

## A Modelação Hidrológica em Portugal nos Últimos 25 Anos do Século XX, nas Perspectivas Determinística, Probabilística e Estocástica

António de Carvalho Quintela, Maria Manuela Portela  
IST, DECivil, Secção de Hidráulica, Portugal - [acq@civil.ist.utl.pt](mailto:acq@civil.ist.utl.pt), [mps@civil.ist.utl.pt](mailto:mps@civil.ist.utl.pt)

Artigo convidado. Aprovado em julho.

### RESUMO

O objectivo deste artigo é apresentar e caracterizar de modo sintético os modelos hidrológicos, determinísticos e não determinísticos, cujo desenvolvimento em Portugal ou por investigadores portugueses no estrangeiro, durante o último quartel do século XX, se revestiu de aspectos pioneiros no âmbito da modelação quantitativa de águas superficiais.

Antecedendo a apresentação e a caracterização dos modelos considerados, são brevemente referidos os modelos hidrológicos utilizados em Portugal anteriormente a 1975 e assinaladas as circunstâncias que se admite terem contribuído significativamente para o posterior progresso e difusão da modelação hidrológica no País.

**Palavras-chave:** modelação; hidrológica; Portugal.

### PREÂMBULO

Procura-se assinalar e caracterizar muito sinteticamente os *modelos hidrológicos matemáticos, determinísticos e não determinísticos*, cujo desenvolvimento em Portugal ou por investigadores portugueses no estrangeiro, durante o último quartel do século XX, se admite ter contribuído para o avanço da modelação hidrológica no País. Referem-se também aplicações daqueles modelos.

Neste preâmbulo apresenta-se uma classificação dos modelos hidrológicos matemáticos (Figura 1), define-se o âmbito dos que são tratados no presente artigo e menciona-se a organização que ao mesmo foi conferida.

Os *modelos determinísticos* são caracterizados pelo facto de uma dada acção implicar uma mesma resposta. Se tal resposta é aleatória, pelo menos em parte, está-se perante um *modelo não determinístico*.

Os *modelos não determinísticos* podem ser considerados divididos em dois grupos: *probabilísticos*, quando as variáveis intervenientes têm comportamento puramente aleatório e é, portanto, ignorada a sequência temporal ou a sequência espacial dos valores dessas variáveis, e *estocásticos*, quando, para além da componente aleatória, têm uma outra que permite contemplar a sequência temporal ou a sequência espacial dos valores das variáveis.

A distinção anterior é muito frequentemente adoptada em Hidrologia, devendo, porém, notar-se que alguns autores nesta ciência e em algumas outras ciências incluem os modelos probabilísticos no âmbito geral dos modelos estocásticos.

Os modelos determinísticos podem ser *empíricos* se a análise dos processos hidrológicos em jogo se reduz à procura de uma relação causa-efeito entre variáveis de “entrada” (dados) e variáveis de “saída” (resultados), ou

*fisicamente baseados* se procuram reproduzir as leis físicas que regem os fenómenos.

Os modelos fisicamente baseados podem subdividir-se em *agregados* e *distribuídos* consoante as variáveis hidrológicas integradas na formulação exprimam valores médios no espaço ou valores em pontos desse espaço. Entende-se que modelos hidrológicos fisicamente baseados utilizados ou desenvolvidos em Portugal no período em análise e designados por distribuídos só o serão de facto em relação a aspectos parcelares da sua formulação.

Os modelos respeitantes à qualidade da água, a águas subterrâneas e à erosão pluvial, não obstante serem por vezes considerados objecto da Hidrologia, não são mencionados neste artigo. Também não são tratados modelos de hidrodinâmica a não ser os que se integram em modelos hidrológicos mais gerais de simulação de escoamentos fluviais. Não são incluídos, ainda, modelos desenvolvidos sob o tema da mudança climática que se julgam, por enquanto, inseridos sobretudo na área da Meteorologia. Deste modo, os modelos hidrológicos que constituem o objecto deste artigo circunscrevem-se aos aspectos quantitativos da hidrologia de águas superficiais.

A seguir, inclui-se uma breve referência aos modelos hidrológicos utilizados em Portugal anteriormente a 1975 e mais adiante assinalam-se circunstâncias que se julga terem contribuído significativamente para o progresso e a difusão da modelação hidrológica posteriormente verificados no País.

Os modelos hidrológicos desenvolvidos e aplicados em Portugal no período 1975-2000 e reconhecidos para este trabalho distribuem-se por dois grupos, *modelos determinísticos* e *modelos não determinísticos* (ou seja, *probabilísticos* e *estocásticos*) apresentados adiante.

Os modelos dos dois grupos mencionados são subdivididos em conformidade com o tema tratado e apresentados, em cada subdivisão considerada, por ordem cronoló-

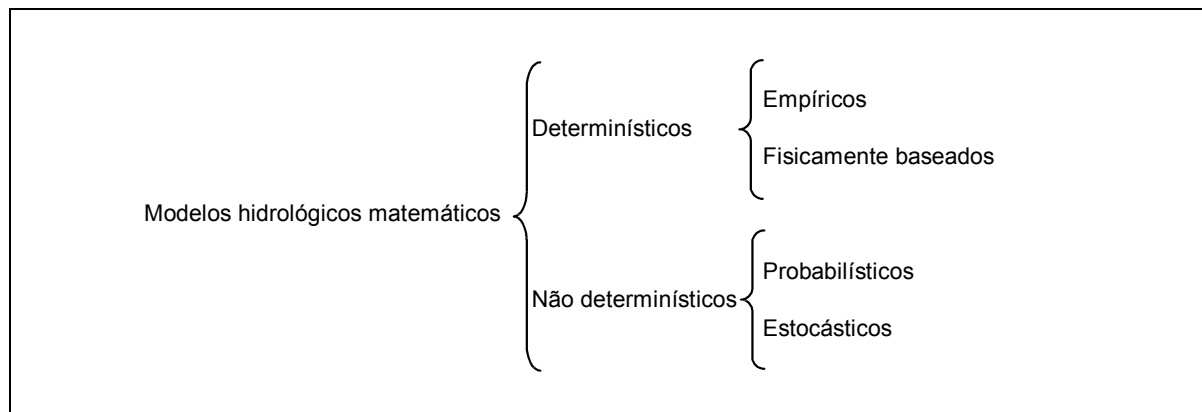


Figura 1. Modelos hidrológicos matemáticos.

gica dos trabalhos em que são mencionados. Assim, no âmbito dos *modelos determinísticos*, referem-se modelos destinados à análise de *cheias*, à simulação de *escoamentos fluviais* e à modelação de *segmentos limitados do ciclo hidrológico* em bacias hidrográficas. No domínio dos modelos *probabilísticos* e *estocásticos*, destacam-se modelos de *acontecimentos extremos* (*cheias*, *precipitações intensas* e *secas*) e modelos para simulação de *escoamentos fluviais* e para *dimensionamento e gestão de albufeiras*.

A menção aos anteriores modelos é acompanhada da indicação sintética dos respectivos conteúdos, finalidades e aplicações realizadas, bem como das dissertações ou teses apresentadas a provas académicas ou a concursos para investigadores nas quais aqueles modelos foram tratados. A bibliografia incluída no final deste artigo contém a indicação dos orientadores daqueles trabalhos científicos. Para não alongar tal bibliografia, sacrificou-se a indicação de posteriores publicações a que, muito frequentemente, aqueles trabalhos deram origem.

Para os modelos que não foram objecto de dissertações (ou de teses) procede-se, além da sua breve apresentação, à indicação, de entre as publicações que se lhe referem, das que se julgam mais significativas ou mais abrangentes.

Entende-se que, embora à margem da temática da modelação hidrológica, se deve registar a publicação em Portugal, no último quartel do século XX, do livro de Lencastre e Franco (1984), que constituiu um texto de referência para apoio ao ensino universitário de Hidrologia e, simultaneamente, para utilização por profissionais dos vários ramos que se ocupam de temas hidrológicos.

Não obstante a avultada quantidade de informação inicialmente recolhida para a elaboração deste artigo, reconheceu-se a necessidade de a completar, tanto mais que os seus autores poderiam ter recebido influência preferencial das áreas com que mais frequentemente contactam. Deste modo, solicitou-se informação suplementar a investigadores de várias instituições. Julga-se, contudo, inevitável a omissão de trabalhos também importantes, para além dos analisados.

Para a apresentação sintética dos conteúdos e das possibilidades dos modelos identificados procurou-se

proceder à apreciação criteriosa dos trabalhos em que foram tratados. Espera-se, deste modo, ter-se conseguido reduzir naquela apresentação as imprecisões a que uma tarefa do tipo da empreendida está sujeita.

## BREVE REFERÊNCIA A MODELOS HIDROLÓGICOS UTILIZADOS EM PORTUGAL ANTERIORMENTE A 1975

Mencionam-se de modo breve os modelos hidrológicos utilizados em Portugal anteriormente a 1975, com a finalidade de enquadrar o período que é objecto deste artigo e de permitir realçar os avanços nele conseguidos. Para o efeito, recorre-se fundamentalmente à síntese apresentada por Quintela (1992).

Até 1930, os procedimentos hidrológicos utilizados no planeamento e no projecto de obras hidráulicas em Portugal eram essencialmente de natureza empírica, baseando-se frequentemente na comparação de situações em que se reconheciam analogias. Não parece, assim, apropriado atribuir a designação de modelos a tais procedimentos.

Há a assinalar a excepção constituída pelo estudo do amortecimento da cheia na albufeira da barragem da Torrinha, próximo de Avis (não construída), que foi efectuado em 1910 e concluiu que o caudal de ponta da cheia natural de 550 m<sup>3</sup>/s seria amortecido para 225 m<sup>3</sup>/s. Julga-se ser este o primeiro estudo desse tipo realizado em Portugal.

Entre 1930 e 1940 registam-se avanços na aplicação da Hidrologia em resultado do surto de estudos e projectos de obras hidráulicas, quer hidroagrícolas (a cargo da Junta Autónoma das Obras de Hidráulica Agrícola, criada em 1930), quer hidroeléctricas (então da responsabilidade dos “Serviços Hidráulicos”). Assim, há a assinalar:

- a associação do conceito de probabilidade ao de caudal de cheia numa secção de um rio, não sendo, porém, usados métodos estatísticos, mas fórmulas empíricas em que o período de retorno figura como parâmetro;

- a avaliação do caudal de ponta de cheia por aplicação da fórmula racional partindo da máxima precipitação diária registada num posto udométrico próximo;
- a estimação do escoamento anual numa secção de um rio sem informação hidrométrica, a partir da precipitação anual e do coeficiente de escoamento, este último avaliado com base em valores anuais do escoamento e da precipitação observados em bacias hidrográficas de características análogas.

No início da década de 1940, concretamente em 1941, há a registar a determinação, por Arantes de Oliveira (Oliveira, 1941), dos valores da precipitação em Lisboa para diferentes períodos de retorno e com durações inferiores ao dia. Tais valores foram largamente utilizados na determinação de caudais para dimensionar colectores de águas pluviais na Região de Lisboa.

Na mesma década foram introduzidos em Portugal modelos hidrológicos inovadores por A. Abecasis Manzanares e J. F. Rebelo Pinto, engenheiros dos “Serviços Hidráulicos” que haviam sido bolseiros em instituições de França, Itália e Suíça. Tais modelos foram aplicados ao dimensionamento hidrológico das obras do rio Lis e dos aproveitamentos hidroeléctricos do rio Zêzere. As inovações introduzidas consistem fundamentalmente em determinar:

- caudais de ponta de cheia pela fórmula semi-empírica de Giandotti;
- valores da precipitação com dado período de retorno, em função da duração, pelo método da “linha de possibilidade climática”, preconizado por Supino;
- caudais de cheia pelo método estatístico de Gibrat, apoiado na distribuição lognormal de três parâmetros aplicada a séries de caudais médios diários.

Veio a ter influência decisiva no progresso da Hidrologia em Portugal o ensino daquela ciência que, A. Abecasis Manzanares, de modo precursor, introduziu, em 1948, na disciplina de Hidráulica Aplicada que então passou a leccionar no Instituto Superior Técnico.

No período seguinte, até 1975, as aplicações de Hidrologia vieram a desenvolver-se essencialmente no âmbito dos “Serviços Hidráulicos”, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, do Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, dos gabinetes de estudo das empresas hidroeléctricas e das primeiras empresas privadas de engenheiros consultores.

Nesse período assinala-se ainda a dissertação de Quintela (1967), que constituiu uma obra de referência em Portugal, para o ensino universitário e para a prática profissional em Hidrologia. Como contribuições principais aí apresentadas e válidas para rios portugueses, destaca-se:

- o estabelecimento de relações paramétricas para estimar a altura do escoamento anual sobre a bacia hidrográfica a partir da precipitação anual, da temperatura do ar e do tipo de solo;

- o reconhecimento de que a altura do escoamento anual médio sobre uma bacia hidrográfica está associada à variabilidade temporal relativa do escoamento anual;
- a verificação de que a forma da curva de duração média anual do caudal médio diário adimensionalizado pelo módulo respectivo depende essencialmente da altura do escoamento anual médio sobre a bacia hidrográfica, altura que, assim, pode ser utilizada como critério de transposição dessa curva para secções de cursos de água sem observações hidrométricas;
- o traçado de cartas para Portugal com isolinhas da altura do escoamento anual médio, da evapotranspiração real anual média e do escoamento anual, bienal ou trienal com dada probabilidade de não ser ultrapassado (estando as duas primeiras cartas incluídas no Atlas do Ambiente).

Próximo de 1975, Tavares (1973), publica um trabalho pioneiro que, pelo facto de apresentar novas perspectivas para a modelação hidrológica, é objecto de apresentação adiante neste artigo.

### **CIRCUNSTÂNCIAS INFLUENTES NO DESENVOLVIMENTO E NA DIFUSÃO DA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA EM PORTUGAL ENTRE 1975 E 2000**

No início do último quartel do século XX os problemas da modelação hidrológica passaram a ser objecto de especial interesse em Portugal, à semelhança do que se verificava noutros países.

Há a assinalar três circunstâncias que se julga terem influenciado significativamente o progresso e a difusão da modelação hidrológica em Portugal: a pós-graduação de investigadores na área de Hidrologia e Recursos Hídricos, a criação do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) e a associação da modelação hidrológica a Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Quanto à primeira das circunstâncias anteriores, anota-se que, no final dos anos setenta e início dos anos oitenta, vários investigadores portugueses se dedicaram a estudos de modelação hidrológica em universidades estrangeiras, em especial, norte-americanas. Uns apresentaram dissertações (ou teses) para obtenção de graus académicos nessas universidades; outros vieram a concluí-las em Portugal, onde, de modo geral, as apresentaram, quer a provas para obtenção daqueles graus, quer a concursos para lugares de investigador.

Passou-se, deste modo, a dispor, em Portugal, de doutores, mestres e outros investigadores que contribuíram para o lançamento dos primeiros cursos de mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, onde os temas de Hidrologia, com ênfase para os da modelação hidrológica, foram objecto de particular atenção. Esses cursos deram lugar a várias dissertações na área daquela modelação e prepara-

ram técnicos que, nessa área, passaram a dedicar-se a actividades de investigação e de projecto em instituições oficiais ou públicas e em empresas de consultoria.

No final da década de 80, a Direcção de Serviços de Recursos Hídricos da então Direcção-Geral dos Recursos Naturais (DGRN/DSRH) deu passos muito significativos no sentido de organizar, tratar, validar e explorar o vasto espólio de dados hidrológicos existentes naquela instituição. O trabalho de organização e de disponibilização de dados prosseguiu de forma mais consistente com o protocolo estabelecido entre a DGRN/DSRH e a UNINOVA com o objectivo de desenvolver uma base de dados hidrológicos (Silva et al., 1990). Desse trabalho nasceu, em 1995, o SNIRH (Marques et al., 1999). A coordenação deste sistema e o carregamento de dados, em permanente actualização, são da responsabilidade do Instituto da Água (INAG); a concepção e o desenvolvimento do SNIRH couberam à empresa Chiron.

Admite-se que o facto de avultada quantidade de dados hidrometeorológicos ter, assim, ficado acessível, via Internet e sem restrições, possa representar uma segunda circunstância que impulsionou a modelação hidrológica.

A “acessibilidade” de dados hidrológicos traduziu-se numa grande apetência para incorporar tal informação na modelação matemática de processos hidrológicos. O desenvolvimento dos SIG, que já anteriormente se vinha a registar, permitiu que estes sistemas adquirissem características que rapidamente os levaram a ser reconhecidos como ferramentas privilegiadas para aquela incorporação. Julga-se que estes factos constituem a terceira circunstância favorável ao desenvolvimento e difusão da modelação hidrológica.

Os SIG serão talvez actualmente os principais responsáveis pela introdução efectiva do “tempo real” na modelação hidrológica, pela incorporação nos modelos de elevada quantidade de informação espacialmente distribuída ou, ainda, pela atracção para a modelação hidrológica distribuída.

A relevância que os SIG podem assumir é exemplificada pela ampla utilização que, no âmbito da recente elaboração dos Planos de Bacia Hidrográfica de rios portugueses, lhes foi dada para “cruzar”, manipular e produzir informação georeferenciada.

## MODELOS HIDROLÓGICOS DETERMINÍSTICOS - 1975-2000

### Análise de cheias

**Modelo do hidrograma unitário** - Correia (1983), trata muito desenvolvidamente o problema da estimação de hidrogramas de cheia com base na aplicação de hidrogramas unitários a hietogramas excepcionais.

Aborda, em primeiro lugar, a estimação de hidrogramas unitários a partir da análise de hidrogramas de cheia e dos hietogramas que os originaram. Para tal, utiliza o mé-

todo da convolução e cinco métodos de optimização dinâmica. Trata também do estabelecimento de hidrogramas unitários sintéticos a partir de parâmetros fisiográficos de bacias hidrográficas.

Os modelos apresentados para estimar os hidrogramas unitários e os hidrogramas de cheias correspondentes a dados hietogramas são aplicados a seis bacias hidrográficas portuguesas, sendo analisados os resultados obtidos.

O referido autor desenvolve trabalhos subsequentes sobre a aplicação à análise de cheias em Portugal de procedimentos e de modelos do *Soil Conservation Service*, em que se inclui o modelo do hidrograma unitário proposto por aquele serviço.

Regista-se que, a partir de 1989, a modelação determinística de cheias apoiada no modelo do hidrograma unitário foi tornada facilmente acessível à comunidade técnica nacional pela divulgação do programa HEC-1 que contou com a presença, em Portugal e pelo período de seis meses, de David Ford, então especialista do *Hydrologic Engineering Center* do *U. S. Corps of Engineers*. Sob a sua orientação, foi também aplicado o modelo HEC-1 a bacias hidrográficas da região metropolitana de Lisboa e, em particular, à bacia do rio Trancão (Ford e Oliveira, 1989).

**Modelo de precipitação e de cheia máximas possíveis** - Henriques (1987), baseado numa formulação predominantemente determinística, procede à aplicação dos métodos de cálculo da *precipitação máxima possível* e da *cheia máxima possível* desenvolvidos pela *International Atomic Energy Administration* das Nações Unidas à bacia hidrográfica do Douro (incluindo a parte localizada em Espanha). Anota-se que o autor prefere as anteriores designações de *precipitação* e de *cheia máximas possíveis* às tradicionalmente utilizadas de *precipitação* e de *cheia máximas prováveis*.

Com base em variáveis meteorológicas e em métodos estatísticos e de interpolação espacial, é avaliada a quantidade máxima de água precipitável nos postos udométricos seleccionados na bacia hidrográfica do Douro (cerca de duas centenas). Recorrendo à análise dos mapas sinópticos dos eventos meteorológicos que geraram as principais cheias na bacia hidrográfica do Douro, é calculada a renovação da quantidade de vapor de água precipitável sobre as várias subregiões da bacia hidrográfica. Finalmente, analisando os registos contínuos da precipitação nos diferentes postos udométricos, são separados os efeitos da orografia que contribuem para a intensificação da precipitação em determinadas áreas.

A *cheia máxima possível* é calculada a partir dos valores da *precipitação máxima possível* pela aplicação de um modelo determinístico de simulação dos processos de transformação da precipitação em escoamento em grandes bacias hidrográficas.

**Modelos apoiados em representações digitais do terreno** - Especialmente por anteceder a existência de cartografia digital acessível ao público, assinala-se o trabalho de Rosário (1990), no âmbito da transformação de

informação analógica de cartas topográficas em informação numérica e da subsequente utilização desta última informação para obter parâmetros fisiográficos necessários à síntese de hidrogramas unitários e ao estabelecimento de um hidrograma deste tipo.

O trabalho em referência compreende as seguintes etapas principais:

- aquisição, a partir da digitalização de cartas topográficas, de dados numéricos correspondentes a pontos do contorno da bacia hidrográfica, de curvas de nível, de linhas de água e representativos de postos udográficos;
- representação gráfica dos dados digitalizados;
- cálculo, com base na informação digitalizada, de valores de parâmetros fisiográficos da bacia hidrográfica, como sejam, área, perímetro e declives característicos da bacia e do curso de água principal;
- estabelecimento de um hidrograma unitário sintético (por recurso ao diagrama tempo-área obtido a partir das linhas isócronas) que corresponde ao hidrograma unitário sintético de Clark e que tem como parâmetros o tempo de concentração e o coeficiente de armazenamento na bacia hidrográfica.

A determinação dos parâmetros daquele hidrograma unitário sintéticos, em vez do recurso usual a fórmulas empíricas, baseia-se na consideração de grandezas hidráulicas, como caudais, velocidades médias do escoamento e volumes armazenados nas linhas de água em resultado da ocorrência das precipitações de projecto. Admite-se, assim, que o hidrograma unitário proposto possa representar de modo mais adequado a não linearidade e a não invariância do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Silva (1996), aborda tratada a modelação do escoamento superficial em condições de cheias com suporte em representações digitais da bacia hidrográfica.

Para além da etapa de aquisição de dados numéricos por digitalização a partir de elementos cartográficos, aquele trabalho compreende as seguintes outras etapas, desenvolvidas de modo integrado e automático:

- Com base na informação digitalizada, é estabelecido o modelo digital do terreno estruturado numa malha triangular irregular, a partir do qual é obtido o correspondente modelo da rede de drenagem, constituído por elementos rectilíneos (designados por arestas colectoras). Nesses modelos estão integrados procedimentos automáticos que os adequam à descrição matemática do escoamento superficial baseada na teoria da onda cinemática.
- Tendo por base os dois anteriores modelos é aplicado o modelo do escoamento superficial. Trata-se de um modelo matemático integralmente distribuído que combina, numa única formulação, a modelação das componentes do escoamento à superfície do terreno

e do escoamento na rede de drenagem. Para a resolução do modelo do escoamento superficial são desenvolvidos e aplicados métodos explícitos e um método implícito. A aplicação dos métodos explícitos exigiu a definição de uma condição de estabilidade que se admite representar a condição de Courant para malhas triangulares irregulares.

- Os modelos desenvolvidos são utilizados para obter hidrogramas de cheias, a partir de hietogramas da precipitação efectiva, em duas bacias hidrográficas, uma representada por cerca de 1 300 triângulos e arestas colectoras (5,7 km<sup>2</sup>) e outra, por cerca de 20 000 triângulos e arestas colectoras (113,6 km<sup>2</sup>). Na primeira das anteriores bacias, o modelo do escoamento superficial é resolvido por métodos explícitos e, na segunda, pelo método implícito que permite uma economia do tempo de processamento compatível com a optimização de parâmetros.

**Modelos de previsão em tempo real** - No âmbito de protocolo celebrado entre a Direcção de Serviços de Recursos Hídricos da então Direcção-Geral de Recursos Naturais, o Instituto de Meteorologia e o Centro de Estudos de Hidrossistemas (CEHIDRO) do Instituto Superior Técnico, tiveram lugar os primeiros trabalhos, com importância significativa sobre a utilização de radares meteorológicos para previsão da precipitação (Dias et al., 1990).

Na sequência dos estudos a que aquele protocolo deu origem, Macedo (1996), apresenta um sistema de previsão de cheias para a bacia hidrográfica do rio Alenquer, em Ponte de Barnabé, que pode ser processado em tempo real.

O sistema apoia-se em informação udométrica, limnimétrica e de radar. A informação udométrica e de radar constitui os dados do modelo hidrológico. Em cada instante, o sistema processa precipitações anteriormente registadas por udografos e, através da informação de radar, previsões da precipitação até ao fim das três horas seguintes.

O modelo hidrológico é agregado e baseia-se no modelo do hidrograma unitário. A informação limnimétrica é utilizada na correcção, por aplicação de um modelo autoregressivo de segunda ordem, dos desvios entre caudais num mesmo instante, inicialmente calculados pelo modelo hidrológico e posteriormente observados.

### Simulação de escoamentos fluviais

Data de 1973 (Tavares, 1973) o único modelo determinístico de simulação de escoamentos fluviais em intervalos de tempo inferiores ou iguais ao mês que se identificou como sendo anterior ao período em análise. Entendeu-se que esse modelo, embora seja um pouco anterior àquele período, deve ser aqui mencionado, pelo marco que representa na abordagem do tema e pelo formalismo científico utilizado.

Trata-se de um modelo determinístico de simulação contínua de escoamentos diários a partir de precipitações

diárias que se baseia em considerações de carácter físico e utiliza conceitos da Teoria dos Sistemas. Na sua génese está o modelo do hidrograma unitário, que Tavares (1973), considera constituir um exemplo de pioneirismo científico da aplicação à Hidrologia dos principais conceitos da Teoria dos Sistemas.

São propostas diferentes formulações para o modelo de simulação consoante o mesmo seja aplicado a bacias hidrográficas em que se conheçam precipitações e características físicas ou, adicionalmente, se disponha de um ou mais anos de escoamentos diários. O modelo é aplicado para obter escoamentos diários no rio Paiva, em Castro Daire, e na ribeira de Odivelas, em Odivelas.

Só cerca de uma dezena de anos mais tarde, investigadores portugueses retomam a modelação de séries de escoamento em intervalos de tempo inferiores ou iguais ao mês, então apoiada num modelo estocástico, que é objecto da alínea “Modelos probabilísticos e estocásticos” subalínea “Simulação de escoamentos fluviais”, e em modelos determinísticos de simulação, seguidamente apresentados.

O primeiro destes modelos determinísticos – modelo OMEGA desenvolvido por Correia (1984) – reúne a capacidade de simulação de escoamentos fluviais à da previsão em tempo real de tais escoamentos. De facto, o modelo é formulado em três versões consistentes e compatíveis: a versão de simulação de escoamentos fluviais que constitui o núcleo das duas outras versões; a versão de calibração semi-automática de parâmetros que interage com o operador permitindo-lhe actuar nos valores dos parâmetros com significado físico; a versão de previsão de escoamentos fluviais em tempo real que junta ao modelo possibilidades de filtragem (filtro de Kalman), sem sacrificar a sua natureza física e conceptual.

O modelo OMEGA incorpora em larga escala a conceptualização física dos processos hidrológicos, designadamente dos respeitantes à infiltração, ao encharcamento e à redistribuição da água no solo, que são de natureza complexa e reconhecidamente não linear.

Mediante a divisão da bacia hidrográfica em áreas progressivamente menores, o modelo pode atender à variabilidade espacial de alguns dos parâmetros e dados nele considerados, relativamente aos quais adquire, assim, características de modelo distribuído. Apresenta, ainda, a possibilidade de ser utilizado na simulação contínua ou na simulação de acontecimentos.

O modelo foi aplicado de modo agregado para obter – nas ópticas da simulação e da previsão em tempo real – caudais sem carácter de excepionalidade em três bacias hidrográficas do território nacional, com características hidrológicas distintas. A discretização temporal dos dados udométricos e dos caudais obtidos foi horária.

Regista-se a inclusão posterior do modelo OMEGA num modelo de delimitação de leitos de cheias por utilização de um Sistema de Informação Geográfica (Rego, 1996).

Hipólito (1985), propõe a modelação do escoamento diário a partir da precipitação diária por utilização de uma versão modificada de um modelo originalmente desenvol-

vido pelo *National Weather Service* dos Estados Unidos da América.

Para o efeito, são revistos alguns dos conceitos implementados no modelo pré-existente e, em conformidade, introduzidas alterações na modelação da intercepção e retenção superficial, da intensidade da infiltração, da distribuição da água infiltrada, da percolação para a toalha freática e da distribuição da água percolada.

Tais alterações exigem a adaptação dos processos de simulação da evapotranspiração e da variação da área que contribui para o escoamento directo, embora mantendo os princípios adoptados na versão original do modelo. Por fim, são introduzidas alterações no processo automático de optimização dos parâmetros.

O modelo é aplicado a quatro bacias hidrográficas portuguesas com áreas entre 290 e 701 km<sup>2</sup>. A base conceptual do modelo, os resultados das aplicações efectuadas, os intervalos de variação dos parâmetros e a análise de sensibilidade da função-objectivo levam a admitir a possibilidade de utilizar o modelo para regionalizar os parâmetros nele intervenientes.

Mello (1987), propõe alterações ao modelo CREC, desenvolvido no *Centre de Reserches et d'Études de Chatou*, da EDF, para simular escoamentos mensais a partir de precipitações. Tais alterações incidem sobre o cálculo da evapotranspiração real e da infiltração. Relativamente a esta última componente, é efectuada a resolução da equação do movimento da água no solo para diferentes valores da intensidade da precipitação e da humidade inicial.

Julga-se merecer destaque a investigação de Lima (1989), no âmbito da modelação do escoamento à superfície do terreno, baseada na teoria da onda cinemática e incorporando a modelação de factores que afectam aquele escoamento, como sejam a rugosidade da superfície, o impacto das gotas de chuva sob diferentes condições de incidência devidas ao vento e a infiltração da água no solo.

Observa-se que o trabalho citado constitui uma das possíveis referências a trabalhos do seu autor, que apresenta uma continuada bibliografia no tema em questão e em outros temas que se admite extravasarem o âmbito deste artigo. Tal bibliografia, que consta de revistas de diferentes especialidades e também do capítulo de um livro (Gerits et al., 1990), respeita frequentemente a trabalhos desenvolvidos em colaboração com investigadores de prestígio reconhecido.

De modo abreviado, regista-se que Fernandes (1990), propõe modificações ao modelo de Salas (1984), com vista a obter escoamentos fluviais mensais a partir de precipitações mensais em bacias hidrográficas com escoamentos mensais nulos em estiagem, como sejam bacias do Sul de Portugal.

O modelo original utiliza a subdivisão da bacia hidrográfica em sub-bacias homogéneas, cada uma modelada por três reservatórios (superficial, subsuperficial e subterrâneo). A tais reservatórios é aplicada a equação do balanço hidrológico tendo em conta os escoamentos a eles afluentes e deles efluentes em conformidade com os processos

hidrológicos considerados no modelo: precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, infiltração, percolação profunda e escoamentos de base e subterrâneo. As modificações propostas por Fernandes (1990), incidem sobre o procedimento de otimização de parâmetros do modelo e sobre o método de cálculo de grande parte das componentes intervenientes no balanço hidrológico.

Matias (1992), apresenta o modelo SWATCIP destinado a simular processos hidrológicos que ocorrem numa bacia hidrográfica. Para o efeito, a bacia é decomposta em unidades elementares homogêneas, os cursos de água são divididos em trechos homogêneos de secção transversal trapezoidal e as encostas, representadas por cascatas de rectângulos com diferentes declives. Sob cada rectângulo é considerado um número variável de estratos de solo, em que o mais profundo suporta o aquífero freático.

Os processos hidrológicos simulados são a evaporação do solo nu e do solo debaixo de um copado, a transpiração, a interceptação, a infiltração, a redistribuição de água no solo, a recarga do aquífero, a retenção superficial, os escoamentos à superfície, subsuperficial e subterrâneo e a propagação do escoamento nos cursos de água. São utilizadas soluções analíticas aproximadas para os processos simulados.

Rodrigues (1995), desenvolve um modelo para simular escoamentos mensais em ribeiras situadas em maciços fracturados.

O modelo procede a balanços hidrológicos mensais e incorpora a filosofia do modelo desenvolvido por Mero (1969), que considera os múltiplos reservatórios de água de uma bacia hidrográfica reunidos em quatro grupos, cada um deles tendo uma dada taxa de depleção e controlando um tipo de escoamento: à superfície, subsuperficial, das nascentes pouco profundas e das nascentes profundas.

No modelo de Rodrigues (1995), o conjunto dos reservatórios que são determinados pelos “diques” existentes nos maciços é representado por um único reservatório que verte para o exterior da bacia hidrográfica quando nele é ultrapassado um limiar do nível da água, a estabelecer por calibração.

O modelo foi calibrado, com bons resultados, nas ribeiras dos Bispos, do Faial da Terra e da Povoação, do maciço da Povoação, na Ilha de S. Miguel (Açores), nas quais se dispunha de observações hidrométricas durante quatro, cinco e três anos, respectivamente.

Martins e Castro (1997), apresentam um modelo para obter escoamentos fluviais mensais mediante o processamento num SIG de informação topográfica e de dados, quer meteorológicos (precipitação e temperatura), quer referentes à cobertura do solo (estes últimos obtidos a partir de imagens de satélite e utilizados para avaliar a capacidade utilizável do solo).

O modelo digital do terreno, gerado a partir dos dados topográficos, é constituído por uma malha de células quadradas de 100 m de lado.

Em cada célula o modelo procede ao balanço hídrico sequencial mensal, para o que aplica o método de Thorn-

thwaite-Matter aos valores mensais da precipitação e da evapotranspiração potencial de Thornthwaite, calculados para a célula por aplicação, com base no SIG, do método de Thiessen aos valores daqueles grandezas referentes a estações climatológicas.

A partir dos resultados daquele balanço e mediante algumas hipóteses simplificativas, o modelo calcula, mês a mês, a contribuição de cada célula para o escoamento fluvial na secção considerada da rede hidrográfica. O escoamento fluvial mensal na referida secção é calculado por acumulação das contribuições das células que constituem a respectiva bacia hidrográfica.

O modelo atende aos efeitos da utilização da água na bacia hidrográfica e da exploração das albufeiras nela localizadas.

O modelo foi aplicado para estimar a série de escoamentos mensais em cinco anos numa secção do rio Cávado em que a área da bacia hidrográfica é de 1 400 km<sup>2</sup>. Os escoamentos mensais estimados pelo modelo e observados aproximam-se, com excepção dos que respeitam a meses de Inverno, para os quais as diferenças são significativas, pelo menos em dois anos.

## Outros modelos hidrológicos determinísticos

Matias (1989), analisa a influência da variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo no comportamento hidrológico de uma pequena bacia, designadamente nos processos de infiltração e de escoamento.

Para o efeito, caracteriza a variabilidade da condutividade considerando-a como uma variável aleatória representada pela função de distribuição lognormal de três parâmetros. Estuda a importância do desvio-padrão e do coeficiente de assimetria daquela variável na resposta determinística de uma bacia hidrográfica a três acontecimentos pluviosos, com intensidade constante ou não. Os resultados assim obtidos são comparados com os fornecidos pelo modelo que propõe, utilizado na óptica de modelo, tanto distribuído, como agregado.

De entre os seus estudos sobre a caracterização de chuvadas, frequentemente com componente experimental baseada em simuladores de chuva, Lima (1990), analisa o efeito da obliquidade da chuva nos valores desta grandeza medidos em udómetros e apresenta factores para corrigir tais valores em função da velocidade do vento, do tipo de chuva e da inclinação e da orientação (relativamente à direcção da chuva) da superfície onde os udómetros estão instalados.

Teixeira (1995), desenvolve o modelo EVAPOT para cálculo da evapotranspiração de referência por utilização de quatro métodos, consoante os dados meteorológicos disponíveis:

- método de Penman-Monteith, quando são conhecidas as temperaturas máxima e mínima, a insolação ou a radiação, a velocidade média do vento e a humidade relativa;

- método da radiação, quando estão disponíveis a temperatura média e a insolação, podendo a humidade relativa e a velocidade diurna do vento ser conhecidas apenas em termos qualitativos;
- método de Blaney-Criddle, quando está disponível apenas a temperatura, podendo a insolação, a velocidade diurna do vento e a humidade relativa ser conhecidas apenas em termos qualitativos;
- método de Hargreaves, quando estão disponíveis apenas temperaturas máxima e mínima.

Os dados meteorológicos podem ser diários, decenais ou mensais.

O modelo EVAPOT, para além da sua utilização possível no balanço hidrológico de bacias hidrográficas, prepara os dados de um outro modelo, o modelo ISAREG, que, a partir das evapotranspirações de referência, procede ao cálculo da evapotranspiração real tendo em vista simulações de rega (Teixeira e Pereira, 1992).

Os modelos classicamente utilizados na modelação determinística da perda de precipitação por intercepção em florestas foram desenvolvidos por Rutter et al. (1971), e por Gash (1979), mas, segundo Valente et al. (1997), sobrestimam significativamente a perda por intercepção nas florestas menos densas do Sul da Europa. Assim, os últimos autores, reformulam os modelos citados para povoamentos florestais esparsos, tendo obtido boas eficiências de modelação ao nível mensal, em povoamentos de pinhal e de eucaliptal em Portugal. Os modelos reformulados baseiam-se fundamentalmente no método de Penman-Monteith, só com a resistência activa, e em parâmetros estruturais da copa: índice de coberto, capacidade de armazenamento da copa, capacidade de armazenamento dos troncos e coeficiente de partição da drenagem a partir da copa.

Quanto à transpiração, David et al. (1997), verificam a boa aderência das estimativas do modelo unilaminar de Penman-Monteith a valores medidos do fluxo de seiva num eucaliptal em Portugal. Segundo aqueles autores, a aplicação generalizada do modelo de Penman-Monteith para estimar a transpiração em florestas é, porém, limitada pela inexistência de submodelos totalmente fiáveis para a resistência do coberto.

A finalizar esta alínea, menciona-se a aplicação, levada a cabo por Azevedo et al. (1999), do modelo CIELO (Azevedo, 1996) para gerar variáveis climáticas com interesse para a caracterização hidrológica da Ilha Terceira (Açores). Tal geração é validada com base em observações numa rede de estações climatológicas e de postos udométricos para o efeito instalados. O modelo CIELO é um modelo aplicável a ambientes insulares complexos que, a partir de observações à escala sinóptica, gera variáveis climáticas à escala local, variáveis que, por sua vez, podem ser utilizadas na modelação dos fenómenos hidrológicos que têm lugar em bacias hidrográficas insulares.

## MODELOS PROBABILÍSTICOS E ESTOCÁSTICOS - 1975-2000

### Análise de cheias

No início do período em apreciação regista-se o desenvolvimento de modelos para análise de cheias baseados em métodos estocásticos aplicados a séries hidrológicas, quer de valores extremos (Tavares, 1977 e 1980), quer de duração parcial (Tavares e Silva, 1983). A abordagem estocástica então proposta revelou-se particularmente adequada à optimização dinâmica da gestão de albufeiras de fins múltiplos (Tavares e Kelman, 1985). A utilização de séries de duração parcial na análise de cheias veio a ser retomada por Correia (1983 e 1987).

Regista-se que, muito anteriormente a 1975, a análise de séries de caudais instantâneos máximos anuais mediante a utilização de modelos probabilísticos tinha passado, em Portugal, a fazer parte da prática da Engenharia.

As funções de distribuição de probabilidade então mais correntemente utilizadas com essa finalidade eram as da lei lognormal e da lei gama de três parâmetros (ou lei de Pearson III). Nos anos 60 passaram a adoptar-se também as funções de distribuição de probabilidade das leis assintóticas de extremos de Gumbel e de Fréchet.

Investigação com aspectos originais e aplicações pioneiras em Portugal, no domínio da análise de cheias baseada em modelos probabilísticos, são levadas a cabo por Henriques (1981). O trabalho deste autor consistiu essencialmente em:

- apresentar, de modo sistemático e abrangente, os modelos baseados em nove funções de distribuição de probabilidade, algumas das quais então pouco divulgadas, como a função generalizada de extremos de Fisher-Tippett e a distribuição lambda, esta última já anteriormente tratada por Henriques (1979);
- apresentar, também sistemática e abrangentemente, métodos pouco divulgados de estimação de parâmetros das anteriores funções de distribuição, para além dos métodos usuais dos momentos e da máxima verosimilhança;
- aplicar os referidos modelos, combinados com diferentes métodos de estimação de parâmetros, a dezasseis séries de caudais instantâneos máximos anuais observados em estações hidrométricas portuguesas (seis outras séries disponíveis haviam sido rejeitadas em testes de aleatoriedade e de homogeneidade);
- analisar a adaptabilidade que as distribuições consideradas oferecem para representar as dezasseis séries de caudais e assinalar aquelas que se apresentam mais vantajosas nesse aspecto;
- analisar a eficiência das previsões dos caudais de cheia obtidas pela aplicação das diferentes funções de distribuições e métodos de estimação dos parâmetros e destacar aquelas que permitem obter melhores resultados.



Correia (1983), aplica modelos probabilísticos tradicionais para analisar séries dos valores máximos anuais de *caudais médios diários*, em vez dos de *caudais instantâneos*, como é mais corrente. Propõe expressões que permitem relacionar em Portugal os caudais médios diários máximos anuais com os caudais instantâneos máximos anuais.

Por outro lado, desenvolve um modelo estocástico bivariado para análise de séries de duração parcial de caudais médios diários (séries de caudais médios diários acima de um dado limiar). O modelo baseia-se na consideração das funções de distribuição de probabilidade, quer do número de excedências verificadas, quer do valor dessas excedências acima do limiar estabelecido.

Propõe uma expressão para obter, a partir dos valores estimados para os parâmetros das referidas distribuições de probabilidade, o máximo caudal médio diário com dado período de retorno.

Tantos os modelos probabilísticos, como o modelo estocástico, são aplicados por Correia (1983), às séries de caudais médios diários registadas em doze estações hidrométricas portuguesas para determinar os máximos caudais médios diários com dado período de retorno. Os resultados obtidos pelos dois tipos de modelos são comparados.

Salienta-se que o modelo estocástico estabelecido para as séries de duração parcial oferece também a possibilidade de avaliar o tempo durante o qual é excedido um dado caudal médio e também o volume correspondente a essa excedência, possibilidade que tem sido pouco explorada e constitui uma das vantagens do modelo, no parecer do seu autor.

Serra (1986), passa em revista os modelos bayesianos de inferência conhecidos para as distribuições normal e de Pearson III, frequentemente adoptadas na modelação de variáveis hidrológicas. Seguidamente, desenvolve modelos bayesianos para os parâmetros daquelas duas distribuições, capazes de traduzir tipos de informação *a priori* usualmente disponíveis sobre variáveis hidrológicas, como sejam, caudais instantâneos máximos anuais e escoamentos anuais. Apresenta exemplos de aplicação para o rio Paiva em Fragas da Torre.

Henriques (1990), retoma a investigação que anteriormente realizara neste tema (Henriques, 1981). Como desenvolvimentos adicionais no trabalho de 1990 há a assinalar:

- o maior número e as maiores dimensões das séries de caudais instantâneos máximos anuais que são objecto de análise estatística: 44 séries com dimensão entre 16 e 67 anos;
- a introdução de aperfeiçoamentos e aditamentos aos modelos de distribuição de probabilidades utilizados;
- as comparações para evidenciar as vantagens e as desvantagens dos diferentes modelos de distribuição de probabilidades e fundamentar a selecção dos mais adequados;
- a incorporação de investigação sobre cheias históricas na análise efectuada;

- a avaliação da influência que a incerteza dos valores dos caudais registados exerce na magnitude e na precisão dos caudais estimados por métodos estatísticos;
- a incorporação da estimativa da *cheia máxima possível* na análise estatística, com o fim de reduzir a incerteza das estimativas de caudais com períodos de retorno elevados (de 1000 a 10000 anos).

Sousa (1999), apresenta uma análise regional de cheias. São comparados vários procedimentos de estimação regional de caudais extremos, utilizando 21 séries de caudais instantâneos máximos anuais com mais de 15 anos, registadas em Portugal. São investigados dois procedimentos para delinear regiões homogêneas e dois métodos para estimar regionalmente caudais de cheias.

### Análise de precipitações intensas

O difícil acesso a valores de precipitações intensas com duração inferior ao dia levou vários investigadores a preparar informação de carácter local, regional ou mesmo nacional, sobre esta matéria. Embora existam trabalhos anteriores ao período em análise, é essencialmente a partir dos anos 70 e, em especial, dos anos 80 que o tema é amplamente tratado.

Em David (1976) e em Godinho (1984) (este último trabalho, retomado pelo seu autor em datas posteriores), são apresentados os primeiros mapas com a representação, para Portugal, de isolinhas da relação entre precipitações intensas com durações distintas e igual período de retorno.

Pela ampla utilização na determinação das precipitações de projecto em pequenas bacias hidrográficas, designadamente, com tempos de concentração até 120 min, destaca-se o estudo de Matos e Silva (1986). Estas autoras propõem a utilização a nível nacional das curvas intensidade-duração-frequência (curvas I-D-F) que estabelecem para Lisboa e sugerem que as intensidades médias das precipitações resultantes da aplicação daquelas curvas sejam agravadas de 20% nas regiões montanhosas de altitude superior a 700 m e deduzidas de 20% nas regiões do Nordeste. No estabelecimento das curvas I-D-F referentes a Lisboa são utilizadas precipitações registadas no Observatório Infante D. Luís (de 1860 a 1939), no Instituto Geofísico (de 1940 a 1967) e no Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica (de 1968 a 1983).

Tomás (1992), como contribuição restrita de um trabalho que excede o âmbito do presente artigo, estabelece curvas I-D-F para períodos de retorno entre 2 e 100 anos e curvas do tipo Huff de distribuição temporal da precipitação para os postos udográficos de Sassoeiros, Portela e Vale Formoso.

A análise efectuada incide sobre acontecimentos pluviométricos independentes, considerando, como tal, os acontecimentos separados de, pelos menos, seis horas sem ocorrência de precipitação.

Na obtenção das curvas I-D-F, o autor conclui que as funções de distribuição das leis lognormal e de Pearson III se ajustam bem às amostras de precipitações máximas anuais com durações entre 15 min e 24 h. Opta por estabelecer as curvas I-D-F com base na segunda daquelas distribuições de forma a poder comparar os resultados que obtém com os de Matos e Silva (1986), para Lisboa.

Para estabelecer as curvas de distribuição temporal da precipitação do tipo Huff selecciona os acontecimentos pluviosos independentes com precipitação superior a 12,5 mm. Cada acontecimento é caracterizado no que respeita ao valor da precipitação, à sua duração, à precipitação acumulada ao longo da duração e ao quartilho (quarto da duração) a que corresponde maior precipitação. Para cada quartilho são estabelecidas curvas de distribuição temporal da precipitação que, para percentis entre 10% e 90%, relacionam a precipitação percentual acumulada com a duração percentual acumulada. Por exemplo, a curva para o percentil 10% representa as precipitações que, para qualquer percentagem da duração acumulada, só não são excedidas em 10% dos casos verificados.

Brandão Pereira (1995), mediante a aplicação de procedimentos análogos aos do trabalho precedente, apresenta uma extensa e completa análise no âmbito das precipitações intensas para o que recorre à digitalização de 41 276 udogramas registados nos postos udográficos da Universidade de Aveiro, de Lisboa (IGIDL), de Évora-Cemitério e de Faro-Aeroporto.

Numa primeira etapa, e mediante a análise estatística das precipitações máximas anuais com durações entre 5 min e 12 h registadas nos anteriores quatro postos udográficos, estabelece, para esses postos, relações entre a precipitação e a respectiva duração (*curvas de possibilidade udométrica*) para períodos de retorno entre 2 e 100 anos. No âmbito dessa análise, a autora conclui ser a função de distribuição da lei de Gumbel a que melhor representa a precipitação intensa nos postos udográficos considerados.

Para os mesmos postos udográficos são, seguidamente, estabelecidas curvas, do tipo Huff, de distribuição temporal da precipitação durante acontecimentos pluviosos intensos. Para o efeito, os acontecimentos pluviosos registados em cada posto udográfico são classificados em dois grupos definidos consoante os valores da precipitação e da correspondente intensidade média. O tratamento subsequente da informação relativa a cada grupo é análogo ao adoptado por Tomás (1992).

Na sequência do trabalho de Brandão Pereira (1995), Brandão e Hipólito (1997), propõem uma relação, válida para o País, entre precipitações intensas com diferentes durações e igual período de retorno.

Mais recentemente, Brandão e Rodrigues (1998), apresentam curvas IDF para dezassete postos udográficos e para os períodos de retorno de 50, 100, 500 e 1000 anos. Os mesmos autores apresentam também curvas de *precipitação máxima provável* para cinco postos udográficos (Brandão e Rodrigues, 1999). Regista-se que estes dois últimos trabalhos foram objecto de desenvolvimento posteriormente ao

período em análise neste artigo, mediante a consideração de um maior número de postos udográficos.

## Análise de secas

O estudo das secas regionais em Portugal iniciou-se com Santos (1981). Neste trabalho são introduzidos conceitos novos e é apresentada uma definição de seca regional tendo em conta, não só o fenómeno determinante da escassez de água, mas também a utilização dada à água.

A caracterização da seca regional utiliza um conjunto de variáveis que medem a duração e a intensidade da seca e a área afectada. A abordagem seguida no estudo destas variáveis assenta na teoria dos chorrilhos (*run theory*), anteriormente usada no estudo de secas pontuais. Trata-se, portanto, de um modelo probabilístico. Santos (1981), procede a uma caracterização teórica da função de distribuição, da média e da variância das variáveis acima referidas.

O modelo desenvolvido é aplicado à análise das secas meteorológicas (isto é, causadas por carência de precipitação) anuais e mensais em Portugal. Consideram-se, para o efeito duas regiões, uma húmida (Minho, Douro Litoral, Beira Litoral e parte da Beira Interior) e outra seca (parte restante do território). A procura de água é modelada através dos percentis 10 e 20 da precipitação anual média em cada uma das regiões. Por fim, comparam-se os resultados do modelo com as “secas observadas” no período entre 1932-33 e 1979-80.

A metodologia proposta neste trabalho foi posteriormente ampliada com conceitos da Teoria do Risco, como risco, fiabilidade, resiliência e vulnerabilidade (Correia et al., 1988). Também Vaz (1993), retoma a metodologia de Santos (1981), compara-a com outras metodologias e utiliza-a para caracterizar uma seca regional em tempo real.

Santos (1996) apresenta um modelo de secas meteorológicas regionais, baseado na distribuição multivariada de uma variável instrumental, designadamente a precipitação. Admite ocorrer seca numa dada região quando o valor da variável instrumental é inferior a um limiar, pré-fixado, abaixo do qual se considera não serem satisfeitas as necessidades de água na região.

O modelo permite analisar a evolução espacial das secas e associar riscos à sua ocorrência. Pode ser aplicado em cada ano, para identificar a área em seca e a severidade da seca, ou a uma sequência de anos, fornecendo, adicionalmente, a duração da seca.

São apresentados resultados da aplicação do modelo às precipitações anuais na parte portuguesa da bacia hidrográfica do rio Guadiana, entre 1940/41 e 1994/95.

## Simulação de escoamentos fluviais

No início da década de 80, Santos (1983) propõe um modelo estocástico para simular escoamentos fluviais (Santos, 1983), que recebeu a designação de modelo de *desagregação por etapas*. Tal modelo utiliza técnicas de desa-

gregação que estavam em desenvolvimento desde o início da década de 70 no âmbito da modelação de séries de variáveis hidrológicas com correlação temporal ou espacial.

Os modelos de desagregação permitem preservar algumas propriedades estatísticas das séries de variáveis hidrológicas a mais de um nível, temporal ou espacial. Tal preservação era inicialmente conseguida à custa de um elevado número de parâmetros que foi possível reduzir muito significativamente no modelo de *desagregação por etapas*. Esta redução deve-se ao facto de, em cada etapa, o modelo proceder à repartição das séries a modelar em apenas dois blocos. Por exemplo, no caso da aplicação à obtenção de escoamentos mensais por desagregação de escoamentos anuais, em cada etapa o modelo fornece o escoamento num dado mês do calendário e a soma dos escoamentos nos restantes meses do ano que não foram ainda desagregados, mas que o serão nas etapas seguintes.

Tendo em vista preservar a assimetria exibida pelas séries de variáveis hidrológicas, Santos (1983) recorre a transformações logarítmicas. Para que tais transformações permitam preservar as assimetrias das séries referentes ao nível temporal inferior considera a inclusão adicional de parâmetros de localização.

O modelo é aplicado a cinco cursos de água da bacia do Missouri cujas bacias hidrográficas apresentam diferentes condições hidrológicas e geo-hidrológicas. Nessas aplicações é avaliado o desempenho do modelo e são comparados resultados decorrentes de diferentes métodos de definição dos parâmetros de localização.

Os bons resultados das anteriores aplicações justificam o interesse em retomar o modelo de *desagregação por etapas*, adaptando-o à obtenção de escoamentos diários (Silva, 1989). O modelo adaptado é aplicado ao rio Paiva em Castro Daire, revelando-se adequado à simulação de escoamentos mensais e diários por desagregação de escoamentos, respectivamente, anuais e mensais.

Recentemente, Guimarães (1997) utiliza um modelo ARIMA para simular escoamentos mensais, procedendo à sua aplicação a três cursos de água da bacia hidrográfica do rio Douro.

## Dimensionamento e gestão de albufeiras

Vaz (1984) desenvolve um extenso trabalho no âmbito do planeamento de sistemas de albufeiras em condições de incerteza que, não obstante ultrapassar o domínio dos modelos hidrológicos, é mencionado em virtude de apresentar uma forte componente de modelação hidrológica estocástica.

O trabalho apresenta a revisão crítica dos modelos matemáticos utilizados no planeamento de sistemas de albufeiras, nomeadamente, no dimensionamento de albufeiras, e discute os méritos relativos dos modelos de optimização e de simulação.

Para tratar a incerteza hidrológica no planeamento em recursos hídricos aquele autor propõe a utilização de

séries sintéticas de escoamento, bem como de procedimentos para selecção do modelo de geração mais adequado e para incorporação dos parâmetros hidrológicos. É ainda analisado o problema das “falhas” dos sistemas e são propostas alterações no conceito tradicional de fiabilidade.

O trabalho inclui uma aplicação à bacia hidrográfica do rio Malema, na República Popular de Moçambique.

Ribeiro (1996) apresenta um modelo para dimensionar capacidades úteis de albufeiras com base em séries sintéticas de escoamentos mensais obtidas por desagregação de séries de escoamentos anuais, de acordo com o método dos fragmentos.

É gerado um elevado número de séries sintéticas de escoamentos mensais. A cada série é aplicado o método dos picos sequenciais para estimar a capacidade útil necessária à garantia, sem falhas, do fornecimento de um volume de água pré-fixado.

Mediante o ajustamento de uma lei de distribuição de probabilidade à série de capacidades úteis assim obtida, é avaliada a probabilidade de uma dada capacidade útil assegurar o fornecimento integral do pedido pré-fixado. Tal probabilidade é assimilada à garantia do fornecimento deste pedido.

O modelo é aplicado a uma hipotética albufeira localizada na estação hidrométrica de Cunhas, no rio Beça. Para o efeito, são considerados diferentes pedidos de água e adoptada a lei de Gumbel.

Oliveira (1994) estuda a selecção de políticas de gestão de sistemas de albufeiras com fins múltiplos com vista a identificar os conjuntos de regras de descarga e de utilização das capacidades de armazenamento que maximizam os benefícios globais proporcionados por aqueles sistemas e que cumprem as restrições impostas à operação dos mesmos.

Tais políticas, tendo de ser compreendidas por utilizadores da água com interesses distintos e contraditórios, devem materializar-se por regras de fácil explicação e aplicação, sem que tal implique a diminuição dos benefícios produzidos pelos sistemas.

São discutidas as limitações da programação linear e da programação dinâmica na selecção de políticas e é proposta uma metodologia baseada em “algoritmos genéticos”, inspirada na teoria de evolução natural de Darwin, em que uma população de possíveis soluções é submetida a um ambiente de selecção, de combinação e de mutação que promove a evolução da população no sentido da constante melhoria do desempenho de cada solução.

A avaliação de cada solução implica a simulação dinâmica da operação do sistema com o objectivo de calcular os benefícios globais da utilização da água. A probabilidade de sobrevivência e de reprodução da solução depende do seu desempenho relativo.

O algoritmo proposto foi aplicado a sistemas de albufeiras com diferentes configurações e objectivos e a um caso de estudo então de actualidade: *Central Valley Project* na Califórnia.

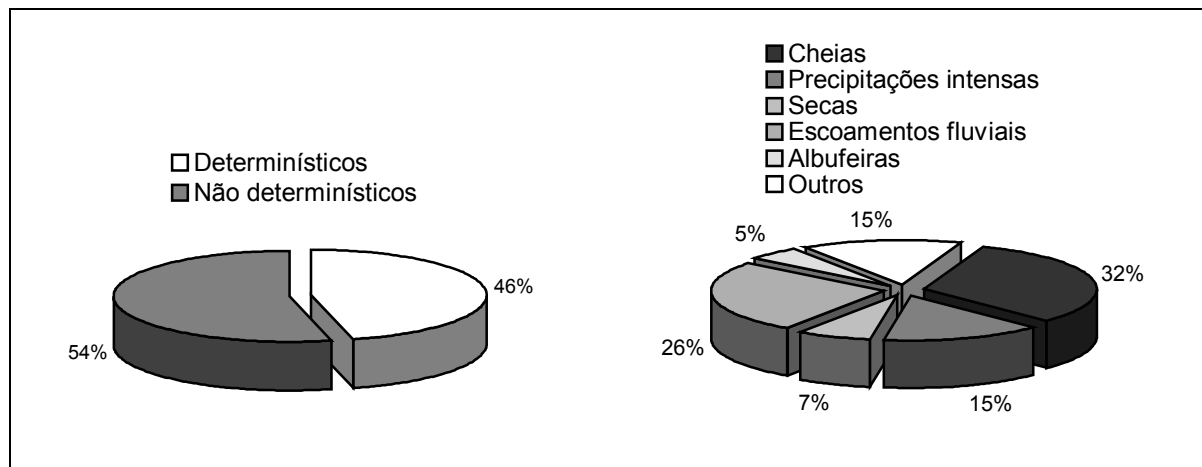


Figura 2. Repartição dos trabalhos mencionados nas alíneas “Modelos hidrológicos determinísticos” e “Modelos probabilísticos e estocásticos” por: a) modelos determinísticos e não determinísticos; b) temas<sup>1</sup>.

Não obstante se reconhecer que o trabalho de Oliveira (1994), se não insere exclusivamente num dos tipos de modelos considerados – determinísticos ou probabilísticos e estocásticos – julgou-se mais adequado incluí-lo no segundo daqueles tipos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Julga-se que a mais de meia centena de trabalhos referidos nas alíneas “Modelos hidrológicos determinísticos” e “Modelos probabilísticos e estocásticos” deste artigo, em que se incluem 29 dissertações ou teses, caracteriza a investigação desenvolvida em Portugal no âmbito da modelação hidrológica, no período considerado. Aquele número significativo de trabalhos demonstra o interesse que tal modelação mereceu dos investigadores portugueses. Regista-se que metade dos trabalhos foi publicada na década de 1981 a 1990.

Os modelos tratados nos trabalhos analisados repartem-se de modo praticamente igual por modelos determinísticos e não determinísticos; as cheias, a simulação de escoamentos fluviais e as precipitações intensas constituem os temas privilegiados – Figura 2.

Admite-se que os temas acabados de referir possam continuar a merecer especial interesse, orientado sobretudo para a previsão de precipitações e de cheias em tempo real e para a gestão de albufeiras com vista ao controlo de cheias e à garantia do fornecimento de água.

Não obstante se reconhecer os riscos de uma antevisão parcial e limitada, afigura-se que possam surgir novos desenvolvimentos, nomeadamente, no âmbito da modelação hidrológica distribuída baseada em Sistemas de Informação Geográfica e no da incorporação de contingências em associação com cenários de mudança climática. De facto, julga-se que será incontornável a necessidade de introduzir nos modelos hidrológicos as tendências que se têm vindo a reconhecer nos valores de algumas variáveis

hidrológicas e que apontam no sentido de um futuro “estatisticamente diferente” do passado.

<sup>1</sup> Para obter a Figura 2a considerou-se que a componente não determinística era a predominante no trabalho de Correia (1983) (tratado nas alíneas “Modelos hidrológicos determinísticos”, subalínea “Modelo do hidrograma unitário” e “Modelos probabilísticos e estocásticos”, subalínea “Análise de cheias”), que assim, foi contabilizado nos modelos não determinísticos.

## REFERÊNCIAS

- Assinalam-se com asterisco (\*) as publicações citadas neste artigo que não se referem aos modelos hidrológicos apresentados nas alíneas “Modelos hidrológicos determinísticos” e “Modelos probabilísticos e estocásticos”.
- AZEVEDO, E. B. (1996). *Modelação do clima insular à escala local. Modelo CIELO aplicado à Ilha Terceira*. Dissertação de Doutoramento. Universidade dos Açores (orientação de L. Santos Pereira). Açores.
- AZEVEDO, E. B., PEREIRA, L. S., ITIER, B. (1999). Modelling the local climate in island environments: water balance applications. *Agricultural Water Balance*, 40:393-403.
- BRANDÃO PEREIRA, C. (1995). *Análise de precipitações intensas*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação de J. Reis Hipólito). Lisboa.
- BRANDÃO, C., HIPÓLITO, J. N. (1997). *Análise da precipitação para o estudo de cheias em Portugal*. 3º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Maputo, Moçambique.
- BRANDÃO, C., RODRIGUES, R. (1998). *Precipitações intensas em Portugal Continental para períodos de retorno até 1000 anos*. Direcção dos Serviços de Recursos Hídricos, DSRH, Instituto da Água, INAG. Lisboa.
- BRANDÃO, C., RODRIGUES, R. (1999). *Probable maximum precipitation (PMP) for five Portuguese raingauges*. XXVIII International Association for Hydraulic Research Congress. Grass, Áustria.

- CORREIA, F. N. (1983). *Métodos de análise e determinação de caudais de cheia*. Tese apresentada a concurso para Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (orientação de L. Veiga da Cunha). Lisboa.
- CORREIA, F. N. (1984). *OMEGA. A watershed model for simulation, parameter calibration and real-time forecast of river flows*. Dissertação de Doutoramento. Colorado State University (orientação de H. Morel-Seytoux). Colorado.
- CORREIA, F. N. (1987). Engineering risk in flood studies using multivariate partial duration series. In: L. Duckstein and E. Plate (Ed.) – *Engineering reliability and risk in water resources*, NATO ASI Series E, Vol. 124, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- CORREIA, F. N., SANTOS, M. A. e RODRIGUES, R. (1988). Risk analysis and regional characterization of droughts. *Memória* n.º 709, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- DAVID, T. S. (1976). *Drenagem de estradas, caminhos de ferro e aeródromos. Estudo hidroológico, Determinação de caudais de ponta de cheia em pequenas bacias hidrográficas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Proc. 62/12/5309, Relatório 7498. Lisboa.
- DAVID, T. S., FERREIRA, M. I., DAVID, J. S., PEREIRA, J. S. (1997). Transpiration from a mature Eucalyptus globulus plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. *Oecologia*, 110:153-159.
- DIAS, J. B., SANGUINO, J. E., DIAS, M. R., OLIVEIRA, R., BARBOSA, S. (1990). *Application of weather radar for the alleviation of climatic hazards*. 1989 Progress Report, DGRN/INMG/CAPS, Publicação n.º 4/90, DGRN/DSH. Lisboa.
- FERNANDES, A. L. S. (1990). *Modelação matemática da transformação da precipitação em escoamento à escala mensal*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação de E. Gil Santos). Lisboa.
- FORD, D. T., OLIVEIRA, R. O. (1989). *Estudo hidroológico da bacia hidrográfica do rio Trancão em Ponte de Canas – uma aplicação do package de análise de cheias HEC-1*. Direcção-Geral dos Recursos Naturais/SSH. Lisboa.
- GASH, J. H. C. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 105: 43-55. (\*).
- GERITS, J., LIMA, J. P., Van Der BROEK, M. W. (1990). Overland flow and erosion. In: M. G. Anderson and T. P. Burt (Ed.) – *Process studies in hillslope hydrology*, John Wiley and Sons Publishers, 173-214. Chichester.
- GODINHO, S. F. (1984). *Valores máximos anuais da quantidade da precipitação. Estimativa dos valores relativos a durações inferiores a 24 horas*. Nota Técnica de Meteorologia e Geofísica. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica. Nº 2012. Divisão de Hidrometeorologia. Lisboa.
- GUIMARÃES, R. C. (1997). *Modelização ARIMA de sucessões cronológicas: aplicação à previsão de escoamentos mensais*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Évora (orientação de Bento Murteira; co-orientação de F. C. Mercês de Mello). Évora.
- HENRIQUES, A. G. (1979). *Modeling flood frequency relationships using lambda distributions*. Dissertação de Mestrado. Cornell University (orientação de J. R. Stedinger). New York.
- HENRIQUES, A. G. (1981). *Análise da distribuição de frequências de caudais instantâneos máximos anuais. Aplicação à previsão de caudais de cheias*. Tese apresentada a concurso para Especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (orientação de L. Veiga da Cunha). Lisboa.
- HENRIQUES, A. G. (1987). *Metodologia de cálculo da cheia máxima provável em grandes bacias hidrográficas. Aplicação à bacia hidrográfica do rio Douro*. III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e de Recursos Hídricos. Salvador, Brasil.
- HENRIQUES, A. G. (1990). *Análise de distribuição de frequências de caudais de cheia*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico (orientação de A. Carvalho Quintela). Lisboa.
- HIPÓLITO, J. N. (1985). *NWSIST: Um sistema de simulação contínua de processos hidroológicos*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico (orientação de A. Carvalho Quintela). Lisboa.
- LENCASTRE, A., FRANCO, F. M. (1984). *Lições de Hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa. (\*).
- LIMA, J. P. (1989). The influence of the angle of incidence of the rainfall on the overland flow process. In: M. L. Kavvas (Ed.) – *New Direction for Surface Water Modeling*, IAHS Publ. n.º 181:73-82.
- LIMA, J. P. (1990). The effect of oblique rain on inclined surfaces; a monograph for the rain-gauge correction factor. *Journal of Hydrology*, 115: 407-412.
- MACEDO, M. E. Z. (1996). *Aplicação do radar meteorológico na previsão de cheias*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa – Faculdade de Ciências (orientação de J. Reis Hipólito; co-orientação de J. Côrte-Real). Lisboa.
- MARQUES, M., QUADRADO, F., RODRIGUES, R. (1999). *Historial do SNIRH*. 4º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Coimbra. (\*).
- MARTINS, J. P., CASTRO, P. R. (1997). Metodologias para planeamento de recursos hídricos com um Sistema de Informação Geográfica – O modelo HIDROGIS-3D. *Recursos Hídricos*. 18(1):3-16.
- MATIAS, P. G. (1989). *Análise da influência da variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada nos processos de infiltração e escoamento numa pequena bacia*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia (orientação de F. Nunes Correia; co-orientação de E. Gil Santos e de L. Santos Pereira). Lisboa.
- MATIAS, P. G. (1992). *SWATCHP. Um modelo para simulação contínua de processos hidroológicos num sistema vegetação-solo-aquífero*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior de Agronomia (orientação de L. Santos Pereira; co-orientação de H. Morel-Seytoux). Lisboa.
- MATOS, M. R., SILVA, M. H. (1986). *Estudos de precipitação com aplicação no projecto de sistemas de drenagem pluvial. Curvas intensidade-duração-frequência da precipitação em Portugal*. Encontro Nacional de Saneamento Básico/86. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- MELLO, F. C. M. (1987). *Um modelo de simulação contínua para conversão da precipitação em escoamento*. Dissertação de Doutoramento. Universidade de Évora (orientação A. Santos Júnior). Évora.
- MERO, F. (1969). *An approach to daily hydrometeorological water balance computation for surface and groundwater basins*. Seminar on Integrated Surveys for River Basin Development. Delft. (\*).
- OLIVEIRA, E. A. (1941). *Esgotos de Lisboa*. Câmara Municipal de Lisboa. Lisboa. (\*).
- OLIVEIRA, R. P. (1994). *Operating rules for multi-reservoir systems*. Dissertação de Doutoramento. Faculty of the Graduate School of Cornell University (orientação de D. P. Loucks). Cornell.

- QUINTELA, A. C. (1967). *Recursos de águas superficiais em Portugal Continental*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico. Lisboa. (\*).
- QUINTELA, A. C. (1992). *Engenharia Hidráulica; História e desenvolvimento da Ciência em Portugal no séc. XX*. Publicações do II Centenário da Academia das Ciências de Lisboa, 437-464. Lisboa. (\*).
- REGO, F. C. (1996). *Utilização de sistemas de informação geográfica (SIG's) e da modelação hidrológica e hidráulica na definição de leitos de cheia*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação de N. Nunes Correia). Lisboa.
- RIBEIRO, P. S. F. (1996). *Dimensionamento do volume útil de albufeiras*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação de E. Gil Santos). Lisboa.
- RODRIGUES, R. R. (1995). *Hidrologia de ilhas vulcânicas*. Tese apresentada a concurso para Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (orientação de F. Nunes Correia). Lisboa.
- ROSÁRIO, E. M. R. (1990). *Determinação cartográfica do hidrograma unitário*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação J. Reis Hipólito). Lisboa.
- RUTTER, A. J., KERSHAW, K. A., ROBINS, P. C., MORTON, A. J. (1971). A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a Corsican pine plantation. *Agricultural Meteorology*, 9:369-384. (\*).
- SALAS, J. D. (1984). *Seasonal model for watershed simulation*. Erosion and river behavior analysis. Short Course. Colorado State University. (\*).
- SANTOS, E. G. (1983). *Disaggregation modeling of hydrologic time series*. Dissertação de Doutoramento. Colorado State University (orientação de J. D. Salas). Colorado.
- SANTOS, M. A. (1981). *On the stochastic characterization of regional droughts*. Tese apresentada a concurso para Especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (orientação de L. Veiga da Cunha e V. M. Yevjevich). Lisboa.
- SANTOS, M. J. J. (1996). *Modelo de distribuição de secas regionais*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação de A. Gonçalves Henriques). Lisboa.
- SERRA, P. C. (1986). *Modelos de inferência bayesiana para as distribuições normal e Pearson III com aplicação em Hidrologia*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação de A. Gonçalves Henriques e E. Gil Santos). Lisboa.
- SILVA, M. L. F., OLIVEIRA, R. O., FORD, D. T. (1990). *A time-series object for water resources information system*. UNINOVA/DGRN, Publicação n° 7/90, DGRN/DSH. Lisboa. (\*).
- SILVA, M. M. P. (1989). *Desagregação diária por etapas. Aplicação à geração de séries sintéticas de escoamentos diários*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação de E. Gil Santos). Lisboa.
- SILVA, M. M. P. (1996). *Modelo distribuído de simulação do escoamento superficial*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico (orientação de J. Reis Hipólito). Lisboa.
- SOUSA, P. A. (1999). *Contribuição para a análise regional da distribuição de caudais de cheia em Portugal Continental*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia (orientação de P. G. Matias). Lisboa.
- TAVARES, L. V. (1973). *Métodos de simulação hidrológica*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- TAVARES, L. V. (1977). The exact distribution of extremes of a non-Gaussian process. *Stochastic processes and their application*. Vol. 5(2):151-156.
- TAVARES, L. V. (1980). A non-Gaussian markovian model to simulate hydrologic processes. *Journal of Hydrology*, Vol. 46:281-287.
- TAVARES, L. V., KELMAN, J. (1985). A method to optimize the flood retention capacity for a multi-purpose reservoir in terms of the accepted risk. *Journal of Hydrology*, 81:127-135.
- TAVARES, L. V., SILVA, J. E. (1983). Partial duration series method revisited. *Journal of Hydrology*, Vol. 64:1-14.
- TEIXEIRA, J. L. (1995). *EVAPOT: Um programa para o cálculo da evapotranspiração de referência pelos métodos de Penman-Monteith e de Hargreaves*. Departamento de Engenharia Rural. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa.
- TEIXEIRA, J. L., PEREIRA, L. S. (1992). ISAREG, an irrigation scheduling simulation model. *ICID Bulletin*, Vol. 41(2):29-48.
- TOMÁS, P. P. (1992). *Estudo da erosão hídrica em solos agrícolas. Aplicação à região sul de Portugal*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico (orientação de M. A. Coutinho). Lisboa.
- VALENTE, F., DAVID, J. S., GASH, J. H. C. (1997). Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*, 190:141-162.
- VAZ, A. C. (1984). *Modelos de planeamento de sistemas de albufeiras em condições de incerteza*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior Técnico (orientação de António Gonçalves Henriques e de António Sá da Costa). Lisboa.
- VAZ, A. C. (1993). *Uma metodologia para a caracterização e monitorização de secas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil/Instituto Superior Técnico. Lisboa.

### ***Hydrologic Modeling in Portugal in the Last 25 Years of the 20<sup>th</sup> Century. Deterministic, Probabilistic and Stochastic Approaches***

#### **ABSTRACT**

*Deterministic and non-deterministic hydrological models presenting innovative aspects as regards quantitative modeling of surface water and developed either in Portugal or by Portuguese researchers at foreign institutions during the last quarter of the 20<sup>th</sup> century are briefly presented and characterized.*

*Prior to the presentation of those models, the hydrologic models used in Portugal before 1975 and the circumstances that may have contributed to the progress and dissemination of hydrologic modeling in the country in the last few decades are briefly discussed.*

*Key Words: modeling; hydrologic; Portugal.*