources Management, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 15, N.º 3, pp 217-223.