

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil

**Calibração e Validação de um Modelo Matemático Aplicado ao
Caneiro de Alcântara**

Por:

Manuel Francisco Reis e Almeida Frazão

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Civil –
– Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Mário Jorge Rodrigues Pereira da Franca

Co-Orientadora: Engenheira Maria da Conceição Veloso David

2011

"Copyright" Todos os direitos reservados. Manuel Francisco Reis e Almeida Frazão.

Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Mário Franca pela orientação, apoio, disponibilidade que demonstrou ao longo da realização desta dissertação. Agradeço-lhe também a oportunidade que me foi dada e aceitação pronta, para integrar este projecto.

À Engenheira Conceição David, agradeço o esforço para acompanhar de perto o desenvolvimento deste trabalho e a prontidão demonstrada em todas as suas etapas.

Agradeço a minha família, em particular aos meus pais, por sempre acreditarem em mim e me terem dado a oportunidade de fazer este curso; à minha irmã Ana, por ser a pessoa que me é mais próxima, afectivamente e pela força que me deu; ao meu irmão Nuno, pelo exemplo que se tem revelado no meu percurso pessoal e académico.

A todos os meus amigos, que me valorizam e respeitam e que sempre acreditaram em mim, agradeço os incentivos que tenho recebido.

Por último, mas não menos importante, quero deixar a minha gratidão à empresa SIMTEJO, pela oportunidade facultada de participar neste projecto e a todos que de algum modo possibilitaram este trabalho e que sem o seu contributo tal não teria sido possível.

Resumo

O forte crescimento populacional, o alargamento e modernização das áreas urbanizadas, por vezes sem o planeamento adequado, têm resultado em consequências desastrosas para o meio ambiente, para qualidade da água, mas também nas suas outras dimensões, que se reflectem na deterioração do bem-estar dos seres humanos, afectando os recursos naturais, entre eles, o equilíbrio hidrológico das bacias.

Resultado de um planeamento urbano sério e adequado ao longo dos anos na cidade de Lisboa, devido ao aumento da sua população e consequentes desequilíbrios emergentes, que exigiam a preservação da qualidade da água do Rio Tejo e o equilíbrio das bacias, urgiu a ampliação da Estação de Tratamento de Águas Residuais de Alcântara. Com uma gestão mais profissionalizada e a beneficiação do sistema de drenagem da mesma, com vista a responder à explosão residencial e urbana desta zona da cidade, agravada com a situação de se estar perante um sistema unitário de drenagem (águas pluviais e águas domésticas).

Devido à falta de informação sobre os caudais escoados no sistema unitário de drenagem da bacia de Alcântara, o recurso à modelação matemática revelou-se bastante útil na previsão do comportamento do sistema de drenagem, nomeadamente na previsão de volume de descargas durante a ocorrência de eventos de precipitação.

Em 2005, a empresa SIMTEJO, responsável pelo saneamento integrado dos municípios do Tejo e Trancão, no âmbito do projecto de ampliação da ETAR, construiu, no *software* criado pela agência de protecção ambiental dos estados unidos, que simula precipitação em escoamento, denominado *Storm Water Management Model*, um modelo matemático aplicado a um troço do caneiro de Alcântara, desde a Estação Ferroviária de Campolide até ao ponto de descarga no Rio Tejo. Devido a poucos dados de caudal o modelo matemático ficou pré validado.

Consequentemente à instalação de um medidor de caudal e de dois udógrafos, em 2011, surgiram novos dados de caudal e de precipitação. Estes novos dados foram objecto de estudo da presente dissertação com vista ao objectivo de calibração e validação do modelo matemático do Caneiro de Alcântara.

Palavras-chave: Modelação Matemática; Calibração e validação; Drenagem de água pluvial; Caneiro de Alcântara.

Abstract

The strong population growth and the enlargement and modernization of urban areas, sometimes without the adequate planning, results in disastrous consequences for the environment, water quality, and also in other dimensions, that reflect in the deterioration of human wellbeing, affecting the natural resources, between them, the hydrologic balance of basins.

The result of a serious and appropriate urban planning over the years in the city of Lisbon, due to an increase of population and consequent emerging unbalances, that demanded a preservation of Rio Tejos water quality and the basins balance, urged the expansion of the Water Waste Treatment Center of Alcântara and a more professional management and benefit from its the draining system. This was done in order to meet the residential and urban explosion of the city, exacerbated with the situation of being before a unitary draining system (rain and domestic waters).

Due the lack of information about flows drained in the unitary draining system of the Alcântara basin, the use of mathematic models proved to be rather useful and necessary in forecasting the behaviour of the basin's drainage system, including the forecast volume of discharges during the occurrence events of precipitation.

In 2005, the SIMTEJO company, responsible for the integrated sanitation of the Tejo and Trancão municipalities, in the scope of the ETAR enlargement Project, built, in the software created by the American Agency of Environmental Protection of The United States of America which simulates precipitation in flow, denominated Storm Water Management Model, a mathematical model applied to a the downstream part of Caneiro de Alcântara, from the train station in Campolide to the discharge point in Rio Tejo. Due to the lack of information, the mathematical model was pre validated.

Consequently to the installation of a flow meter and of two rain gauges, in 2011, new data of flow and precipitation arise. These new data were the object of study of the present dissertation with the intent to calibrate and validate a mathematical model applied specifically to Caneiro de Alcântara.

Key words: Mathematical modeling; Calibration and Validation; Rain Water drainage; Caneiro Alcântara.

Índice de Capítulos

Resumo	I
Abstract	III
Índice de Quadros	VII
Índice de Figuras	IX
Lista de Abreviaturas	XI
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivo	1
1.3 Metodologia	1
2 Enquadramento	3
2.1 Modelação Matemática de Sistemas de Drenagem	3
2.1.1 Introdução	3
2.1.2 Classificação dos modelos, conveniências e limitações	5
2.2 Software SWMM (Storm Water Management Model)	7
2.2.1 Introdução	7
2.2.2 Modelo Hidrológico	10
2.2.2.1 Considerações gerais	10
2.2.2.2 Modelos de Infiltração	12
2.2.2.2.1 Modelo Horton	12
2.2.2.2.2 Modelo GreenAmpt	13
2.2.2.2.3 Método SCS-Soil Conservation Service (Curve Number)	16
2.2.2.3 Modelo RDII (Rainfall-Derived Infiltration/Inflow)	20
2.2.3 Modelo Hidrodinamico	21
3 Descrição da Bacia do Caneiro de Alcântara	23
3.1 Descrição da bacia\	23
3.2 Construção do Caneiro de Alcântara	24
4 Estudos anteriores do Caneiro de Alcântara com recurso a modelação matemática	29
4.1 Introdução	29
4.2 Modelo Caneiro de Alcântara – Hydroworks	29
4.3 Modelo Caneiro de Alcântara – MOUSE	31
4.3.1 Introdução	31
4.3.2 Metodologia utilizada	32
4.3.3 Construção, Calibração e Validação	33
4.4 Modelo Caneiro de Alcântara – SWMM	38
4.4.1 Introdução	38
4.4.2 Metodologia utilizada	38
4.4.3 Construção, Calibração e Validação	39
4.4.4 Comparação entre o modelo MOUSE e SWMM	45

5 Dados de Base do Modelo do Caneiro de Alcântara	47
5.1 Considerações gerais	47
5.2 Dados Base	47
5.2.1 Dados de Precipitação	47
5.2.1.1 Udógrafos	47
5.2.1.2 Registos de Precipitação	48
5.2.2 Dados de Caudal	50
5.2.2.1 Medidor de Caudal	50
5.2.2.2 Dados de Caudal em Tempo Seco e Húmido	53
5.2.3 Introdução de dados no modelo	62
5.3 Calibração	64
6 Resultados	67
6.1 Considerações gerais	67
6.2 Apresentação de resultados	68
6.3 Discussão	71
7 Conclusão e Propostas de desenvolvimento futuros	73
7.1 Conclusão	73
7.2 Propostas de desenvolvimento	74
Bibliografia	75
Anexos	79
Anexo I – Hietograma e Falhas do Udógrafo U5, no mês de Fevereiro.	81
Anexo II – Hietograma e Falhas do Udógrafo U5, no mês de Março.	83
Anexo III – Hietograma e Falhas do Udógrafo U5, no mês de Abril.	85
Anexo IV – Hietograma e Falhas do Udógrafo U7, no mês de Fevereiro.	87
Anexo V – Hietograma e Falhas do Udógrafo U7, no mês de Abril.	89
Anexo VI – Hietograma e Falhas do Udógrafo U7, no mês de Abril.	91

Índice de Quadros

Quadro 1 – Exemplo de propriedades de uma bacia em SWMM.	9
Quadro 2 – Estimativas dos parâmetros do modelo de Green e Ampt.....	15
Quadro 3 – Propriedades hidrológicas dos solos consoante a respectiva textura.....	20
Quadro 4 – Exemplo dos erros obtidos durante os processos de calibração (%).	36
Quadro 5 – Exemplo Erros obtido durante o processo de verificação (%).	36
Quadro 6 – Localização dos pontos de medição de precipitação.....	40
Quadro 7 – Localização dos pontos de medição de precipitação.....	41
Quadro 8 – Principais características da bacia de cabeceira.	42
Quadro 9 – Parâmetros ajustados durante as simulações.....	43
Quadro 10 – Parâmetros ajustados no módulo RDII.....	43
Quadro 11 – Erros obtidos para o modelo em programa SWMM e programa MOUSE.	43
Quadro 12 – Dados de Intensidade do udómetro.	48
Quadro 13 – Dados dos udómetros nos meses Fevereiro, Março e Abril.	49
Quadro 14 – Precipitação Diária.....	49
Quadro 15 – Quadro exemplificativo dos dados FLODAR.....	52
Quadro 16 – Análise Diária do caudal médio, caudal de ponta, caudal mínimo e precipitação, nos Udometros U5 e U7, do Mês de Fevereiro.	54
Quadro 17 – Análise Diária do caudal médio, caudal de ponta, caudal mínimo e precipitação, nos Udometros U5 e U7, do Mês de Março.....	55
Quadro 18 – Análise Diária do caudal médio, cauda de ponta, caudal mínimo e precipitação, nos Udometros U5 e U7, do Mês de Abril.....	56
Quadro 19 – Dias sem ocorrência de precipitação.....	57
Quadro 20 – Dias com ocorrência de precipitação.....	57
Quadro 21 – Exemplo de valores de caudal em m ³ /s dos, dias de semana e a sua média, nos instantes.....	57
Quadro 22 – Dias semana escolhidos para o hidrograma de Caudal Doméstico.....	58
Quadro 23 – Dias de Fim-de-Semana escolhidos para as duas fases de estudo.....	60
Quadro 24 – Características da bacia “a montante”.....	67
Quadro 25 – Erros de simulação para o 1º período de registos.....	68
Quadro 26 – Erros de simulação para o 2º período de registos.....	68
Quadro 27 – Erros de simulação para o 3º período de registos.....	70
Quadro 28 – Erros de volume obtidos no teste 4.	71
Quadro 29 – Erros de pico do teste 4.	72
Quadro 30 – – Erros de simulação para o 3º período de registos,para o teste 4.....	72
Quadro 31 – Erros de volume obtidos para o modelo em programa SWMM (2007 e 2011) e programa MOUSE.	72

Índice de Figuras

Figura 1 – Componentes do escoamento de água no solo.....	5
Figura 2 – Exemplo do programa SWMM.....	8
Figura 3 – Relação entre os módulos estruturais do modelo SWMM.....	9
Figura 4 – Discretização das sub-bacias de uma área de estudo.....	10
Figura 5 – Processos representados no modelo.....	11
Figura 6 – Infiltração de acordo com o modelo de Horton.	12
Figura 7 – Efeito da constante k da equação de Horton na variação da taxa de infiltração	13
Figura 8 – Modelo Green e Ampt	14
Figura 9 – Taxa de infiltração e infiltração acumulada condicionadas por uma precipitação com intensidade constante.	16
Figura 10 – Variáveis e funções do método do SCS para determinação das perdas de precipitação.	17
Figura 11 – Tipo de hidrograma gerado para cada componente do escoamento no módulo RDII	21
Figura 12 – Ribeira de Alcântara (1900).....	23
Figura 13 – Ribeira de Alcântara (1939).....	23
Figura 14 – Principais bacias da Cidade de Lisboa.....	24
Figura 15 – Caneiro de Alcântara, secção tipo.....	25
Figura 16 – Secção tipo, do Caneiro.	25
Figura 17 – Caneiro de Alcântara Secção em alvenaria de pedra.	25
Figura 18 – Obras de reparação (2005).	27
Figura 19 – Discretização do Caneiro de Alcântara no programa MOUSE	33
Figura 20 – Forma da bacia e respectivo número de curva tempo-área.....	35
Figura 21 – Valores medidos de caudal e de precipitação, no dia 26/01/1996.	37
Figura 22 – Resultados da simulação do evento de 26/01/1996.	37
Figura 23 – Valores medidos de caudal e de precipitação, no dia 13/02/1996.	37
Figura 24 – Resultados da simulação do evento de 13/02/1996.	38
Figura 25 – Localização do PM5, do By-pass à ETAR e do ponto de restituição.	39
Figura 26 – Troço do caneiro de Alcântara modelado e localização dos udógrafos.	40
Figura 27 – Hidrograma de tempo seco afluente à ETAR	41
Figura 28 – Resultados da simulação para o evento de 25/01/1996 (A).....	44
Figura 29 – Resultados da simulação para o evento de 25/01/1996 (B)	44
Figura 30 – Resultados da simulação para o evento de 26/01/1996.....	44
Figura 31 – Localização dos udógrafos.....	47
Figura 32 – Udógrafo de Chelas (U7).	48
Figura 33 – Udógrafo instalado no edifício dos Bombeiros Voluntários da Pontinha (U5).	48
Figura 34 – Hietograma de 24 Fevereiro a 15 de Abril registados nos udógrafos, U5 e U7.	50
Figura 35 – Localização do medidor de caudal.....	50
Figura 36 – Quadro electrónico do medidor de caudal FLODAR	51
Figura 37 – Medidor de caudal FLODAR, visto no interior do Caneiro de Alcântara	51
Figura 38 – Instalação do medidor de caudal no interior do caneiro.	51
Figura 39 – Hidrograma do mês de Fevereiro.....	52
Figura 40 – Hidrograma do mês de Março.....	53
Figura 41 – Hidrograma do mês de Abril.....	53
Figura 42 – Hidrograma e intensidade de 24 Fevereiro a 15 de Abril	54

Figura 43 – Hidrograma, de 5 de Março, com a precipitação nos udógrafos 5 e 7.....	54
Figura 44 – Caneiro de Alcântara, escoamento de águas residuais em tempo seco.....	56
Figura 45 – Hidrogramas de tempo seco.....	58
Figura 46 – Hidrograma de tempo seco dos Dias de Semana.	59
Figura 47 – Comparação dos Hidrogramas dos caudais médios, 1ª fase e 2ª Fase.	59
Figura 48 – Hidrogramas de Fim-de-Semana 1ª Fase.....	60
Figura 49 – Hidrogramas de Fim-de-Semana 1ª Fase.....	60
Figura 50 – Comparação dos Hidrogramas de Fim-de-Semana, 1ª e 2ª Fase.	61
Figura 51 – Comparação do Hidrogramas Dias de Semana, Fim-de-Semana e Caudal Antigo. 61	
Figura 52 – Curva de vazão.....	62
Figura 53 – Condições de Fronteira.	63
Figura 54 – Exemplo da Time serie de precipitação aplicada a um udómetro.....	64
Figura 55 – Diferenciação das bacias a montante do medidor de caudal.....	67
Figura 56 – Resultados da simulação do teste 1 no período entre 5 e 9 de Março.....	69
Figura 57 – Resultados da simulação do teste 4 no período entre 5 e 9 de Março.....	69
Figura 58 – Resultados da simulação teste 1 no período entre 11 e 15 de Março.....	70
Figura 59 – Resultados da simulação do teste 4 no período entre 11 e 15 de Março.....	70
Figura 60 – Resultados da simulação do teste 4 no período 3.....	71

Lista de Abreviaturas

CAD – Computer-Aided Design

ETAR – Estação de Tratamento de Aguas Residuais

EPA – Environmental Protection Agency

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NES – Núcleo de Engenharia Sanitária

RDII – Rainfall Derived Inflow/Infiltration

SCS – Soil Conservation Service

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SIMTEJO – Saneamento Integrado nos Municípios Do Tejo e do Trancão

SWMM – Storm Water Management Model

USDA – United States Department of Agriculture

1 Introdução

1.1 Motivação

Os modelos matemáticos são instrumentos essenciais para a gestão das bacias hidrográficas uma vez que simulam os processos de transformação precipitação-escoamento. Estes modelos tornam-se especialmente complexos sempre que se verificam condições atmosféricas instáveis, as quais impõem variáveis conjunturais e condicionantes específicas à sua aplicação. Os modelos estão dependentes, na sua aplicação matemática, à capacidade de registo de dados hidrológicos existentes, usados para sua calibração e validação, e à capacidade de adequabilidade do modelo às características físicas das bacias.

A SIMTEJO, empresa responsável pelo saneamento integrado dos municípios do Tejo e do Trancão, no âmbito do projecto de ampliação da ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais de Alcântara, requisitou o Núcleo de Engenharia Sanitária (NES), do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) um estudo para avaliação das descargas na ocorrência de eventos de precipitação em 2006, na bacia de Alcântara, na cidade de Lisboa, empregando o modelo hidrológico SWMM – Storm Water Management Model.

Foi efectuada a calibração e validação de um modelo matemático simplificado da bacia do Caneiro de Alcântara. Posteriormente, com a instalação de um medidor de caudal no caneiro de Alcântara, a montante da ETAR, e com a disponibilidade de dados sinópticos de precipitação, surgiu a necessidade de um novo exercício de calibração e validação do modelo, objecto da presente tese.

1.2 Objectivo

O objectivo da tarefa que se reporta no presente documento consiste na calibração e validação do modelo matemático existente de uma secção da bacia do Caneiro de Alcântara (entre estação de comboios de Campolide até ao seu ponto de descarga no rio Tejo), com dados recolhidos de Fevereiro a Abril de 2011. Os parâmetros calibrados no modelo foram as características das bacias como a largura média, a impermeabilidade e a inclinação, e alteração do modelo de infiltração aplicado.

Este modelo parcial destina-se à utilização pela SIMTEJO, para apoio ao conhecimento do caudal fluente à ETAR de Alcântara em diferentes condições de precipitação, de modo actuar em tempo adequado e de modo mais automatizado nos órgãos e processos de tratamento da ETAR de Alcântara.

1.3 Metodologia

O presente trabalho foi realizado tendo em conta as seguintes tarefas:

- Revisão bibliográfica;

- Análise e tratamento de dados de caudal e precipitação;
- Adaptação do modelo matemático reduzido do caneiro de Alcântara construído em 2007;
- Calibração e validação do modelo;
- Elaboração de conclusão.

2 Enquadramento

2.1 Modelação Matemática de Sistemas de Drenagem

2.1.1 Introdução

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando o entendimento dos processos que a envolvem e permitindo a sua previsão. Os modelos são um recurso cada vez mais utilizado, quer em estudos, quer em estudos de engenharia, visto facilitarem a compreensão das implementações que se pretendem efectuar assim como entender os impactos e mudanças nos sistemas instalados prevendo as alterações futuras.

A possibilidade de expressar os processos físicos através de um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não ser possível na sua totalidade ou como refere Rennó e Soares (2003) a sua complexidade ser de tal ordem que é inevitável a sua simplificação para ser aplicada.

Convém não ignorar que as limitações computacionais ou a conversão em equações matemáticas, com recurso a processos numéricos discretos, levam à parametrização de processos complexos em escalas muito detalhadas que podem não ser explicitamente representadas no modelo. Casos há em que esses conjuntos de equações podem ser vistos como uma colecção de hipóteses que conectam entradas e saídas do sistema. Esse conjunto de equações parametrizadas representa a melhor aproximação do modelador para explicar esses processos, considerando todas essas restrições. Entretanto, é importante reconhecer que um modelo é, no melhor caso, apenas uma representação dos processos do mundo real. Um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos. Assim sendo, não existe um modelo único que seja o melhor mas modelos que têm vantagens e desvantagens.

Em geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Os parâmetros mantêm o seu valor inalterado durante todo o processo estudado. Assim, um parâmetro possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que ele não possa variar espacialmente. Por outro lado, as variáveis podem mudar ao longo do tempo. Num modelo, podem ser distinguidos três tipos de variáveis. A primeira, chamada variável de estado, é o foco de estudo do modelo. Há sempre uma equação diferencial relacionada a esta variável. O estado de um sistema pode ser descrito apenas verificando-se valor de cada variável de estado. Como exemplo, na modelação da infiltração de água no solo, uma variável de estado pode ser o conteúdo de água no solo. O segundo tipo de variável num modelo é a variável processo ou simplesmente processo, também chamada de fluxo. Os fluxos são as entradas e saídas das variáveis de estado. Tipicamente, os fluxos são calculados em função das variáveis de estado e das variáveis impulsionadoras. Também os parâmetros podem ser utilizados no cálculo dos fluxos. Exemplificando, a taxa de infiltração do solo pode ser considerada uma variável processo que altera o conteúdo de água no solo. O terceiro, e último, tipo é a variável impulsionadora que é usada no modelo mas não é calculada por ele e, dessa forma, a variação desta variável deve ser explicitada. Esta variável pode representar um fluxo (fluxo impulsionador) que alimenta o modelo. A chuva e o aquífero não confinado são, respectivamente, exemplos típicos de fluxo impulsionador em modelação de água no solo. A variável impulsionadora pode actuar ainda como um

modulador/controlador de fluxos no modelo, como acontece, por exemplo, com o vento que pode influenciar a taxa de evaporação do solo.

Sem procurar reduzir o conceito em causa podemos afirmar que a representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre, como é o caso em questão, denomina-se modelação hidrológica. No entanto o conceito é complexo devido à intervenção de outras variáveis que com ele interagem e dele passam também a fazer parte como sejam a modelação biológica e a ecológica, visto que o transporte de materiais pelo fluxo de água não é um sistema fechado às actividades biológicas, as quais podem aumentar ou diminuir a quantidade dos materiais na água, assim como a influência dos fluxos nos diversos habitats deve ser considerada. Além disso, a hidrologia está estreitamente relacionada com as condições climáticas, o que exige aos modelos terem em conta as variáveis atmosféricas. A complexa associação de variáveis são de difícil execução, atendendo às diferentes resoluções verificadas entre os modelos hidrográficos e os modelos atmosféricos que trabalha com resoluções espaciais muito maiores que as utilizadas na modelação hidrológica (Maidment, 1993).

O centro de investigação em modelos hidrológicos é na sua maioria a bacia hidrográfica. A bacia pode constituir a unidade espacial para modelos agregados que consideram as propriedades médias para toda a bacia, ou então, pode ser subdividida segundo diversas abordagens a fim de se considerarem as suas características espacialmente distribuídas, sem nunca se poder omitir as superfícies que captam e inserem água num ou mais canais de escoamento que desembocam numa única saída.

Como foi referido para melhor entender os modelos hidrológicos, é necessário analisar também outros componentes envolvidos no ciclo hidrológico, nomeadamente as interações entre os tipos de solos. Não se pode ignorar a topografia, a morfologia o tipo de vegetação que essa bacia suporta.

O solo pode ser entendido como um reservatório, onde o volume de água armazenado varia no tempo, dependendo de múltiplos factores. Quanto à hidrodinâmica da água na bacia esta pode ser estimada por modelação computando-se todas as entradas e as saídas do sistema. A principal entrada de água no sistema é a precipitação. Considerando a existência de um coberto vegetal ou coberto impermeável (edificado) sobre o solo, a água da chuva é primeiramente interceptada (a água poderá também atingir directamente o solo ou massas de água). A água interceptada pode evaporar. Da água que chega até a superfície do solo, parte é infiltrada (entra no perfil de solo) e outra parte pode escoar-se superficialmente. A água infiltrada irá redistribuir-se ao longo do perfil de solo. Simultaneamente, a drenagem da água no solo, quer permeável, quer impermeável, pode verificar-se, evapotranspiração. A Figura 1, exemplifica as possíveis situações referidas.

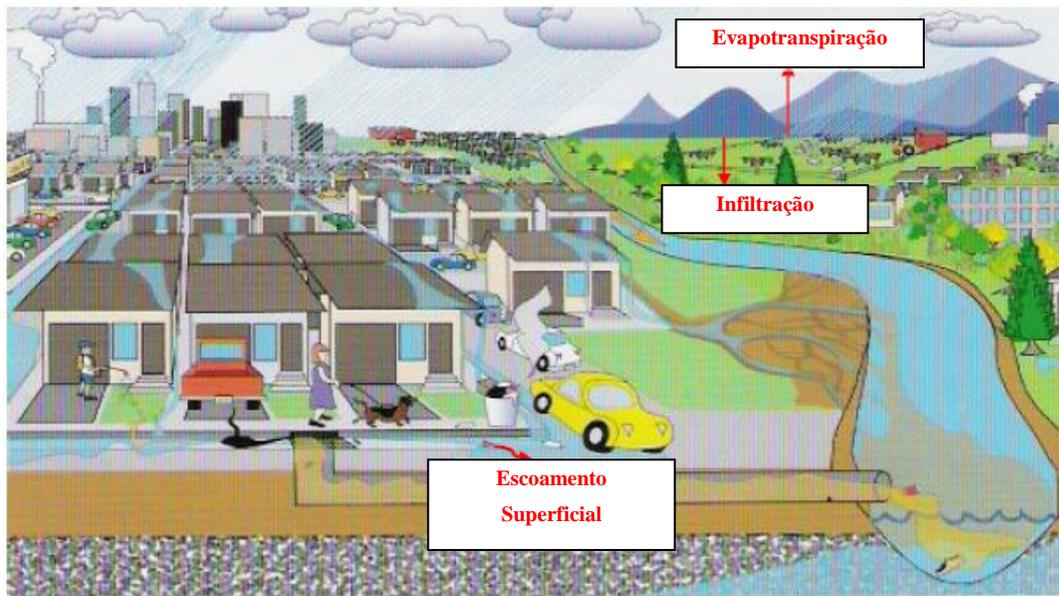


Figura 1 – Componentes do escoamento de água no solo.

Fonte: maenatureza.org.br

No terreno podem formar-se canais por onde a água escoar preferencialmente mesmo que tal se verifique somente durante um evento de chuva ou durante algum período de tempo, cessando posteriormente logo que a água infiltre no solo. Outros canais, por sua vez, permanecem constantemente a escoar água a menos que, por algum motivo, o nível do lençol freático venha a baixar fazendo com que o canal fique acima da zona de saturação. Não é intenção analisar-se, neste trabalho, um hidrograma de um curso de água natural, mais sim um curso artificial, constituído por uma rede de drenagem urbana (água pluvial e doméstica).

2.1.2 Classificação dos modelos, conveniências e limitações

Para melhor se compreender e discutir as tipologias relacionadas à classificação de modelos podem ser consultados Maidment (1993).

Os modelos podem ser classificados sob diferentes critérios consoante os aspectos prioritários. Usualmente, são classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelação.

Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Caso o conceito de probabilidade não seja considerado durante elaboração de um modelo, este será denominado determinístico. Note-se, no entanto, que uma variável de entrada pode ser aleatória mas o modelo, ainda assim, é determinístico quando cada valor de entrada produz um único valor de saída. Sistemas multivariados não-lineares podem levar a resultados caóticos que, erroneamente, são interpretados como variáveis aleatórias.

Os modelos podem ser empíricos quando utilizam relações baseadas em observações. Em geral, estes modelos são bastante simples e úteis no dia-a-dia. No entanto, são pouco robustos, uma vez que são específicos para a região e condições para as quais as relações foram estimadas, tornando-se estudos de caso. Além disso, os modelos empíricos não

possibilitam fazer simulações de mudanças em condições para as quais o modelo não previu, tais como, chuvas extremamente altas, mudança de uso do solo, não permitindo a generalização de resultados.

Os modelos podem ser também baseados em processos estes em geral, são mais complexos que os empíricos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenómeno estudado, o que pela sua complexidade e porque os sistemas são sempre abertos serão quase sempre probabilísticos. Por exemplo, o cálculo da variação do nível do lençol freático é bastante complexo e tem a necessidade de envolver o uso de modelos detalhados e multivariados que, geralmente, requerem um bom conjunto de informações e uma parametrização cuidadosa antes que eles possam ser executados. Os modelos baseados em processos que podem ser subdivididos em modelos conceituais e modelos físicos. Os conceituais são modelos que fazem uso de equações empíricas (e por isso também são chamados de modelos semi-empíricos) mas que descrevem o sistema segundo as leis da física. Já os modelos físicos, utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico na representação dos processos e seus parâmetros possuem um significado físico e portanto podem ser estimados através de medidas reais.

Apesar dos fenómenos naturais variarem continuamente no tempo, na maioria das vezes, estes fenómenos são representados por modelos discretos. A escolha do intervalo de tempo, também denominado passo, no qual o modelo será executado depende basicamente do fenómeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Em geral, quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração destes resultados, como é o caso do trabalho proposto nesta tese.

Os modelos podem ser classificados ainda como pontuais (concentrados ou agregados) ou distribuídos. Em modelos pontuais, considera-se que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada. Por outro lado, os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo. De maneira geral, força-se o modelo através do aumento do peso da dimensão discreta por motivos do espaço e suas consequências. Cada elemento discreto pode ser tratado como um ponto que representa homogeneamente toda sua área. Quanto aos modelos distribuídos, sendo mais realistas, consideram também a existência da relação espacial entre elementos vizinhos (relação topológica).

Em conclusão, a escolha de um determinado tipo de modelo deve ser feita com base na aplicação que se deseja e na disponibilidade de dados básicos. O uso de modelos distribuídos físicos baseia-se no argumento de que este tipo de modelo é o que melhor representa os processos físicos dentro de uma bacia hidrográfica e é inerentemente superior a um modelo agregado (Beven, 1991). Por outro lado, os modelos distribuídos físicos necessariamente requerem uma quantidade bastante extensa e detalhada de informação sobre a bacia e dos seus sistemas de drenagem de modo a realizar uma boa parametrização do modelo.

O modelo matemático do caso de estudo é um modelo distribuído em que está inerente, a crescente urbanização que leva a um estudo maior e rigoroso das bacias hidrográficas e a uma frequente ampliação dos sistemas de drenagem assim como, a níveis cada vez mais elevados na qualidade das descargas no meio receptor.

Esta ferramenta de simulação tem extrema utilidade na avaliação do desempenho técnico quer de redes de drenagem urbana mas nunca será substituto para a informação recolhida no campo, ou do próprio conhecimento do funcionamento da rede por parte do próprio utilizador. Contudo, quando bem manipulados, poderão ser uma forte ajuda na detecção da origem de um problema e mesmo na resolução do mesmo, tendo como base uma boa relação custo/benefício.

2.2 Software SWMM (Storm Water Management Model)

2.2.1 Introdução

A Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA) está encarregue da protecção da terra, do ar e recursos hídricos de toda a nação norte-americana. Sob a tutela legal das leis ambientais americanas, a agência esforça-se para formular e implementar acções que levem a um equilíbrio compatível entre as actividades humanas e à sustentação dos sistemas naturais permitindo apoiar e viabilizar um bom nível de vida. Para atender às expectativas, o programa de pesquisa da EPA, fornece dados e suporte técnico com os quais procura resolver problemas ambientais actuais; construir uma base de conhecimentos científicos necessários para gerir os recursos ecológicos; entender como a poluição afecta a saúde humana e prevenir ou reduzir os riscos ambientais no futuro.

Dentro da Agência EPA, o National Risk Management Research Laboratory é o centro de investigação de abordagens tecnológicas e de gestão para reduzir riscos de ameaças à saúde humana e ao meio ambiente. O foco deste, é sobre métodos de prevenção e controle da poluição da água, do ar, da terra e recursos do subsolo, também sobre a protecção da qualidade da água em sistemas públicos de abastecimento e saneamento, recuperação de sítios contaminados e águas subterrâneas e prevenção e controle de poluição do ar interior.

Em 1971 foi desenvolvido pela primeira o programa de computador de modelação e gestão de águas pluviais, dominado de SWMM (Storm Water Management Modeling), *freeware*, que avalia os impactos do escoamento e a eficácia das estratégias de mitigação. O modelo faz uma simulação dinâmica precipitação-escoamento e calcula a quantidade e qualidade do escoamento das bacias, da zona em questão. A componente de escoamento que o SWMM opera sobre um conjunto de sub-bacias (Figura 2) que recebem a precipitação e geram cargas de escoamento e poluentes. O encaminhamento desse escoamento é feito através de um sistema de tubos, canais, armazenamento/tratamento de dispositivos, bombas e reguladores. Este modelo prevê a quantidade e qualidade do escoamento gerado no interior de cada bacia e a vazão, permite também medir profundidade, fluxo e qualidade da água em cada tubo ou canal durante um período de simulação composto de múltiplos passos no tempo.

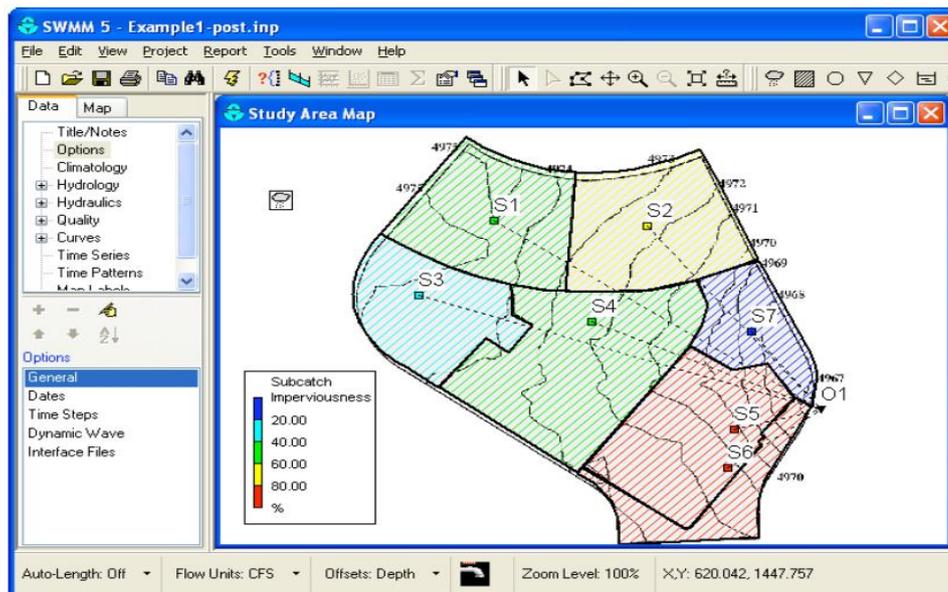


Figura 2 – Exemplo do programa SWMM
 Fonte: Applications Manual – SWMM

Desde da sua criação, o SWMM, passou por várias actualizações importantes. Continua a ser amplamente utilizado em todo o mundo para o planeamento, análise e projectos relacionados com escoamento de águas pluviais, saneamentos de esgotos combinados, esgotos sanitários, e outros sistemas de drenagem nas áreas urbanas. É também utilizado em modelação de áreas não-urbanas. A implementação mais actual do modelo é a versão 5.0 que foi lançado em 2005. Ele modernizou a estrutura do modelo e o interface com o usuário, tornando modelo SWMM fácil de usar e mais acessível à nova geração de hidrólogos, engenheiros e especialistas em gestão de recursos hídricos. Além da EPA, as empresas que trabalham no desenvolvimento de aplicativos já realizaram modificações no SWMM, a maioria promovendo integração com o ambiente SIG (Sistemas de Informações Geográficas) e CAD (Computer-Aided Design), incluindo ferramentas de apresentação dos resultados e melhoria na capacidade nos dados aplicativos.

Huber e Dickinson (1992) apresentaram a estrutura do modelo em dez blocos ou módulos, sendo quatro computacionais, cinco de serviços, e o modulo executivo. Nos módulos computacionais salienta-se o modulo Runoff que faz à transformação de chuva em caudal referente à drenagem segundo o conceito da onda cinemática; o módulo Extran referente à modelação hidrodinâmica em condutas e canais e o módulo Storage/treatment referente ao tratamento da qualidade das águas. Na Figura 4 está representada e estruturada dos módulos do SWMM e a relação entre eles.

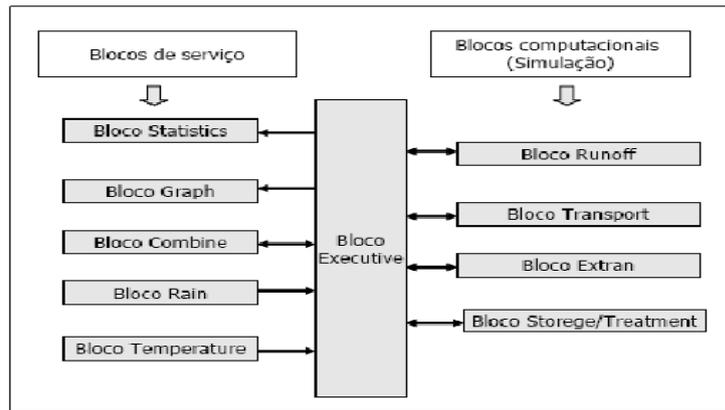


Figura 3 – Relação entre os módulos estruturais do modelo SWMM
 Fonte: Gracia (2005).

Segundo Meller (2004), os módulos computacionais são responsáveis pelas principais rotinas de cálculo do aplicativo, como transformação chuva-vazão, propagação na rede, rotinas envolvendo o cálculo de cargas de poluentes e simulação de estruturas de controlo quali-quantitativo do escoamento, sendo auxiliados pelos módulos de serviço. Os módulos de serviço possuem funções diversas como organização da ordem das simulações (Executive), dos dados de precipitação (Rain) e temperatura (Temp), apresentação de gráficos (Graph) e análise estatística dos resultados. Neste estudo foram utilizados os módulos Runoff e Extran.

O módulo Runoff permite a simulação quali-quantitativa do escoamento gerado em áreas urbanas e sua propagação na superfície ou através de canais de forma simplificada. O módulo processa-se com base em dados de precipitação ou neve, simulando degelo, infiltração em áreas permeáveis (modelos de Horton, Green Ampt e Curve Number), retenção na superfície, escoamento na superfície em canais, podendo ser utilizado para simulações de eventos isolados e contínuos. A bacia é representada na forma de um conjunto de sub-bacias e canais de propagação interligados. A área de cada sub-bacia é dividida em 3 sub-áreas: impermeável com armazenamento, permeável com armazenamento e permeável sem armazenamento. O escoamento superficial é obtido através de um reservatório não-linear para cada sub-área representado pela combinação da lei de resistência de Manning e da equação da continuidade, resolvidas pelo processo iterativo de Newton-Raphson. No Quadro 1 e na Figura 4, encontra-se um exemplo das propriedades de uma bacia e uma discretização de sub-bacias de um caso de estudo, respectivamente.

Quadro 1 – Exemplo de propriedades de uma bacia em SWMM.
 Fonte: Applications Manual, SWMM.

Table 1-1. Properties of the undeveloped subcatchment			
Property	Value	Property	Value
Area	28.94 ac	Depression storage, pervious areas	0.3 in.
Width	2521 ft	Depression storage, impervious areas	0.06 in.
Slope	0.5 %	% of impervious area without depression storage	25%
Imperviousness	5 %	Maximum infiltration rate	4.5 in./hr
Roughness coefficient, impervious areas	0.015	Minimum infiltration rate	0.2 in./hr
Roughness coefficient, pervious areas	0.24	Infiltration decay coefficient	6.5 hr ⁻¹

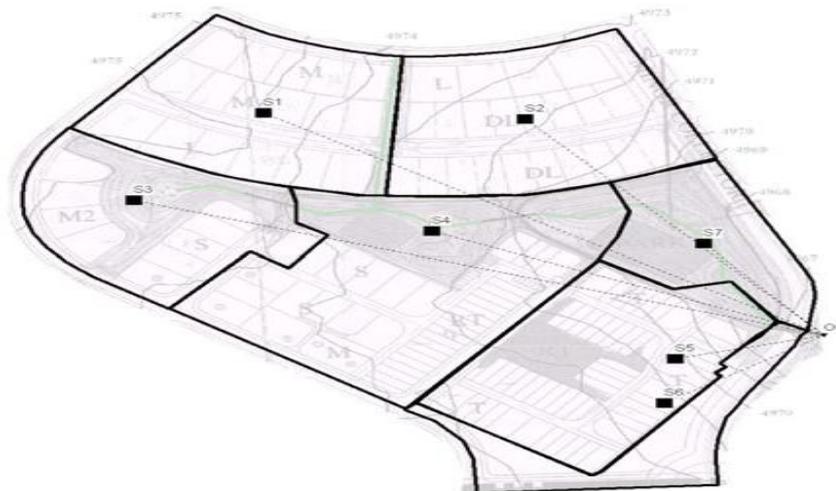


Figura 4 – Discretização das sub-bacias de uma área de estudo
 Fonte: Applications Manual - SWMM

Os parâmetros e variáveis para a simulação hidrológica chuva-vazão são, para além dos dados de precipitação, a área da sub-bacia, largura média representativa da sub-bacia, coeficiente de rugosidade de Manning, inclinação da sub-bacia, altura do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração. As sub-bacias são divididas em áreas permeáveis e impermeáveis. A largura representativa das sub-bacias é um parâmetro do modelo e provoca alterações no hidrograma, ocasionando efeitos de armazenamento e atenuação nestes (Garcia, 2005).

O módulo de propagação do escoamento em redes de condutas Extran (Extended Transport) foi desenvolvido na cidade de San Francisco (USA), em 1973, é chamado originalmente de “San Francisco model”, sendo adicionado ao SWMM a pedido da EPA em 1974. Como o próprio nome sugere, o módulo foi introduzido no intuito de promover uma forma de propagação alternativa à proposta pelo módulo Transport (baseado no modelo da onda cinemática), que adicionalmente passasse a considerar os fenómenos mais complexos no escoamento, principalmente o escoamento sob pressão. O modelo hidrodinâmico Extran propaga o escoamento em redes de condutas ou canais de macro drenagem, utilizando as equações completas de Saint Venant tendo a vazão e a cota piezométrica como variáveis. A solução dá-se através de um esquema explícito, segundo o método de Euler modificado. Intervalos de tempo de 5 a 60 segundos são utilizados nas simulações, fazendo com que o tempo de simulação seja uma variável importante no uso do modelo (Roesner et al, 1988). A representação da rede é baseada no conceito de troços e nós. Os troços (links) transmitem fluxo entre os nós, sendo a vazão a variável dependente. Os nós têm características de armazenamento.

2.2.2 Modelo Hidrológico

2.2.2.1 Considerações gerais

O modelo hidrológico gera hidrogramas de escoamento superficial a partir dos dados de precipitação e das características geométricas, morfológicas e hidrológicas das bacias afluentes ao sistema. Estes hidrogramas constituem os dados de entrada ao modelo

hidráulico. O caudal pluvial afluyente ao sistema de colectores, durante eventos de precipitação, é calculado através da decomposição da precipitação em perdas hidrológicas e em escoamento superficial. Os processos hidrológicos são representados pela equação da continuidade, considerando as perdas por evaporação, infiltração no solo e armazenamento superficial, como se encontra representado na Figura 5.



Figura 5 – Processos representados no modelo.

A precipitação é considerada uniformemente distribuída sobre cada bacia. A evaporação é uma perda contínua que normalmente é pouco significativa durante o período de chuva e, em regra, é independente da precipitação. A retenção corresponde a uma perda discreta. O programa SWMM considera que a bacia se divide em duas áreas, uma com uma área de depressão à superfície que possibilita armazenar algum volume precipitado e outra sem capacidade de armazenamento. Quando se inicia a chuvada, parte da precipitação é retida nestas zonas de depressão. Quando a capacidade de armazenamento destas áreas atinge o seu máximo, inicia-se a propagação do escoamento superficial que é encaminhado para um ponto de entrada na rede de colectores ou canais.

A infiltração no solo corresponde a perdas de precipitação associadas às áreas permeáveis das bacias. O programa SWMM apresenta 3 alternativas para modelar a infiltração: Fórmula de Horton, Método de Green e Ampt e Método do Soil Conservation Service.

Nesta tese, o modelo de infiltração no solo utilizado foi o de Horton que representa o decaimento exponencial da infiltração, desde um valor máximo de intensidade de infiltração até um valor mínimo de intensidade de infiltração. Durante um evento de precipitação mas no estudo do presente trabalho utilizou-se o do Soil Conservation Service (Curve Number).

Para o cálculo da propagação do escoamento superficial, o SWMM utiliza um modelo de reservatório não linear. O escoamento inicia-se quando a altura de escoamento à superfície, resultante do cálculo do balanço hidrológico é superior à altura da área de depressão da bacia. Esta representação considera o escoamento permanente e a altura uniforme em toda a superfície. O caudal é calculado pela equação de Manning-Strickler e a altura de escoamento é calculada através da equação da continuidade.

Os parâmetros mais relevantes para a calibração do modelo hidrológico são: a área impermeável (Aim) da bacia; a inclinação (i); e a sua largura média (w). A largura média

representa a razão entre a área da bacia e o seu comprimento, e permite representar o tempo de concentração da bacia.

2.2.2.2 Modelos de Infiltração

2.2.2.2.1 Modelo Horton

Como é reconhecido, a taxa de infiltração ao longo de um acontecimento pluvioso tem tendência para decrescer a partir um valor inicial máximo, acresce, que se a duração da precipitação for suficientemente grande, tal taxa atingirá um valor mínimo, sensivelmente constante, correspondente a uma taxa de infiltração de equilíbrio (Figura 6).

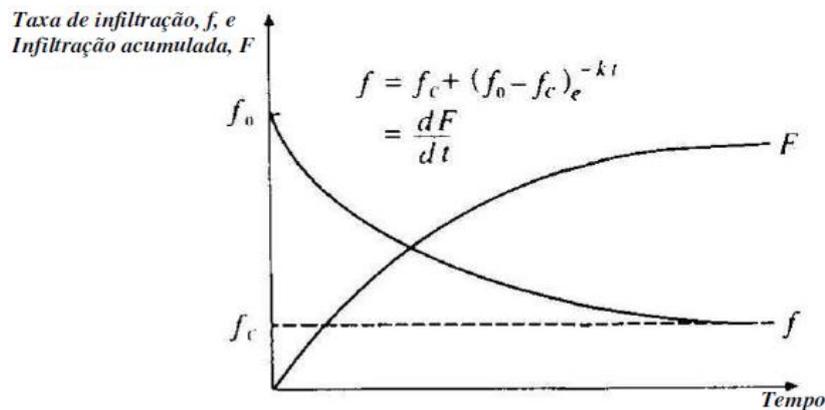


Figura 6 – Infiltração de acordo com o modelo de Horton.

Fonte: Wilson (1983), Shaw (1984), Chow (1988), Rawls (1993) e Wanielista (1997).

Horton, propôs o seguinte modelo empírico de três parâmetros, f_0 , f_c e k , para a taxa de infiltração (Shaw, 1984), segundo o qual:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

em que

f taxa de infiltração no instante t [$L T^{-1}$];

f_0 taxa inicial de infiltração ($t = 0$) [$L T^{-1}$];

f_c taxa de infiltração de equilíbrio ($t \rightarrow \infty$) [$L T^{-1}$];

k constante característica do solo e do revestimento superficial e que descreve o decréscimo da taxa de infiltração de f_0 para f_c [T^{-1}];

t instante de cálculo [T].

Na Figura 7 esquematiza-se a influência da constante k na forma da curva que traduz o decréscimo da taxa de infiltração.

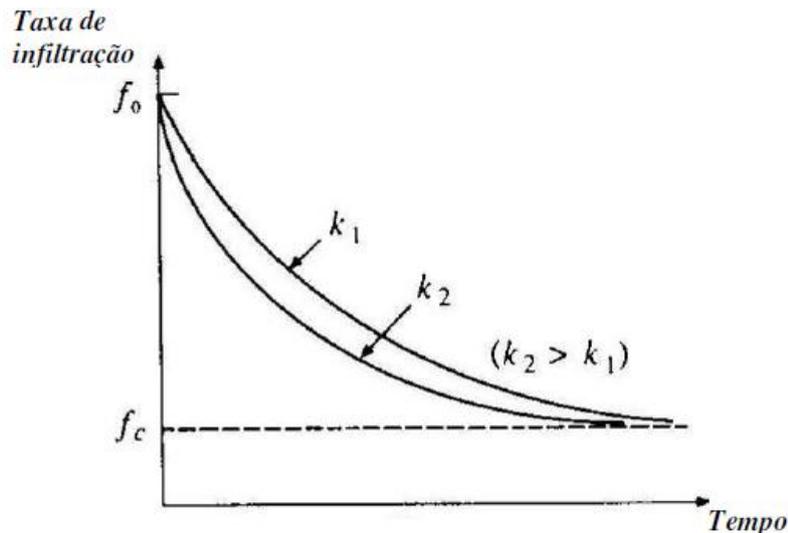


Figura 7 – Efeito da constante k da equação de Horton na variação da taxa de infiltração
 Fonte: Chow (1988).

Para se determinar a **infiltração acumulada**, F [L], tem que se integrar a equação (1) entre o instante inicial ($t=0$) e o genérico, t , e ao fim do instante t , resultando:

$$F = f_c t + \frac{1}{k} (f_0 - f_c) (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

Se se integrar a mesma equação (1), entre os instantes $t = 0$ e $t = \infty$, teremos a infiltração acumulada correspondente a taxas de infiltração superiores ou iguais a f_c

$$F = \frac{(f_0 - f_c)}{k} \quad (3)$$

Por esta equação é-nos permitido calcular a infiltração acumulada para $f \geq f_c$ desde que se considere que a duração da precipitação é suficientemente longa para se atingir a taxa de infiltração de equilíbrio.

De salientar que os parâmetros f_0 , f_c e k têm de ser determinados experimentalmente.

2.2.2.2.2 Modelo GreenAmpt

Segundo Portela (2006), o modelo de Green e Ampt, para estimar a infiltração, embora aproximado, é fisicamente baseado pois foi estabelecido a partir da aplicação da lei de Darcy. A forma diferencial desta lei para escoamento permanente num solo saturado é dada por

$$q = \frac{dH}{dz} \quad (4)$$

em que q [$L T^{-1}$] é o caudal por unidade de área na secção transversal (secção perpendicular à direcção do escoamento) de uma coluna de solo de comprimento elementar, segundo as linhas de corrente, dz [L] é tal que a diferença entre as cargas hidráulicas nos extremos dessa coluna é dH [L]. K [$L T^{-1}$] é uma constante de proporcionalidade designada por condutividade hidráulica.

Na Figura seguinte, temos o método de Green e Ampt e os seus pressupostos.

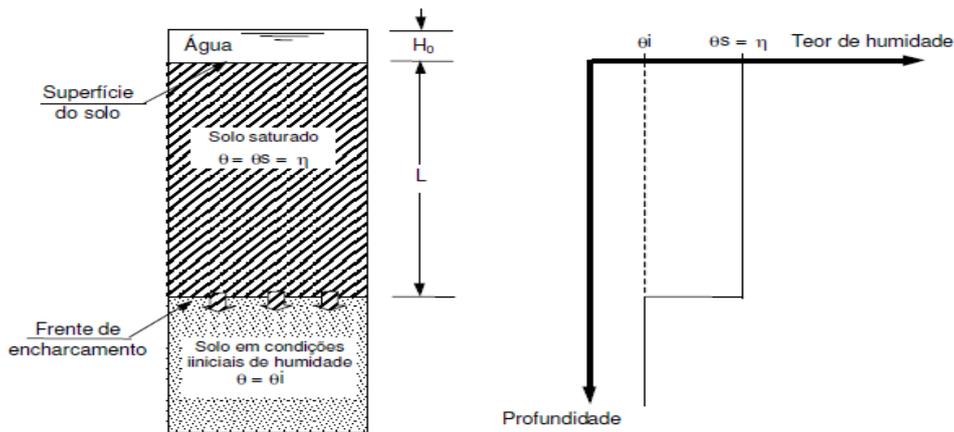


Figura 8 – Modelo Green e Ampt
Fonte: Portela (2006)

A superfície do solo está coberta por uma camada de água com espessura desprezável ($H_0 \approx 0$).

No interior do solo existe uma frente de encharcamento que pode ser visualizada como um plano que separa uma zona superior, uniformemente saturada, de uma zona inferior não saturada, com um teor de umidade uniforme. O conteúdo de água na zona acima da frente de encharcamento permanece constante ao longo do processo de infiltração.

Imediatamente acima da frente de encharcamento existe uma pressão negativa constante a que corresponde um potencial matricial, Ψ , que, não obstante o movimento daquela frente, permanece constante.

Nas anteriores condições a taxa de infiltração, $f(t)$ [$L T^{-1}$], é dada por

$$f(t) = k \frac{L + \Psi}{L} \quad (5)$$

em que K [$L T^{-1}$] é a condutividade hidráulica, Ψ [L], o potencial matricial (“sucção”) na frente de encharcamento e L [L], a profundidade a que se encontra esta frente, representando, portanto, a extensão do percurso de percolação da água.

O volume de água infiltrada ou infiltração acumulada no instante t , $F(t)$ [L], obtém-se por aplicação da equação da continuidade, sendo dado pelo produto da diferença entre os conteúdos de água (teores volúmicos de umidade) no solo final e inicial pelo comprimento L , ou seja

$$F(t) = L (\theta_s - \theta_i) \quad (6)$$

sendo θ_i , o teor volúmico inicial de umidade do solo e θ_s , o teor volúmico de umidade correspondente à saturação do solo acima da frente de encharcamento. Em condições de saturação, este último teor iguala a porosidade do solo, η ($\theta_s = \eta$).

Retirando da equação (6) o valor de L , introduzindo-o na equação (5) e expressando $f(t)$ e $F(t)$ apenas por f e F obtém-se a equação de Green e Ampt para a taxa de infiltração

$$f = K \left[1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) \Psi}{F} \right] \quad (7)$$

que exprime o facto de a taxa de infiltração num dado instante ser função da infiltração acumulada até esse instante.

Por integração da equação (7), atendendo a que $L=0$ para $t=0$, resulta a equação de Green e Ampt para a infiltração acumulada

$$F = Kt + (\theta_s - \theta_i) \Psi \ln \left[1 + \frac{F}{(\theta_s - \theta_i) \Psi} \right] \quad (8)$$

ou, sendo $\theta_s = \eta$ em condições de saturação,

$$F = Kt + (\eta - \theta_i) \Psi \ln \left[1 + \frac{F}{(\eta - \theta_i) \Psi} \right] \quad (9)$$

A determinação da infiltração acumulada baseada nas equações (8) ou (9) tem de utilizar um processo iterativo. Avaliada esta infiltração é possível, por meio da equação (7), estimar a correspondente taxa de infiltração.

A aplicação do modelo de Green e Ampt para cálculo de f ou de F requer a estimativa prévia da condutividade hidráulica, K , do potencial matricial na frente de encharcamento, Ψ , da porosidade do solo, η , e do teor inicial de humidade do solo, θ_i .

Embora estes parâmetros tenham de ser avaliados experimentalmente, existem tabelas que, exceptuando θ_i , indicam valores para os restantes parâmetros que podem ser utilizados como primeiras estimativas.

Regista-se que no Quadro 2 fornece a condutividade hidráulica saturada, K_s , e não a condutividade hidráulica na frente de encharcamento, K , geralmente menor que K_s devido ao aprisionamento de ar na zona molhada. Contudo, a condutividade K pode ser estimada em cerca de metade de K_s , em solos de textura ligeira (ex.: arenosos), e em cerca de um quarto de K_s , para solos de textura mais pesada (ex.: argilosos) (Portela,2005).

Quadro 2 –Valores de referência dos parâmetros do modelo de Green e Ampt
Fonte: Portela (2005)

Classe de textura – designação:		Porosidade η	Potencial matricial na frente de encharcamento Ψ (cm)	Condutividade hidráulica saturada K_s (cm/h)
Inglesa	Portuguesa			
<i>Sand</i>	Solo arenoso	0.437 (0.374 – 0.500)	4.95 (0.97 – 25.36)	23.56
<i>Loamy sand</i>	Solo arenoso franco	0.437 (0.363 – 0.506)	6.13 (1.35 – 27.94)	5.98
<i>Sandy loam</i>	Solo franco arenoso	0.453 (0.351 – 0.555)	11.01 (2.67 – 45.47)	2.18
<i>Loam</i>	Solo franco	0.463 (0.375 – 0.551)	8.89 (1.33 – 59.38)	1.32
<i>Silt loam</i>	Solo franco siltoso	0.501 (0.420 – 0.582)	16.68 (2.92 – 95.39)	0.68
<i>Sandy clay loam</i>	Solo franco argiloso arenoso	0.398 (0.332 – 0.464)	21.85 (4.42 – 108.00)	0.30
<i>Clay loam</i>	Solo franco argiloso	0.464 (0.409 – 0.519)	20.88 (4.79 – 91.10)	0.20
<i>Silty clay loam</i>	Solo franco argiloso siltoso	0.471 (0.418 – 0.524)	27.30 (5.67 – 131.50)	0.20
<i>Sandy clay</i>	Solo argiloso arenoso	0.430 (0.370 – 0.490)	23.90 (4.08 – 140.20)	0.12
<i>Silty clay</i>	Solo argiloso siltoso	0.479 (0.425 – 0.533)	29.22 (6.13 – 139.40)	0.10
<i>Clay</i>	Solo argiloso	0.475 (0.427 – 0.523)	31.63 (6.39 – 156.50)	0.06

Os modelos de infiltração Horton e de Green e Amptm, consideram que a água necessária à infiltração está sempre disponível à superfície do solo, pelo facto de a intensidade da

precipitação exceder a taxa de infiltração. São, de facto, modelos para a capacidade de infiltração, conforme definição apresentada.

Se a intensidade da precipitação for inferior à capacidade de infiltração, a taxa de infiltração que efectivamente se verifica, ou taxa efectiva de infiltração, até ao encharcamento da superfície do solo passa a estar limitada por aquela intensidade. Tal efeito está representado na Figura 9, de modo aproximado.

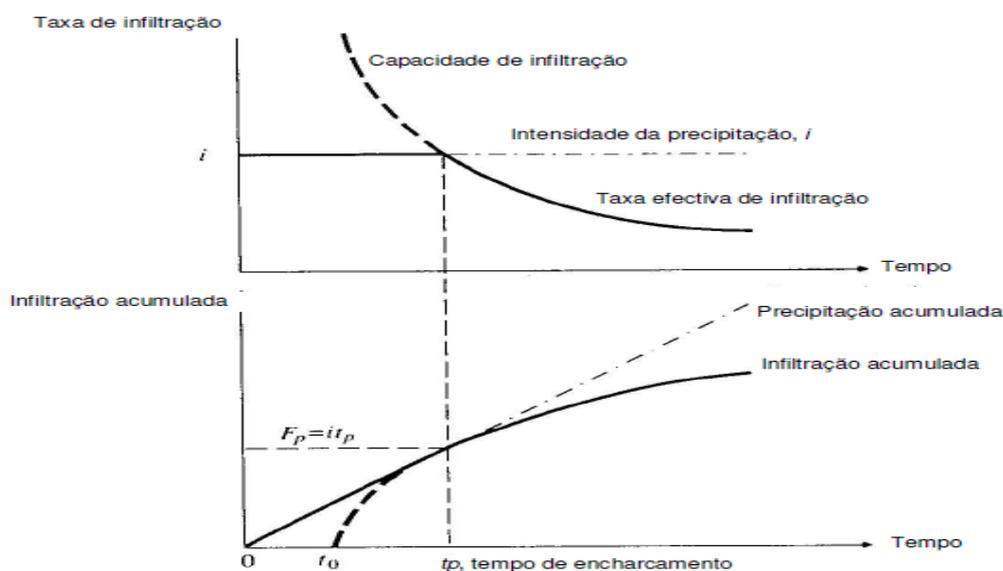


Figura 9 – Taxa de infiltração e infiltração acumulada condicionadas por uma precipitação com intensidade constante.
Fonte: Portela, 2006.

2.2.2.2.3 Método SCS-Soil Conservation Service (Curve Number)

O Soil Conservation Service (SCS, 1972), a partir da linguagem espacial de geoprocessamento algébrico, elaborou o modelo hidrológico Curve Number, é um método conhecido e vastamente utilizado para se estimar o escoamento superficial e, conseqüentemente, o caudal de rios, a recarga de água, infiltração, humidade do solo e transporte de sedimentos. Por tudo o que foi referido é também utilizado como instrumento auxiliar em projectos de obras hidráulicas e trabalhos de conservação de solo, entre outros.

O parâmetro de entrada, coeficiente de permeabilidade, é dos mais importantes para os modelos matemáticos utilizados em estudos hidrológicos e aplicados às bacias urbanas. Tal decorre do facto de este coeficiente expressar a capacidade que o solo tem de absorver a água por infiltração e permitiu concluir que, quanto maior for a capacidade de infiltração e menor potencial existir para gerar o escoamento superficial ter-se-á conseqüentemente menor frequência de enchentes. Não se pode ignorar que este coeficiente não é estático, variando de acordo com o tipo de solo, o teor de humidade inicial e a intensidade das chuvas.

Nos estudos de drenagem urbana deve-se considerar a parcela da precipitação responsável pela formação do escoamento superficial, denominada **precipitação efectiva**. Seguindo a metodologia do Soil Conservation Service (SCS) temos que a determinação desta precipitação é feita através da Equação

$$P_e = \frac{P - 0,2 S^2}{(P + 0,8 S)} \quad (10)$$

Onde **P** representa a precipitação (mm) e **S** é a retenção potencial do solo (mm).

O valor de **S** (Equação 5) é apresentado em função do valor **CN** (Curve Number).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (11)$$

O método do **SCS** é o modelo considerado, sempre que não se pode conhecer o correspondente hidrograma do escoamento directo, este método admite que, na sequência de um acontecimento pluvioso intenso, a razão entre a altura de precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial e a capacidade máxima de retenção de água na bacia é igual à razão entre a precipitação efectiva e o escoamento superficial potencial (Ponce, 1989, p. 156), como vem exemplificado na Figura 10.

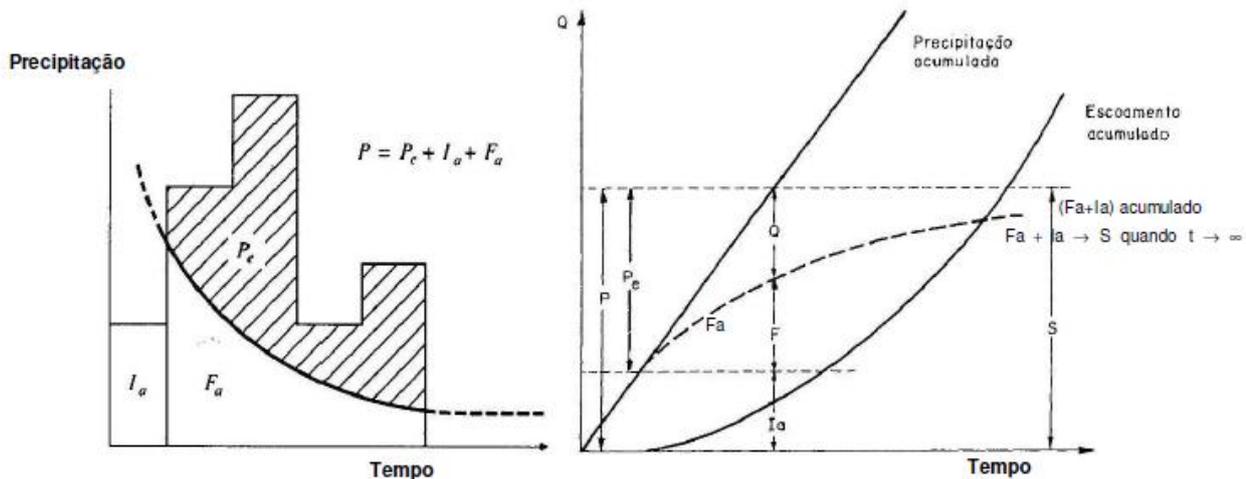


Figura 10 – Variáveis e funções do método do SCS para determinação das perdas de precipitação.

Fonte: Chow (1988).

A capacidade máxima de retenção de água na bacia é uma grandeza convencional e é entendida como a capacidade máxima de armazenamento de água na bacia hidrográfica quando no solo, nas depressões do terreno e nos obstáculos que interceptam a chuva é atingido um estado de intensa saturação, nesta conjuntura pressupõe-se que a taxa de infiltração correspondente tende para zero. Nestas circunstâncias as intensidades da precipitação total e efectiva seriam também iguais. (Wanielista, 1997).

O escoamento superficial potencial é definido como sendo a precipitação deduzida das perdas iniciais que ocorrem até ao encharcamento da superfície. Assim, obtém-se a expressão:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (12)$$

Sendo conforme a Expressão 12,

- P** precipitação (mm);
- P_e** precipitação efectiva (mm);
- F_a** altura de precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial representando, portanto, as perdas contínuas de precipitação (mm); retenção potencial máxima (mm);
- I_a** perdas iniciais, compreendendo todas as perdas por intercepção, armazenamento em depressões, evapotranspiração e infiltração que antecedem o encharcamento da superfície e a conseqüentemente formação do escoamento à superfície do terreno (mm);
- P-I_a** escoamento superficial potencial (mm).

De acordo com a anterior simbologia e por aplicação do princípio da continuidade resulta, por sua vez:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (13)$$

Resolvendo esta equação (13) em ordem a **F_a** e introduzindo o resultado assim obtido na equação (12), obtém-se, por manipulação, a equação do **SCS** para o escoamento superficial a seguinte equação:

$$Q = P_e = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (14)$$

em que **Q** é altura de escoamento directo (mm) que iguala a precipitação efectiva (mm).

Com base em estudos experimentais realizados em pequenas bacias hidrográficas agricultadas, o **SCS** propôs que as perdas iniciais, **I_a**, fossem aproximadas de 20% da capacidade máxima de retenção de água na bacia hidrográfica, ou seja:

$$I_a = 0,2 \cdot S \quad (15)$$

A anterior equação pode ser escrita, em termos gerais, do seguinte modo:

$$I_a = \Psi S \quad (16)$$

em que **Ψ** é um factor que permite expressar **I_a** em função de **S**.

A substituição da equação (16) em (14) permite especificar o escoamento directo e também de imediato, a precipitação efectiva, apenas em função da precipitação, **P**, da retenção potencial máxima, **S**, e do factor **Ψ** :

$$Q = P_e = \frac{(P-\Psi S)^2}{P+(1-\Psi) S} \quad (17)$$

ou, atendendo à proposta do **SCS**, expressa pela expressão (18)

$$Q = P_e = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P + 0,8 S} \quad (18)$$

A anterior equação só é válida se **P** exceder 0.2 **S** (ou, no caso geral, se **P** exceder ΨS). Em situação contrária ($P < 0.2 S$ ou $P < \Psi S$), o escoamento directo será nulo ($Q = P_e = 0$).

Em Ponce (1989), refere-se que o factor Ψ tem sido objecto de análise “minuciosa” que exemplifica com as conclusões de Springer (1980), estas conclusões indicam que, em pequenas bacias hidrográficas, em zonas moderadamente húmidas ou semi-áridas, Ψ está compreendido entre 0,0 e 0,26.

No caso português a única análise crítica do valor do factor Ψ , que se tem conhecimento, realizou-se em Portugal Continental e é apresentada por Correia (1984). Este autor afirma que o valor médio de 0,2, proposto pelo **SCS**, não foi verificado “de forma inteiramente concludente”, reconhecendo, ainda o autor, que tal valor conduz a precipitações efectivas muito baixas, em consequência das elevadas perdas iniciais de precipitação. Por este motivo, propõe um método de cálculo iterativo que, actuando sobre a própria duração da chuvada, conduz a menores perdas iniciais.

No referente ao parâmetro **S**, **retenção potencial máxima**, já acima referido, este tem como principais factores que determinam o valor de **CN** os tipos de solo, de coberto vegetal, de utilização do solo e as condições antecedentes de humidade. Esta relação é fornecida, pela equação (19), para **S** expresso em polegadas, e pela equação (11), para **S** expresso em milímetros (Tucci, 1993 e Wanieslista, 1997).

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (19)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (11)$$

Não se pode deixar de referir que do ponto de vista hidrológico se distinguem os seguintes quatro grupos de solos:

Grupo A: solos que apresentam baixo escoamento superficial potencial e elevada infiltração, mesmo quando totalmente encharcados. Inclui os solos arenosos profundos com pouco silte e argila;

Grupo B: solos que apresentam taxas de infiltração moderadas quando totalmente encharcados;

Grupo C: solos com baixas taxas de infiltração quando totalmente encharcados consistindo principalmente em solos, em que existem camadas que impedem o movimento descendente da água e em solos com textura moderadamente fina a fina, com percentagem elevada de argila;

Grupo D: solos com elevado escoamento superficial potencial. Estes solos apresentam, quando totalmente encharcados, taxas de infiltração muito reduzidas e são fundamentalmente constituídos por solos argilosos, solos em zonas, em que o nível freático é constantemente elevado, solos em que, à superfície ou próximo desta, ocorrem camadas argilosas ou ainda, solos finos sobre camadas impermeáveis.

As taxas de infiltração que, de acordo com as texturas de solo consideradas no USDA (United States Department of Agriculture), se atribuem aos anteriores grupos de solos são as seguintes (Rawls, 1992):

- grupo A – superior a 0.76 cm/h;
- grupo B – entre 0.38 e 0.76 cm/h;
- grupo C – entre 0.13 e 0.38 cm/h;
- grupo D – entre 0 e 0.13 cm/h.

No Quadro 3 indicam-se algumas propriedades hidrológicas de solos, identificando-se o grupo em que se inserem tais solos, de entre os grupos A, B, C e D anteriormente definidos.

Quadro 3 – Propriedades hidrológicas dos solos consoante a respectiva textura.
Fonte: Edgar de Sousa, Instituto Superior de Agronomia de Lisboa, 2002).

Classe de textura – designação:		Capacidade efectiva de água (in/in)	Taxa mínima de infiltração (in/hr)	Grupo hidrológico
Inglesa	Portuguesa			
<i>Sand</i>	Solo arenoso	0.35	8.27	A
<i>Loamy sand</i>	Solo arenoso franco	0.31	2.41	A
<i>Sandy loam</i>	Solo franco arenoso	0.25	1.02	B
<i>Loam</i>	Solo franco	0.19	0.52	B
<i>Silt loam</i>	Solo franco siltoso	0.17	0.27	C
<i>Sandy clay loam</i>	Solo franco argiloso arenoso	0.14	0.17	C
<i>Clay loam</i>	Solo franco argiloso	0.14	0.09	D
<i>Silty clay loam</i>	Solo franco argiloso siltoso	0.11	0.06	D
<i>Sandy clay</i>	Solo argiloso arenoso	0.09	0.05	D
<i>Silty clay</i>	Solo argiloso siltoso	0.09	0.04	D
<i>Clay</i>	Solo argiloso	0.08	0.02	D

Segundo Ponce (1989) os valores do número de escoamento, CN, podem ser facilmente obtidos com base em tabelas apresentadas pela generalidade dos autores que tratam o assunto Soil Conservation Service.

2.2.2.3 Modelo RDII (Rainfall-Derived Infiltration/Inflow)

Enquanto o modelo hidrológico descreve a componente rápida ou imediata da contribuição hidrológica e incide sobre as áreas superficiais das bacias, o módulo RDII representa a componente lenta e incide sobre as áreas de densidade de colector para cada bacia.

Relativamente ao módulo RDII, os três parâmetros a ajustar dizem respeito a três tipos de resposta induzida pela precipitação, nomeadamente: a resposta rápida, que engloba a infiltração directa nos colectores e não é dependente da condição hidrológica anterior; a resposta lenta, que engloba a infiltração lenta, proveniente do escoamento subsuperficial, e é dependente da condição hidrológica anterior; e uma resposta intermédia. Para cada tipo de resposta é necessário ajustar os seguintes parâmetros: a fracção de precipitação que origina escoamento (R), o tempo decorrente desde o início da precipitação até ao pico máximo de escoamento gerado (T) e a razão entre o tempo de recessão do hidrograma e o tempo decorrente desde o início da precipitação até ao pico máximo de escoamento gerado (K).

Para cada tipo de resposta o modelo RDII irá gerar um hidrograma como o representado na Figura 11.

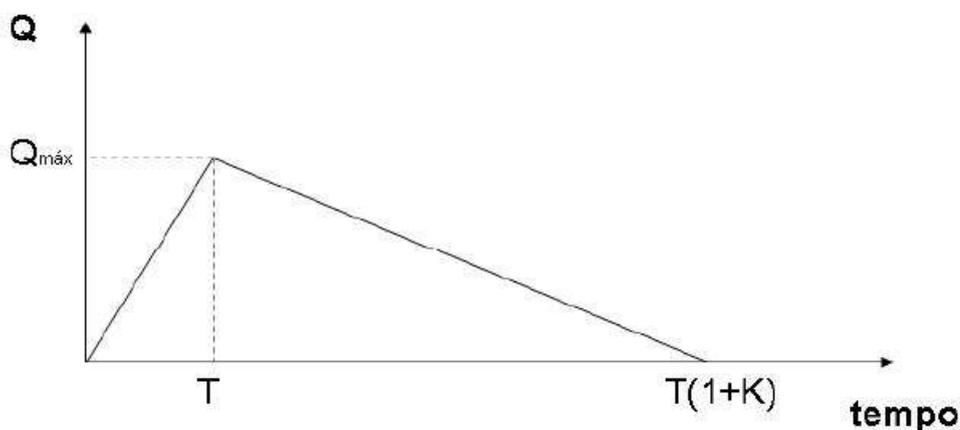


Figura 11 – Tipo de hidrograma gerado para cada componente do escoamento no módulo RDII

2.2.3 Modelo Hidrodinamico

No modelo hidrodinâmico o escoamento é representado através das equações de Saint-Venant: a equação da continuidade e a equação de conservação de quantidade de movimento. O escoamento em pressão é modelado através do esquema de Preissmann.

O SWMM apresenta três níveis de resolução das equações de Saint-Venant, correspondendo os dois primeiros a hipóteses de simplificação:

- Modelo de reservatório;
- Modelo cinemático;
- Modelo dinâmico.

O modelo de reservatório considera que o escoamento é uniforme e não variável. O modelo apenas transfere o hidrograma de caudal afluente de um colector a montante para o ponto de jusante desse colector, sem qualquer atraso ou alteração na sua forma. A velocidade média do escoamento é calculada com base na equação de Manning. Este tipo de modelo não permite considerar estruturas de armazenamento, simular a inversão do sentido do escoamento, perdas de carga localizadas ou escoamento em pressão.

No SWMM o modelo cinemático resolve a equação da continuidade conjuntamente com uma forma simplificada da equação de conservação da quantidade de movimento em cada colector. As condições de escoamento em colectores são fundamentalmente controladas pelo balanço entre as forças de gravidade e as de atrito, sendo desprezados os termos de inércia e de pressão da equação da quantidade de movimento.

A onda cinemática é independente das condições prevalecentes a jusante, pelo que as perturbações só se propagam de montante para jusante. Consequentemente, este tipo de modelo só pode ser aplicado quando o escoamento é independente das condições a jusante, ou seja, o caso de escoamento em regime rápido. Assim, este modelo não é adequado para

casos onde ocorra regolfo controlado por jusante (regime lento), entrada em carga e inversão no sentido do escoamento.

O modelo dinâmico resolve as equações completas de Saint-Venant, sendo o único que permite simular situações de regolfo, entrada em carga e inversão do sentido do escoamento. Este modelo tem como inconveniente necessitar de maior capacidade de cálculo matemático o que, em sistemas complexos, conduz a um maior tempo de cálculo, o que pode condicionar a simulação para séries longas de precipitação. Por outro lado, pode ser menos robusto no que respeita aos erros e a problemas numéricos.

3 Descrição da Bacia do Caneiro de Alcântara

3.1 Descrição da bacia

A Ribeira de Alcântara (Figura 12 e 13), actualmente canalizada, é uma ribeira, que drena quase toda a área ocidental da cidade. Nasce na Brandoa, concelho da Amadora, tem cerca de 12 km e corre pelos vales da Falagueira, Benfica e de Alcântara para desaguar no Tejo, na freguesia de Alcântara, em Lisboa. É um curso de água que se desenvolve quase exclusivamente em meio urbano. Devido à orografia dessas zonas urbanizadas por elas abrangidas, passou a desempenhar função de receptora de esgotos urbanos.



Figura 12 – Ribeira de Alcântara (1900)
Fonte: jmgs.fotosblogue.com

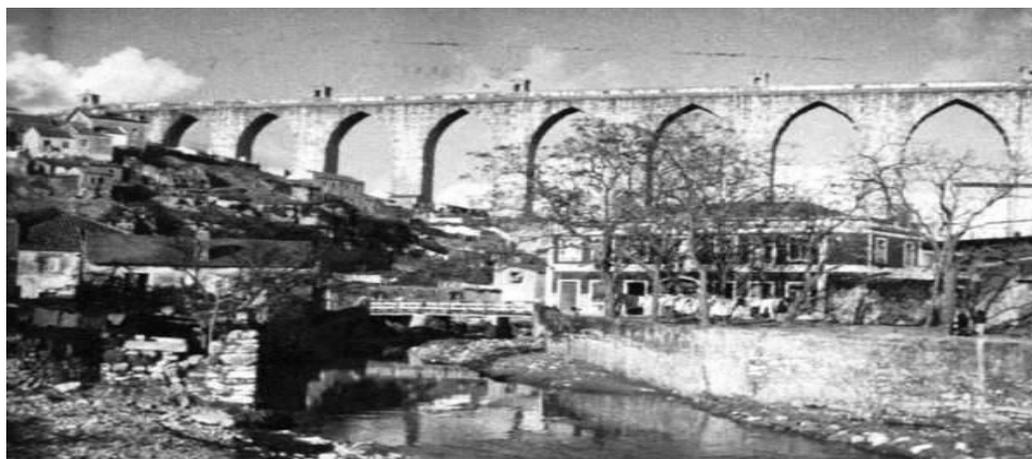


Figura 13 – Ribeira de Alcântara (1939)
Fonte: jmgs.fotosblogue.com

A área da bacia hidrográfica da Ribeira de Alcântara tem cerca de 3200 ha (2100 ha do concelho de Lisboa e 1100 ha de concelho de Amadora). Esta bacia pode ser considerada dividida em três bacias secundárias: bacia das Avenidas Novas, a bacia de Benfica, que se estende de Amadora e Falagueira até Sete-Rios, e a bacia do Vale de Alcântara. A bacia hidrográfica compreende ainda as faixas do Parque florestal de Monsanto.

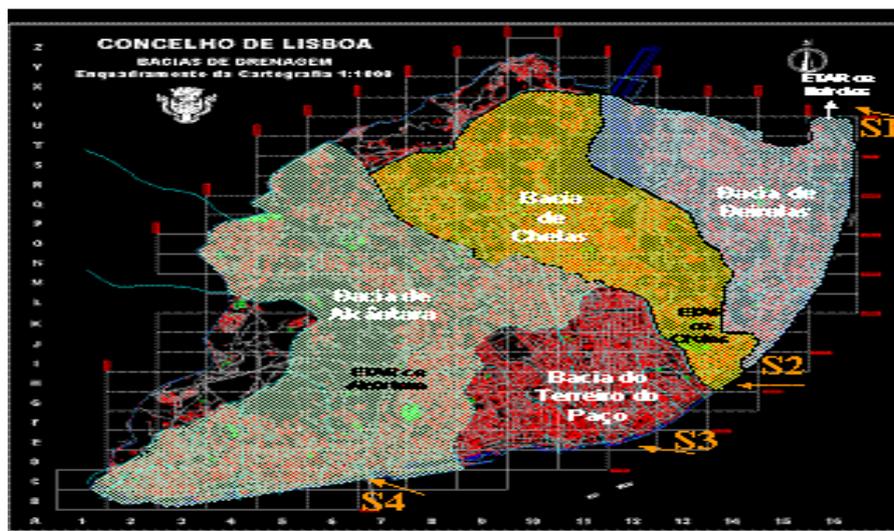


Figura 14 – Principais bacias da Cidade de Lisboa
 Fonte: Câmara Municipal de Lisboa, lisboaverde.cm-lisboa.pt

Antigamente, o ramo principal da Ribeira de Alcântara funcionava como colector a céu aberto, com grandes inconvenientes para a saúde pública que advinham das condições de salubridade desta ribeira, inconvenientes que numa visita ao local eram de constatação flagrante e que de há muito foram reconhecidos. Assim, e para citar apenas a opinião de dois ilustres engenheiros, diremos que desde de 1884, o ilustre Engenheiro Ressano Garcia, no projecto de esgotos da capital, já previa a canalização da Ribeira, apesar dela correr, nessa época, fora dos limites da cidade, e que em 1880 Miguel Pais nos seus estudos apontava o Caneiro como foco de epidemias ocorridas na época. Perante estes problemas e com o equacionamento da criação do Parque Florestal de Monsanto em 1938 e da urbanização da zona oeste da cidade, logo se percebeu a necessidade da efectiva realização da canalização da ribeira de Alcântara, urgência acrescida com o aumento da pressão populacional dos bairros da vertente ocidental e dos inconvenientes sanitários já citados e em franco aumento de pressão.

3.2 Construção do Caneiro de Alcântara

A chamada canalização da ribeira de Alcântara teve lugar, em 1ª fase, nos anos 40, com a construção do troço entre as estações de caminho-de-ferro de Campolide e Alcântara-Terra que terminou em 1951. As dimensões máximas da secção tipo são de 8,00 metros de largura e 5,15 metros de altura (Figuras 15 e 16).



Figura 15 – Caneiro de Alcântara, secção tipo.
Fonte: SIMTEJO

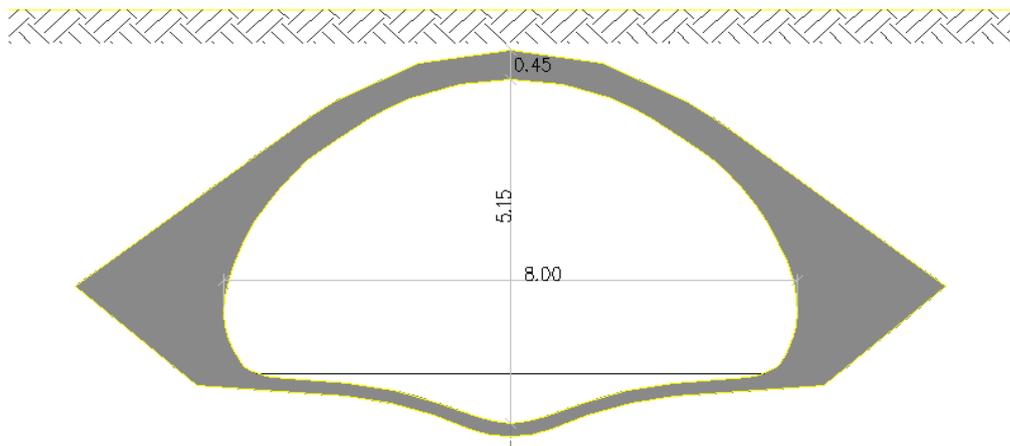


Figura 16 – Secção tipo, do Caneiro.

O caneiro de Alcântara é um colector de grande dimensão constituído por dois braços principais, o de Benfica e o de Sete rios, na sua maioria construído em betão simples, existindo alguns troços em alvenaria de pedra (Figura 17) e betão armado.

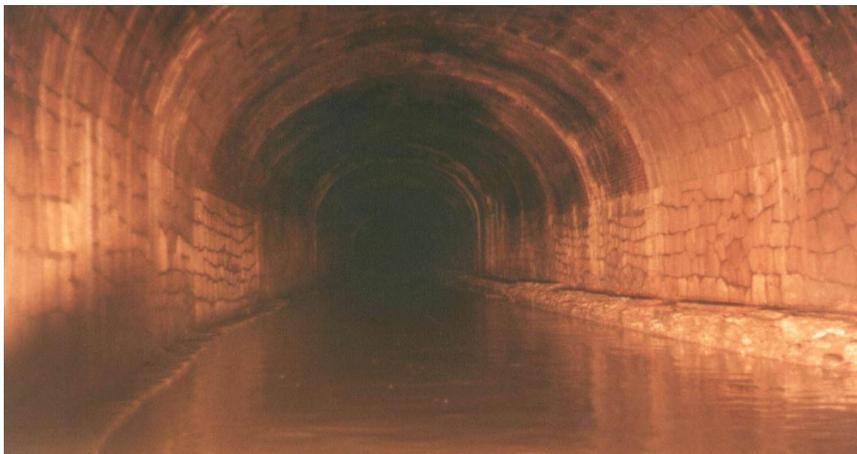


Figura 17 – Caneiro de Alcântara Secção em alvenaria de pedra.
Fonte: SIMTEJO

Segundo estudo técnico “Projecto da Canalização da Ribeira de Alcântara” (CML - Câmara Municipal de Lisboa, 1940) os elementos sobre chuvas, obtidos, no observatório Central de Lisboa permitiram estabelecer as hipóteses de chuvas consideradas. Estabelecidos os atrasos e aplicados os coeficientes de aproveitamento das águas superficiais, verificou-se então que o caudal máximo, no troço de jusante, seria de 213 m³/s para uma um evento de precipitação de 100 l/ha/s com a duração de 40 minutos e sendo o tempo de concentração de 40 minutos. Este número é confirmado pelo estudo dos níveis atingidos, por ocasião de cheias, a jusante. Por outro lado, o tempo de concentração é também confirmado pelo intervalo que tem mediado entre os inícios das chuvas e os pedidos de socorro para os Bombeiros, devido as inundações no Bairro de Alcântara. O estudo da secção de vazão do projecto Ressano Garcia em 1878, já tinha conduzido os cálculos a um caudal máximo de cerca de 170 m³/s. Tendo-se extraviado a memória do referido projecto supõe-se que o caudal tenha sido fixado de acordo com os estudos da época efectuados em Paris e Londres. Com efeito considerava-se drenada, pela rede de colectores, um terço das águas provenientes de uma chuva de 125 l/ha/s. Assim, se a bacia da Ribeira tem 4100 hectares, teremos o caudal do projecto Ressano Garcia dado por:

$$1/3 \times (0,125 \times 4100) = 171 \text{ m}^3/\text{s}. \quad (20)$$

Este valor é sensivelmente, o caudal correspondente ao caudal marítimo da secção cuja vazão plena e cerca de 160 m³/s.

Verifica-se pois que a diferença entre os caudais dos dois projectos, o de CML (1940) e de Ressano é pequena: 170 m³/s então, 213 m³/s agora. Esta diferença pode ser explicada pela consideração diversa das áreas urbanizadas da cidade. A quando da elaboração do projecto Ressano Garcia a quase totalidade da bacia da Ribeira onde Alcântara encontrava-se em zona não urbanizada e fora dos limites da cidade. Previa-se, então, que Lisboa teria, em 1940, uma população de cerca de 470000 habitantes. Hoje, sabemos que esse numero e largamente ultrapassado. Além disso o factor 1/3 tinha sido fixado empiricamente, baseado em certas observações locais. Não se tinha, em linha de conta, o grau de permeabilidade das diferentes áreas das bacias, nem os atrasos dos caudais como são determinados actualmente.

A Canalização, iniciada em 1940 pela C.M.L. previa um caudal máximo de 33,64 m³/s., correspondente a uma bacia hidrográfica de 24 Km² e a uma chuva de 75 mm., drenada em igual período de 24 horas.

O caudal de águas negras determinado a jusante pelo Porto de Lisboa foi de 1 m³/s. Medições subseqüentes confirmaram este número. Estudou-se, portanto, uma secção de vazão capaz de comportar, em boas condições, a grande variação de caudais das Ribeira: 1 m³/s a 213 m³/s.

Finalmente, verificou-se a natureza torrencial das linhas de água que descem da Serra de Monsanto. Os caudais chegam a atingir 7 m³/s. e as velocidades cerca de 14 m/s. Confirma-se a causa do assoreamento excessivo da Ribeira e a necessidade do seu reforço estrutural, nomeadamente da soleira.

Ao longo dos últimos anos, na sequêcia do desgaste e de alguns colapsos que têm vindo a ocorrer, a câmara Municipal de Lisboa tem vindo a fazer algumas intervenções de reabilitação do Caneiro de Alcântara.

A primeira ocorreu em 1969 na Av. De Ceuta, em 1978, no seguimento da ampliação da estação de caminho de ferro de Campolide, onde foi necessário alterar o perfil da canalização existente; em 1995, deu se início à reparação de um troço com 300 metros.

Com o colapso ocorrido em 26 de Outubro de 1999 reparam-se 300 metros e, mais recentemente, com o colapso ocorrido na Estação de Caminho de Ferro de Campolide em 25 de Novembro de 2003, reparam-se cerca de 50 metros.

Na sequência de novo colapso no dia 13 de Dezembro de 2003 junto aos arquivos da câmara municipal de Lisboa/ Bairro da liberdade, procedeu se à reconstrução de 25 metros do caneiro e 30 metros da sua soleira.

Em 2005, deu-se a última reparação registada até ao momento (Figura 18), na qual se efectuou a reparação e consolidação do caneiro no troço a montante da ETAR de Alcântara, sob o eixo ferroviário Norte/Sul numa extensão de 400 metros.



Figura 18 – Obras de reparação (2005).

Fonte: SIMTEJO

4 Estudos anteriores do Caneiro de Alcântara com recurso a modelação matemática

4.1 Introdução

Os primeiros estudos sobre a bacia de Alcântara surgiram, no âmbito do “projecto europeu” “Aplicação da análise hidráulica à reabilitação de sistemas de drenagem urbana nos estados membros”, financiado pelo programa europeu SPRINT SP98/2, que decorreram entre 1994 e 1996, onde a bacia de Alcântara constituiu o caso de estudo português (Matos et al., 1998).

A componente portuguesa deste projecto europeu teve como objectivo divulgar, expandir e adaptar a Portugal a metodologia de Wallingford (Reino Unido) para a análise e reabilitação dos sistemas de drenagem urbana. Esta componente foi desenvolvida pelo LNEC, em colaboração com a Câmara Municipal de Lisboa (CML), Departamento Municipal de Infra-estruturas de Saneamento, e incluiu a recolha dos elementos de base para o estudo, visitas de campo para inspecção do sistema, instalação de equipamento de medição, recolha e processamento de dados de medições, construção, calibração e verificação do modelo matemático, proposta e análise de alternativas de reabilitação (Almeida et al., 1995; Almeida e Cardoso, 1995; Cardoso et al., 1996; Cardoso e Pinheiro, 1996; Cardoso et al., 1997).

Devido à falta de informação sobre os caudais escoados no sistema de drenagem da bacia de Alcântara, o recurso à modelação matemática revelou-se bastante útil na previsão do comportamento da bacia de Alcântara, assim como do sistema de drenagem, para ocorrências de precipitação para as quais não existia registos de caudal escoado.

4.2 Modelo Caneiro de Alcântara – Hydroworks

O modelo matemático desenvolvido no âmbito do projecto Sprint (SP98/2), foi feito com recurso ao programa de simulação matemática Hydroworks, desenvolvido no Reino Unido (IHS, 1994). Este programa apresentava claras limitações face aos novos objectivos no estudo, nomeadamente, em termos de simulação de escoamento subsuperficial e de simulação de séries de eventos.

Este modelo da bacia do caneiro de Alcântara foi definido, tendo em conta quer as aflúncias domésticas quer as pluviais. O critério de simplificação do sistema foi o de se considerarem apenas os colectores com diâmetros superiores a 800 mm, embora fossem incluídos diâmetros inferiores no caso de apresentarem contribuições relevantes para o sistema. A definição dos nós do modelo foi feita, essencialmente, com base nas mudanças da secção transversal, material ou declive dos colectores, e em estruturas especiais, tal como descarregadores, válvulas ou comportas; no entanto, também foram considerados nós em colectores de grande extensão sem qualquer das referidas alterações.

O modelo simplificado em Hydroworks era constituído por 59 bacias principais, 132 sub-bacias, 219 nós, 219 colectores e um orifício que representava o desvio para a ETAR. Muitas das secções transversais dos colectores não eram secções normalizadas no programa

Hydroworks, pelo que se definiram 23 formas de secção transversal. A descrição detalhada deste modelo é feita em Cardoso et al. (1997).

A calibração e a validação deste modelo foram feitas com base numa campanha de medição de curta duração de caudal, nível de maré e precipitação, que se descreve com detalhe em Cardoso et al. (1996) e Cardoso et al (1996), efectuada de 20 de Janeiro a 19 de Março de 1996. Seleccionaram-se nove eventos para calibração e dois para validação, tendo a selecção dos eventos sido baseada em eventos de precipitação que apresentassem diferentes características.

Na campanha de medição foram instalados vários medidores de nível, de velocidade e de precipitação. Para a modelação da bacia de Alcântara foram utilizados dados de 6 udógrafos e 9 pontos de medição de nível e caudal, sendo 4 pontos para calibração do modelo, 4 pontos para contabilização de entrada de caudal e 1 ponto para medição do nível de maré à saída do sistema. Durante a campanha de medições ocorreram diversos problemas em alguns sensores, o que limitou o número de eventos disponíveis para a calibração e validação do modelo, simultaneamente, em todos os medidores. A calibração do modelo foi inicialmente realizada por sub-bacia, utilizando os eventos correspondentes disponíveis, e posteriormente para a bacia total, para a qual apenas se dispunham de 3 eventos, dois completos e um incompleto.

Os caudais de base, correspondentes ao caudal doméstico e ao caudal de infiltração, só puderam ser considerados em valor médio, constante ao longo do evento. Esta foi uma limitação do modelo construído no programa hydroworks, que não permite reproduzir a variação da infiltração e de outras contribuições (eventualmente de outras bacias interligadas) ao longo dos eventos de precipitação, situação que ocorre na realidade tal como se observa nos registos das medições.

Após os primeiros estudos, devido às limitações já referidas em cima, urgiu, no âmbito do projecto de ampliação da ETAR de Alcântara, recorrer a um estudo que passava pela: construção do modelo matemático da bacia do caneiro de Alcântara; na simulação do modelo para um conjunto de alternativas definidas, com recurso ao programa MOUSE; e na construção de um modelo simplificado da bacia do caneiro de Alcântara utilizando o programa SWMM.

O trabalho passava, numa primeira fase, por construir o modelo matemático da bacia do caneiro de Alcântara no programa MOUSE, simular o modelo para diversas alternativas, utilizando os registos de eventos de precipitação e de caudal disponíveis no LNEC seguido da simulação do modelo para diversas alternativas utilizando uma série de eventos de precipitação de 19 anos disponibilizada pelo INAG. Numa segunda fase construir um modelo reduzido da bacia do caneiro de Alcântara, no programa SWMM para apoio à SIMTEJO na gestão da bacia em estudo.

4.3 Modelo Caneiro de Alcântara – MOUSE

4.3.1 Introdução

O segundo modelo desenvolvido, com representação das sub-bacias e colectores do caneiro, foi no programa MOUSE (2000), para a simulação do comportamento hidráulico do sistema com base na modelação por evento. Este programa de simulação, sumariamente descrito em Cardoso et al. (2006), tem uma representação detalhada dos fenómenos hidrológicos e hidrodinâmicos e tem por finalidade a simulação do comportamento hidráulico do sistema para eventos individualizados.

O programa é constituído por módulos que permitem a modelação de diferentes fases e processos do escoamento. Foram utilizados os seguintes três módulos, que se descrevem sumariamente:

- módulo hidrológico, para modelação do escoamento superficial;
- módulo RDII, para modelação do caudal infiltrado devido ao escoamento subsuperficial;
- módulo hidrodinâmico, para modelação do escoamento na rede de colectores.

O módulo hidrológico permite a opção por um dos seguintes três modelos (DHI, 2002a):

Modelo A – faz o cálculo da precipitação efectiva através da consideração de perdas iniciais fixas, de uma percentagem de área impermeável contributiva, de um coeficiente de redução hidrológica e da propagação do escoamento através de curvas tempo-área, em que o principal parâmetro característico é o tempo de concentração da bacia;

Modelo B – faz o cálculo da precipitação efectiva através da consideração de perdas por humedecimento do solo, por retenção superficial e por infiltração (lei de Horton) e da propagação do escoamento através do modelo da onda cinemática, que tem em consideração o comprimento e o declive da bacia de drenagem; os coeficientes relativos às perdas hidrológicas e o coeficiente de rugosidade (de Manning) podem ser diferenciados por cinco classes de distribuição da ocupação superficial (solos permeáveis com capacidade de infiltração reduzida, média e elevada e solos impermeáveis com inclinação reduzida e elevada);

Modelo C – faz o cálculo da precipitação efectiva através da consideração de perdas por humedecimento e retenção superficial, por evaporação e por infiltração (lei de Horton) e da propagação do escoamento através do modelo do reservatório linear, em que o coeficiente de armazenamento é calculado em função da área e do tempo de concentração da bacia de drenagem; os coeficientes relativos às perdas hidrológicas e ao cálculo do coeficiente de armazenamento do modelo do reservatório linear podem ser diferenciados por quatro classes de distribuição da ocupação superficial (solo impermeável, solo parcialmente permeável, telhados e solo permeável).

O modelo A é o mais frequentemente utilizado por necessitar de menos informação de cada bacia de drenagem e por permitir obter resultados com uma aproximação adequada à maioria dos problemas. A utilização de qualquer um dos outros dois modelos requer uma descrição bastante mais detalhada das bacias de drenagem e, conseqüentemente, um volume de dados superior. Foi este o modelo utilizado no presente trabalho.

O módulo RDII tem de ser utilizado em combinação com o módulo hidrológico (modelos A, B, ou C). O módulo hidrológico descreve a componente rápida da contribuição hidrológica, enquanto o módulo RDII representa a componente lenta. O modelo RDII, baseado em equações físicas e empíricas, possui uma estrutura que representa, de forma simplificada, o comportamento do ciclo hidrológico no solo, considerando a retenção da água nos seguintes quatro tipos de armazenamento inter-relacionados: acumulação de neve na superfície das bacias, armazenamento superficial, armazenamento subsuperficial (correspondente à zona das raízes) e armazenamento subterrâneo (correspondente à recarga das águas subterrâneas) (DHI, 2002c). O módulo RDII permite calcular o caudal afluyente ao sistema de drenagem derivado, em cada bacia, do escoamento subsuperficial. Para tal é necessário utilizar dados meteorológicos, dos níveis freáticos, do teor de humidade no solo e dos caudais de base.

O módulo hidrodinâmico modela o escoamento unidimensional em regime variável na rede de colectores através das equações completas de Saint-Venant. Tendo em vista a aceleração do processo de cálculo, o modelo possibilita ao utilizador optar por modelos mais simplificados das equações de Saint-Venant, designadamente da onda difusiva ou da onda cinemática. Nos casos do escoamento em pressão, o MOUSE mantém a aplicação das equações do escoamento em superfície livre através da consideração do artifício da ranhura de Preissmann. Para além da consideração das câmaras de visita e dos trechos de colectores, com secções de diferentes formas e dimensões, o modelo permite modelar diversas estruturas e órgãos da rede de drenagem, como por exemplo: estações elevatórias, tanques de armazenamento, bacias de retenção, descarregadores de diversos tipos, válvulas e orifícios (DHI, 2002b). Foi o módulo hidrodinâmico que se utilizou no presente estudo.

4.3.2 Metodologia utilizada

A metodologia passou pela construção, calibração e verificação do modelo matemático da bacia do caneiro de Alcântara, utilizando o programa de simulação MOUSE, e na simulação de eventos registados para quatro alternativas estabelecidas.

As tarefas executadas foram as seguintes:

- 1) Compilação dos dados existentes (topologia, parâmetros do modelo, séries de medições) utilizados na modelação com o programa Hydroworks, realizada no projecto Sprint SP98/2;
- 2) Conversão e transferência dos dados do modelo e das séries de medições do programa Hydroworks para o programa MOUSE;
- 3) Recolha, preparação e introdução da informação adicional necessária (a partir dos elementos disponíveis) do modelo e das séries de medições;
- 4) Confirmação, calibração e validação do modelo com recurso aos elementos disponíveis;
- 5) Definição das alternativas a simular, em parceria com a equipa da SIMTEJO;
- 6) Recolha da informação necessária à implementação das alternativas;
- 7) Implementação das alternativas no modelo;
- 8) Execução da simulação das alternativas e processamento dos resultados;

9) Análise e discussão dos resultados.

4.3.3 Construção, Calibração e Validação

O modelo MOUSE da bacia do caneiro de Alcântara é constituído por 218 nós (nodes), 217 troços (links), 1 ponto de descarga (outlet), 1 descarregador (weir) localizado a montante da ETAR e um colector que liga o caneiro de Alcântara à ETAR (Figura 19), controlado por um regulador de caudal (regulator) que limita o caudal afluyente à ETAR. Dadas as características geométricas dos troços, foram definidas dezanove secções transversais.

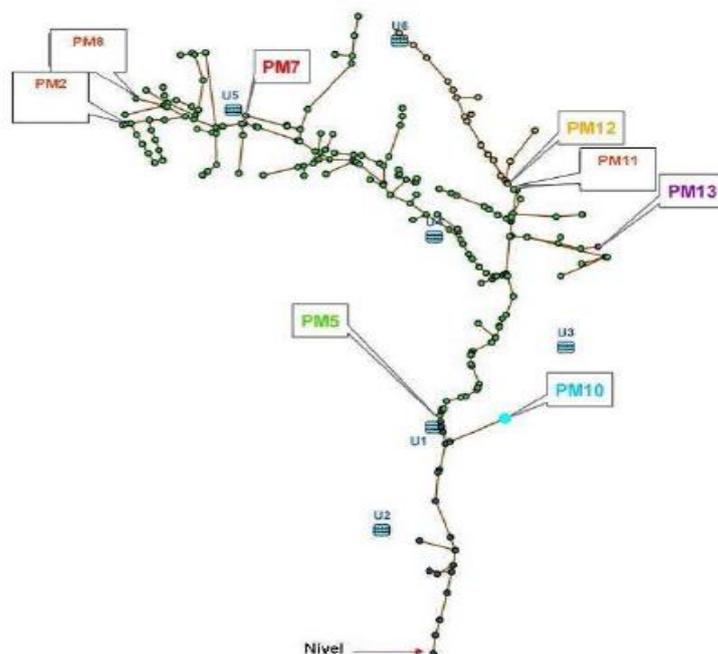


Figura 19 – Discretização do Caneiro de Alcântara no programa MOUSE

Fonte: Modelação Matemática da Bacia do Caneiro de Alcântara, Relatório Técnico, Parte 1, 2006.

Para o módulo de escoamento na rede de colectores, o principal parâmetro de calibração está associado à modelação de resistência ao escoamento. Neste caso, a resistência ao escoamento foi modelada com recurso à fórmula de Manning-Strickler. Os valores de rugosidade utilizados foram correspondentes a betão liso ($K_s=75 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, fórmula de Manning-Strickler), valor correspondente à média entre a rugosidade de topo ($K_s=78 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$) e a rugosidade de fundo ($K_s=71 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$) utilizadas no programa Hydroworks. Após a inserção e caracterização de todos os troços procedeu-se a uma verificação de todas as ligações, recorrendo às cartas da planta da cidade de Lisboa à escala 1/1000 correspondentes à situação em 1995/1996.

Para as cinquenta e nove bacias de drenagem principais, as quais estão associadas 132 sub-bacias, foram introduzidas as suas características tais como a respectiva área total, a percentagem de área impermeável e o nó a que estão associadas, de acordo com o que foi utilizado para o projecto SPRINT SP98/2. Não foram introduzidas alterações que ocorreram posteriormente, por exemplo, a ocupação do solo ou das áreas impermeáveis, pois pretende-

se utilizar a situação correspondente ao período em que decorreu a campanha de medições. Deste modo é possível calibrar, verificar e comparar o modelo no programa MOUSE com o modelo construído no programa Hydroworks. Assim, a área impermeável das bacias foi calculada através da soma da área pavimentada com a área dos telhados, pois estes parâmetros eram considerados separadamente no Hydroworks. No entanto, em virtude da incerteza relativamente à situação existente à época, foi opção considerar que a percentagem de área impermeável também era um parâmetro de calibração.

Assim, durante o processo de calibração da bacia global foi necessário alterar este parâmetro de modo a obter um maior volume afluente, sendo que a área impermeável final considerada corresponde a um aumento em 35% da área inicialmente estimada. Apesar de este valor não representar a realidade, neste caso, foi utilizado como forma de possibilitar a calibração e a verificação do modelo, tendo em conta todas as limitações existentes.

Uma vez que o processo de calibração envolveu a alteração e ajuste de vários parâmetros e possui maior complexidade do que o processo de verificação, em regra recorreram a um maior número de eventos para a calibração do que para a verificação.

Na calibração e na verificação do modelo matemático da bacia do caneiro de Alcântara utilizaram-se como critérios as diferenças volumétricas entre o caudal medido e o caudal simulado, a diferença entre o caudal de ponta medido e o simulado, e a forma do hidrograma.

Os erros volumétricos e de pico são calculados de acordo com as expressões.

$$E_{\text{volume}} = \frac{\text{Vol. Total}_{\text{med}} - \text{Vol. Total}_{\text{est}}}{\text{Vol. Total}_{\text{med}}} \quad (21) \quad E_{\text{pico}} = \frac{Q_{\text{p med}} - Q_{\text{p est}}}{Q_{\text{p med}}} \quad (22)$$

Os critérios de aceitação dos resultados da simulação consideram os seguintes intervalos, respectivamente para o volume e para o caudal de ponta de acordo com o já utilizado para o modelo construído com o Hydroworks:

Erro volumétrico: [-10%; +20%]

Erro no caudal de ponta: [-15%; 25%]

Os dados utilizados para calibração e verificação das sub-bacias dizem respeito aos respectivos parâmetros característicos necessários para o modelo hidrológico A, sendo estes o tempo de concentração (Tc), o factor de redução (Rf), as perdas iniciais (IL) e a curva tempo-área. Foi ainda necessário recorrer à percentagem de área impermeável (Ai) para conseguir um bom ajuste do modelo global da bacia de Alcântara, o que neste caso se considera adequado dada a grande simplificação e agregação das bacias.

O tempo de concentração representa o tempo que a partícula cinematicamente mais distante leva a percorrer a bacia até secção de referência, neste caso o ponto de entrada do sistema. Ao contrário do programa MOUSE, o programa Hydroworks não utiliza o tempo de concentração como parâmetro de calibração das bacias, recorrendo ao declive do terreno e ao comprimento da bacia. Assim, foi necessário estimar o tempo de concentração, para cada bacia, com base na área da bacia e no declive do terreno.

Segundo Matos (1987), “no processo de transformação da precipitação-escoamento, a precipitação total pode decompor-se numa parcela de “precipitação útil”, dando origem a

escoamento, e numa parcela de “perdas” relativas a intercepção e retenção (“perdas iniciais”) e à evapotranspiração e infiltração (“perdas contínuas”). Em bacias urbanas, com uma percentagem elevada de áreas impermeáveis, é válido aceitar em primeira aproximação que as perdas contínuas, que resultam fundamentalmente do processo de infiltração, podem ser desprezáveis.”

Para as perdas iniciais, Matos (1987) recomenda para as bacias nacionais um intervalo entre 0,3 e 0,5 mm. Para este modelo foi utilizado um valor de 0.4 mm.

O programa MOUSE permite, no seu modelo hidrológico A, optar por uma de três curvas tempo-área, de modo a ser considerada a influência da forma da bacia nas respostas em termos de hidrograma à ocorrência de precipitação Figura 20.

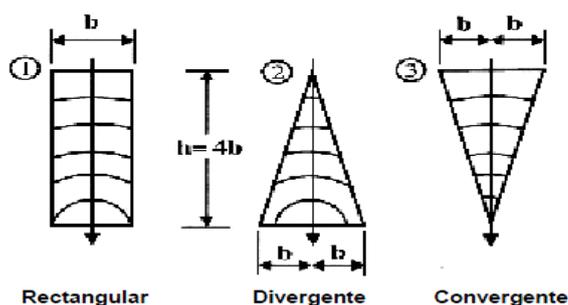


Figura 20 – Forma da bacia e respectivo número de curva tempo-área.

Fonte: Modelação Matemática da Bacia do Caneiro de Alcântara, Relatório Técnico Parte 1, 2006.

Foi considerada para todas as sub-bacias uma curva tempo-área rectangular (1). O factor de redução (R_f) corresponde à percentagem de água que é precipitada e que origina efectivamente escoamento superficial directo dirigido para a rede de colectores pluvial. Este factor é adimensional e atribuído a cada sub-bacia dependendo das suas características e tipo de ocupação de solo. No programa MOUSE admite-se um valor constante para cada sub-bacia hidrográfica. Contudo, isto é uma simplificação já que este coeficiente não é constante para as diferentes intensidades sendo, na realidade, crescente com elas tal como é crescente com a área da bacia e a densidade de drenagem, devido aos efeitos de armazenamento na rede (Lencastre e Franco, 2003).

Uma vez que o processo de calibração envolveu a alteração e ajuste de vários parâmetros e possui maior complexidade do que o processo de verificação, em regra recorre-se a um maior número de eventos para a calibração do que para a verificação.

Os erros obtidos e os eventos seleccionados no processo de calibração, para cada uma das quatro sub-bacias, apresentam-se na Quadro 4, quer para o programa MOUSE quer para o programa Hydroworks.

Quadro 4 – Erros obtidos durante os processos de calibração (%).

Evento	PM5				PM10			
	Volume		Pico		Volume		Pico	
	MOUSE	Hydroworks	MOUSE	Hydroworks	MOUSE	Hydroworks	MOUSE	Hydroworks
22.1.96	-	-	-	-	25	8	-17	-5
25.01.96A	0	1	-16	10	-4	-9	-18	-16
25.01.96B	19	17	55	61	37	-1	0	-40
26.1.96	-	-	-	-	18	7	23	11
31.1.96	-	-	-	-	23	7	29	15
8.3.96	-	-	-	-	54	14	31	21
10.3.96	-	-	-	-	44	-1	0	-22
12.3.96	-	-	-	-	-3	-5	29	2
19.3.96	-	-	-	-	-11	-1	-66	-71

A verificação do modelo foi efectuada utilizando os eventos registados seleccionados, distintos dos usados na calibração, sendo a comparação dos hidrogramas simulados com os medidos feita com os mesmos critérios que os que foram utilizados para o processo de calibração. No Quadro 5 apresentam-se os erros obtidos no processo de verificação do modelo para ambos os programas.

Quadro 5 – Erros obtido durante o processo de verificação (%).

Evento	PM5				PM10			
	Volume		Pico		Volume		Pico	
	Mouse	Hydroworks	Mouse	Hydroworks	Mouse	Hydroworks	Mouse	Hydroworks
26.1.96	25	-	-22	-	-	-	-	-
12.2.96	-	-	-	-	7	7	-4	-27
13.2.96	-	-	-	-	19	14	8	12

Constata-se que tanto para a calibração como para a verificação, os erros obtidos para o modelo da bacia de Alcântara utilizando, tanto o programa MOUSE como o Hydroworks são da mesma ordem de grandeza. Para o evento ocorrido no dia 25/01/1996 (B), o valor do erro de pico é excessivo para os ambos os programas, uma vez que se observa um pico de caudal nos registos das medições cujo valor simulado é significativamente superior. Este facto poderá dever-se a erros de medição. Para alguns eventos o MOUSE dá melhores resultados enquanto que para outros eventos verifica-se o contrário, não se podendo concluir que para a globalidade dos eventos exista uma melhor resposta do modelo para um determinado programa.

Na Figura 21 apresentam-se os registos de medição para o evento de 26 de Janeiro de 1996, e na Figura 22 os resultados de calibração em que o erro volumétrico obtido foi de 6% e o erro de pico de 12%. Na Figura 23 apresentam-se os registos de medição para o evento de 13 de Fevereiro de 1996 e, na Figura 24, apresentam-se os resultados de simulação para a verificação tendo sido obtido um erro de volume de 22% e um erro de pico de 25%.

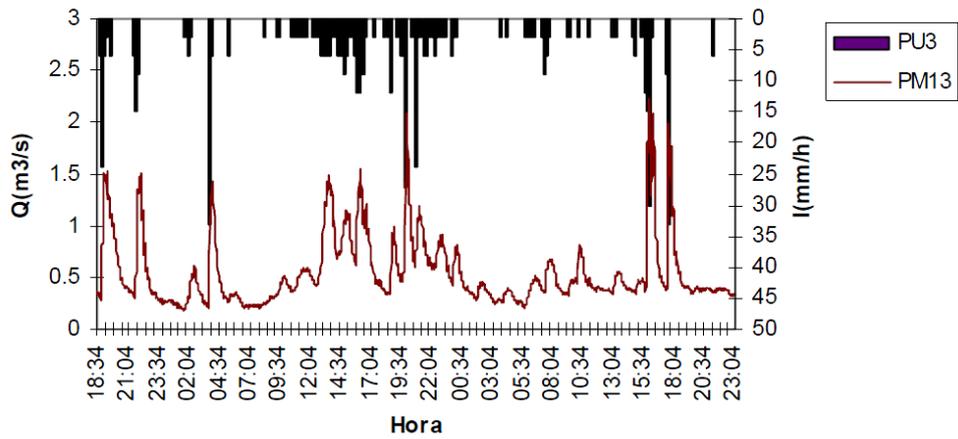


Figura 21 – Valores medidos de caudal e de precipitação, no dia 26/01/1996.

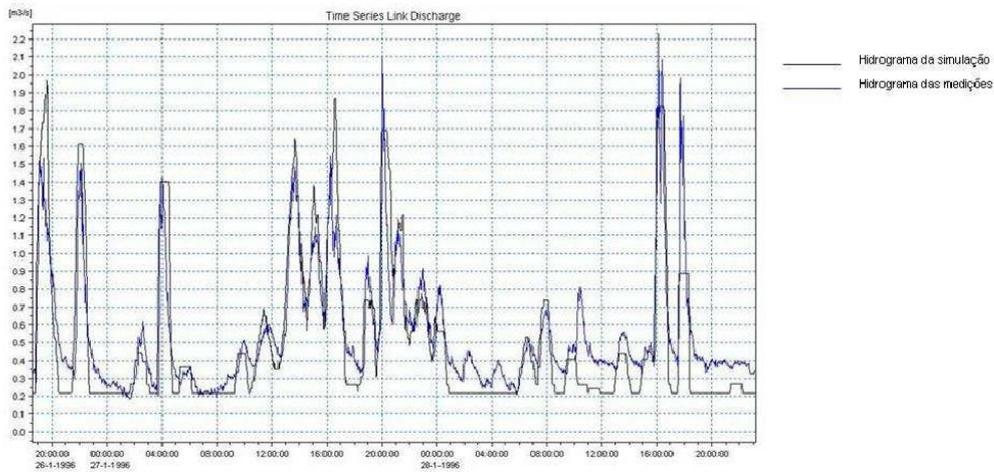


Figura 22 – Resultados da simulação do evento de 26/01/1996.

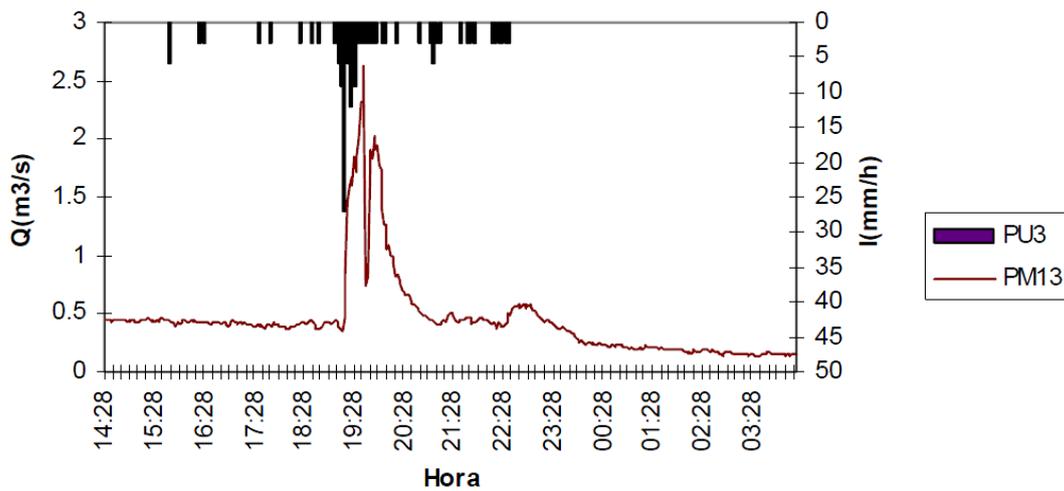


Figura 23 – Valores medidos de caudal e de precipitação, no dia 13/02/1996.

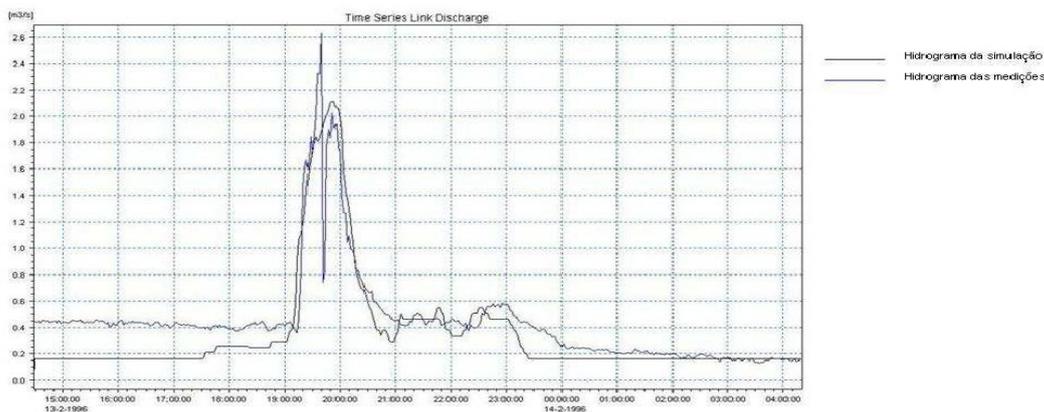


Figura 24 – Resultados da simulação do evento de 13/02/1996.

Em regra, observou-se um desfasamento da base dos hidrogramas que se deveu por um lado à falta de caracterização do caudal de base doméstico durante o tempo seco e, por outro lado, à infiltração e ao escoamento subsuperficial associado aos eventos de precipitação. Estas componentes de infiltração não foram devidamente representadas pelo modelo.

4.4 Modelo Caneiro de Alcântara – SWMM

4.4.1 Introdução

O SWMM, como já foi dito anteriormente, tem como principal objectivo a simulação hidrológica e hidrodinâmica de sistemas de drenagem urbana, permitindo simulações por evento, ou contínuas, com série de eventos.

Este programa é constituído por um conjunto de módulos de simulação que englobam todos os aspectos relevantes em drenagem urbana: a produção e propagação do escoamento superficial e subsuperficial; a propagação do escoamento nos colectores e a análise da qualidade da água das escorrências na superfície das bacias, no sistema de drenagem e nos meios receptoras.

4.4.2 Metodologia utilizada

A metodologia utilizada no anterior trabalho, consistiu na construção de um modelo matemático de um troço do caneiro de Alcântara, com representação da bacia superficial total, utilizando o programa de simulação SWMM, e na pré-validação desse modelo com as medições obtidas no projecto SPRINT SP98/2.

Para cumprir os objectivos definidos, foram executadas as tarefas seguintes:

1. Definição da secção inicial do modelo matemático a construir no SWMM;
2. Transferência e conversão dos dados do modelo e das séries de medições do programa MOUSE para o programa SWMM;

3. Recolha, preparação e introdução da informação adicional necessária ao modelo e das séries de medições (a partir dos elementos disponíveis);

4. Pré-validação do modelo construído no programa SWMM com recurso às medições obtidas no projecto SPRINT SP98/2;

4.4.3 Construção, Calibração e Validação

Os dados de base utilizados para a construção do modelo matemático reduzido da bacia do caneiro de Alcântara, foram os dados de cadastro recolhidos durante o projecto Sprint SP98/2, utilizados. Não foi utilizada a totalidade da informação de cadastro, visto o objectivo do projecto corresponder ao desenvolvimento de um modelo de um troço do caneiro, no programa SWMM, limitado a montante por uma secção seleccionada, situada a jusante da estação de Campolide. Para além disso, foram consideradas as actualizações de cadastro disponíveis. A informação de cadastro incorporada no modelo referido corresponde ao troço Alcântara-Campolide e ao troço marítimo do caneiro de Alcântara.

As medições de caudal e precipitação utilizadas foram as medições efectuadas durante o projecto SPRINT SP98/2 e usadas para a construção do modelo matemático da bacia de Alcântara, em MOUSE. Esta informação não foi igualmente utilizada na totalidade, visto o modelo simplificado desenvolvido em SWMM apenas contemplar um ponto de medição de caudal (PM5). Este ponto localiza-se a jusante do by-pass do caneiro para a ETAR de Alcântara e a montante do local de restituição do efluente para o caneiro de Alcântara (Figura 25). Dos seis pontos de medição de precipitação relativos ao projecto SPRINT SP98/2, apenas são utilizados 3, correspondentes aos udómetros U1, U2 e U3. Foram também utilizadas as medições do nível de maré correspondentes ao ponto de descarga no rio Tejo, por condicionarem o escoamento no caneiro.



Figura 25 – Localização do PM5, do By-pass à ETAR e do ponto de restituição.

Fonte: Modelação Matemática da Bacia do Caneiro de Alcântara, Relatório Técnico Parte 2, 2007.

Na Figura 26 apresenta-se o trecho do caneiro de Alcântara modelado, assim como a localização dos pontos de medição referidos anteriormente. A localização dos udómetros apresenta-se no Quadro 6.

Quadro 6 – Localização dos pontos de medição de precipitação

Udómetro	Localização
U1	Viaduto Duarte Pacheco
U2	Instituto Superior de Agronomia
U3	Reservatório da EPAL

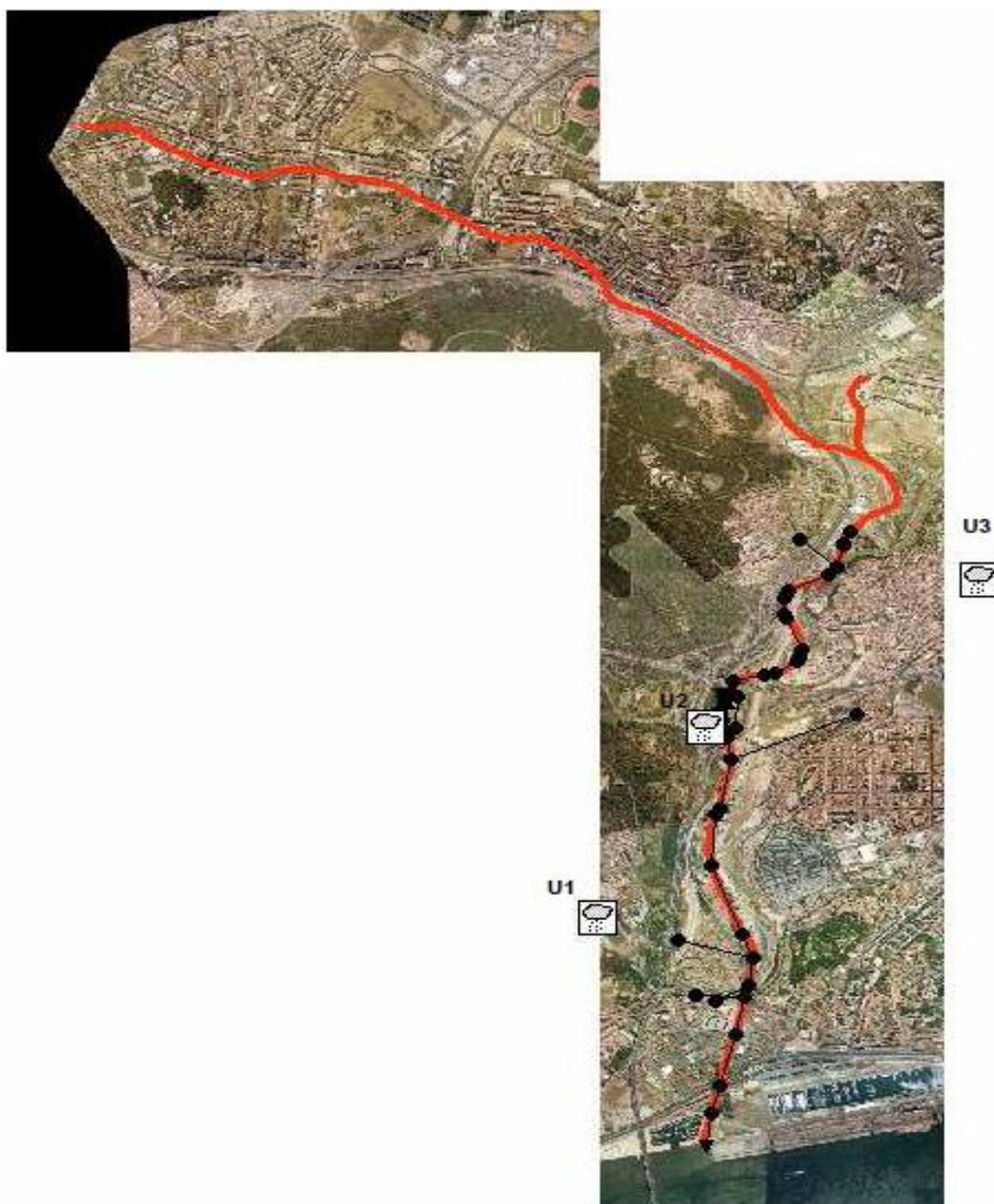


Figura 26 – Troço do caneiro de Alcântara modelado e localização dos udógrafos.

Os 3 eventos de precipitação seleccionados para a pré-validação do modelo correspondem a dois eventos ocorridos no dia 25 de Janeiro de 1996 e ao evento incompleto ocorrido durante o dia 26 de Janeiro do mesmo ano. As características dos respectivos eventos encontram-se descritas no Quadro 7.

Quadro 7 – Características dos eventos de precipitação seleccionados.

Evento 25/01/1996 A								
	Hora h:min	Du (min)	Htot (mm)	Iméd (mm/h)	Dímáx (min)	Imáx (mm/h)	Tseco (Dia) (hh:mm)	
U1	12:46	22	4,4	12	2	33	2	00:30
U2	10:24	164	4,8	1,76	4	24	1	17:24
U3	12:48	22	4,4	12	4	30	1	15:40
Evento 25/01/1996 B								
U1	19:22	696	5,8	0,5	2	15	0	06:14
U2	19:22	260	4,8	1,11	2	27	0	06:14
U3	19:24	108	3,2	1,78	2	12	0	06:14
Evento 26/01/1996								
U1	18:46	1498	26,1	1,05	2	24	0	11:48
U2	18:46	1310	25,7	1,18	6	21	3	01:46
U3	18:48	1746	35,1	1,21	2	33	0	07:30

O modelo parcial do caneiro de Alcântara desenvolvido no programa SWMM é constituído por 39 nós (junctions), 40 troços (conduit), 1 ponto de descarga (outfall) e 1 descarregador (weir), localizado a montante da ETAR.

Para a determinação do hidrograma diário afluente à ETAR a partir da bacia do Caneiro de Alcântara, em condições de tempo seco, utilizou-se a informação do modelo da bacia construído no programa MOUSE que considerou os hidrogramas médios de tempo seco dos pontos PM2, PM7, PM8, PM12 e PM13 e um hidrograma adicional, associado a uma secção do Caneiro localizada a jusante da Praça de Espanha (David et al., 2006). A Figura 28 ilustra o hidrograma obtido pelo programa MOUSE na secção imediatamente a montante da ETAR de Alcântara, a partir da simulação com os hidrogramas médios de tempo seco atrás referidos. Este hidrograma apresenta uma média diária de 0,97 m³/s e um máximo de 1,32 m³/s, valores que são muito próximos dos propostos pela SIMTEJO.

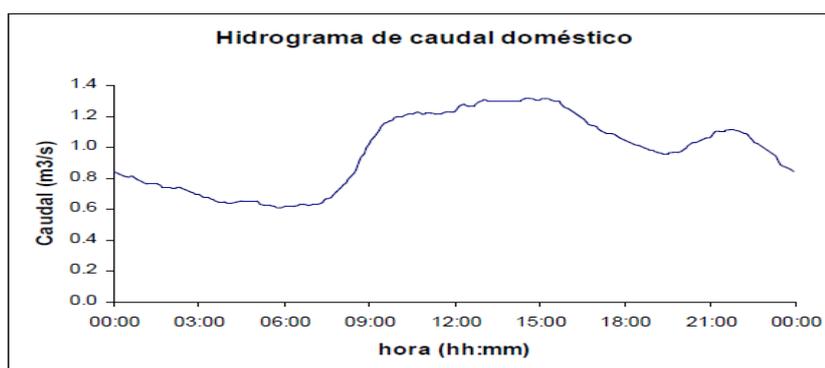


Figura 27 – Hidrograma de tempo seco afluente à ETAR

O caudal afluente à ETAR, quer durante o tempo seco, quer durante eventos de precipitação, é limitado pela condição de caudal máximo correspondente ao colectador de by-pass para a ETAR. O caudal máximo é de 2,2 m³/s, valor utilizado no projecto SPRINT SP98/2. O caudal desviado por este by-pass passa pela ETAR e é restituído ao caneiro, a jusante do ponto de medição PM5.

Das bacias de drenagem consideradas, 21 foram previamente calibradas e verificadas no modelo MOUSE e correspondem às sub-bacias da bacia de Alcântara localizadas a jusante da estação de Campolide. Para além destas foi adicionada uma bacia a montante da referida estação. Esta bacia de cabeceira, com uma área total de 2717 ha foi construída com a finalidade de representar o escoamento proveniente de todas as bacias existentes a montante da estação de Campolide.

As características das bacias localizadas a jusante da estação de Campolide correspondem às bacias do actual modelo da bacia de Alcântara em programa MOUSE (Cardoso et al., 2006). As principais características da bacia de cabeceira, localizada a montante da estação de Campolide, encontram-se apresentadas no Quadro 8.

Quadro 8 – Principais características da bacia de cabeceira.

	Bacia de cabeceira
Área (ha)	2717
A_{impem} (%)	100

Como descrito anteriormente (Cardoso et al., 2006), a bacia do caneiro de Alcântara tem uma componente de infiltração e de aflúências desconhecidas muito elevada, como se depreende da análise do caudal de base dos vários hidrogramas medidos durante eventos de precipitação. De forma a reproduzir este caudal de base, foi utilizado o módulo RDII do programa SWMM, que permite simular a resposta lenta resultante da infiltração.

O RDII foi aplicado na bacia de cabeceira, tendo sido considerada uma área de densidade de rede de colectores igual à área de contribuição da bacia de cabeceira, ou seja, 2717 ha.

Na pré-validação do modelo simplificado da bacia do caneiro de Alcântara no programa SWMM foram utilizados os mesmos critérios que foram aplicados para o modelo da bacia em MOUSE, ou seja, as diferenças volumétricas entre os valores do escoamento medidos e simulados, a diferença entre caudais de ponta medidos e simulados, e a forma do hidrograma.

Os erros volumétricos e de pico do hidrograma são calculados de acordo com as expressões 21 e 22 já apresentadas anteriormente no capítulo 4.3.3.

Os critérios de aceitação dos resultados da simulação consideram os seguintes intervalos, respectivamente para o volume e para o caudal de ponta, de acordo com o já utilizado para o modelo construído em Hydroworks e MOUSE:

Erro volumétrico: [-10%; +20%]

Erro no caudal de ponta: [-15%; 25%]

Aceitaram-se alguns valores fora destes intervalos, da mesma forma que no modelo MOUSE, tendo em conta as simplificações efectuadas no sistema, aflúências desconhecidas, problemas durante as medições, entre outros factores. Calibrou-se o modelo para que os erros volumétricos estivessem dentro do intervalo de valores aceitáveis, atribuindo menor peso aos erros de pico.

Como foi anteriormente referido, as simulações efectuadas correspondem a 3 eventos de precipitação, com diferentes características, ocorridos entre os dias 25 e 27 de Janeiro de 2006.

Foi apenas efectuada a pré-validação para a bacia de cabeceira, no modelo hidrológico. Os parâmetros de calibração do modelo hidrológico encontram-se apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Parâmetros ajustados durante as simulações

	Bacia de cabeceira
Área (ha)	2717
A_{impem} (%)	100
Inclinação (%)	10
W (m)	8000

Relativamente ao módulo RDII, os parâmetros ajustados para as diferentes respostas apresentam-se no Quadro 10.

Quadro 10 – Parâmetros ajustados no módulo RDII.

	R (%)	T (horas)	K (-)
Resposta Rápida	20	0,18	50
Resposta intermédia	50	0,60	50
Resposta Lenta	30	1,00	50

O intervalo de tempo disponível com registos simultâneos de precipitação e caudal não é suficiente para proceder à correcta calibração do módulo RDII. Deste modo, os valores apresentados são os que melhor ajustam os hidrogramas simulados e medidos. O hidrograma simulado no SWMM é designado por SWMMa.

Os valores dos erros do caudal de ponta e do volume de escoamento, entre os hidrogramas medidos e simulados (Figuras 28, 29 e 30), obtidos para os diferentes eventos, encontram-se apresentados no Quadro 11 para o modelo construído em programa SWMM e para o modelo construído em programa MOUSE. Encontram-se assinalados a vermelho os que valores que estão fora dos critérios estabelecidos.

Quadro 11 – Erros obtidos para o modelo em programa SWMM e programa MOUSE.

Programa	SWMM a					MOUSE				
	Volume	Pico				Volume	Pico			
Eventos	Vtotal	P1	P2	P3	P4	Vtotal	P1	P2	P3	P4
25/01/96 (A)	24	-6	-	-	-	0	-16	-	-	-
25/01/96 (B)	48	56	60	-	-	19	54	29	-	-
26/01/96	-2	25	-98	-19	34	25	40	27	11	30

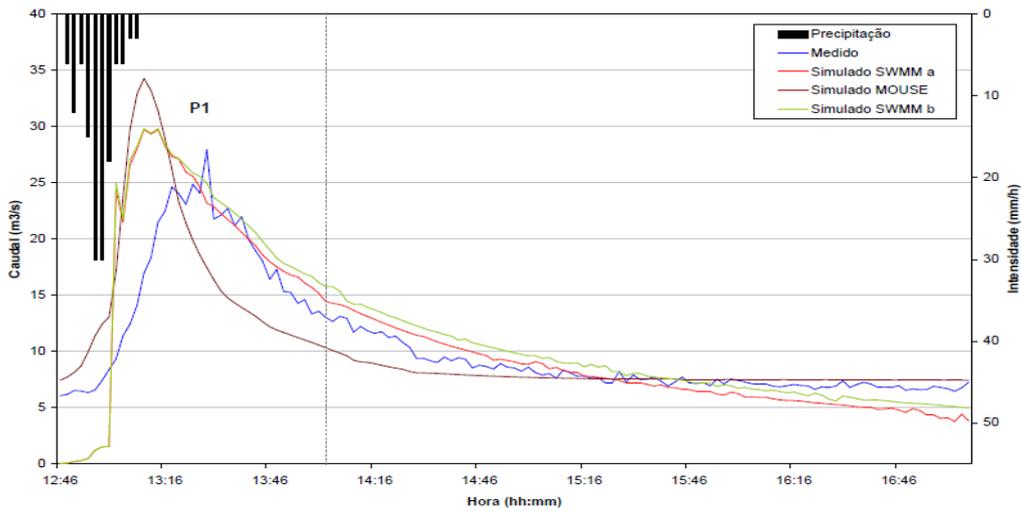


Figura 28 – Resultados da simulação para o evento de 25/01/1996 (A)

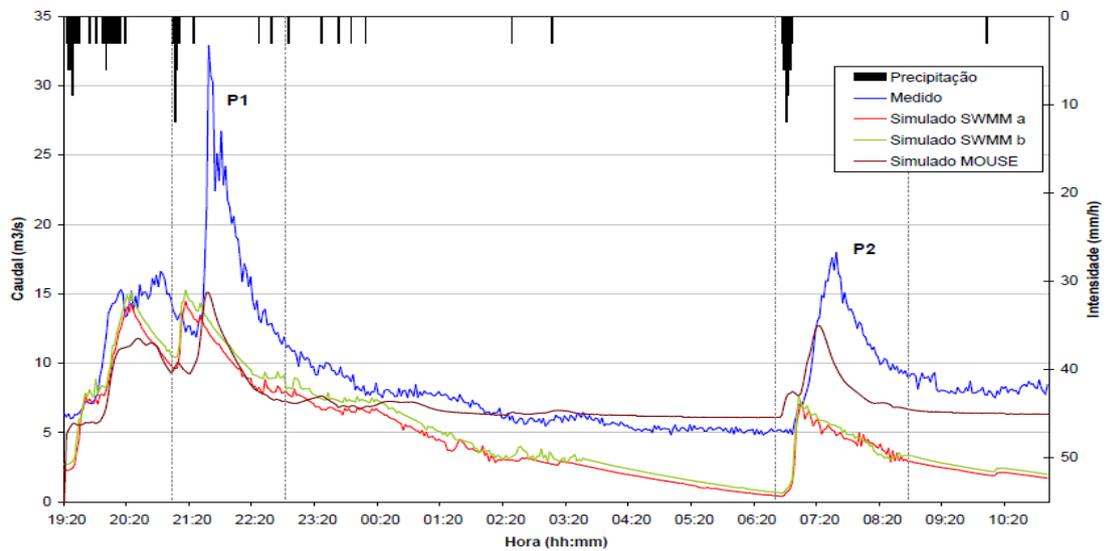


Figura 29 – Resultados da simulação para o evento de 25/01/1996 (B)

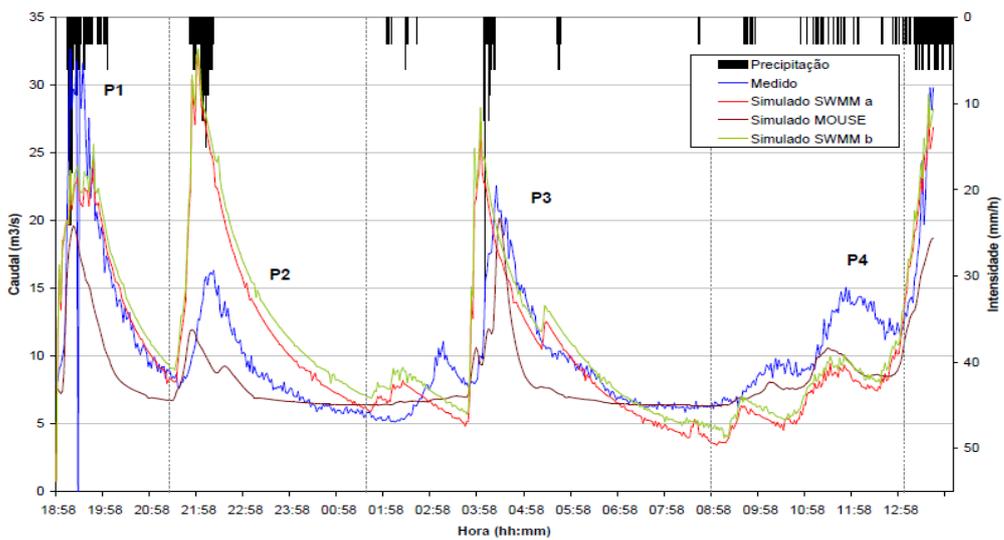


Figura 30 – Resultados da simulação para o evento de 26/01/1996

Como se pode analisar dos resultados obtidos para os diferentes eventos, não se obtém um bom ajustamento entre os hidrogramas simulados (SWMMa) e medidos no que diz respeito aos caudais de base. Esta situação, já observada na utilização do programa MOUSE (Cardoso et al., 2006), deve-se essencialmente à contribuição de escoamento gerado por caudais de base provenientes de infiltração e de aflúências desconhecidas. No programa MOUSE este caudal de base é atribuído com valor constante ao longo de todo o evento, sendo este valor definido com base nos registos de caudal medidos no evento correspondente. Assim, além do caudal de base não variar ao longo do evento, também não permite ajustar a base durante a ocorrência dos picos de caudal.

De modo a ultrapassar esta limitação considerou-se a aplicação do módulo RDII do SWMM com uma formulação mais simples do que a do MOUSE, como foi anteriormente descrito, considerando uma área de densidade de colector de 2717ha (SWMMa).

4.4.4 Comparação entre o modelo MOUSE e SWMM

A limitação do modelo MOUSE – módulo RDII em reproduzir o escoamento subsuperficial foi contornada através da utilização de hidrogramas de caudal constante (determinados com base nas medições) característicos para cada evento de precipitação. No entanto, esta alternativa limitava as simulações do modelo aos eventos de precipitação registados. O modelo SWMM não tem esta limitação uma vez que o módulo RDII permite reproduzir os caudais de base provenientes de infiltração e aflúências desconhecidas em função das características de cada evento de precipitação.

A modelação da bacia de cabeceira do modelo simplificado em SWMM permitiu utilizar o modelo hidrológico para quaisquer eventos de precipitação. No entanto, verifica-se que as simulações efectuadas conduziram a resultados por defeito, relativamente às medições, concluindo-se que existem aflúências desconhecidas que não são reproduzidas pelo modelo, tal como foi verificado no modelo MOUSE. Adicionalmente deve ter-se em conta que a simplificação contida na consideração de uma única bacia desta dimensão (2717 ha), cujo comportamento é simulado através de um modelo sem representação da rede de colectores, tem influência o tipo de resposta e, conseqüentemente, nos resultados da modelação, dificultando a sua calibração.

O modelo apresentado, segundo LNEC (David, 2007), poderá vir a ser utilizado com maior fiabilidade em futuros trabalhos, desde que calibrado e verificado com medições de caudal e de precipitação actuais. De igual modo, todas as alterações de funcionamento e de cadastro do sistema deveriam ser incorporadas neste modelo.

5 Dados de Base do Modelo do Caneiro de Alcântara

5.1 Considerações gerais

Este trabalho iniciou-se com a recolha de dados de caudal e de pluviosidade, registados através de um medidor de caudal instalado no Caneiro de Alcântara e de dois udógrafos, respectivamente, instalados no recinto da ETAR de Chelas e no edifício dos Bombeiros voluntários da Pontinha. Do ponto de vista temporal, os dados utilizados na presente dissertação abrangeram o período compreendido entre Fevereiro e Abril do ano de 2011.

A metodologia aplicada neste estudo passou, em primeiro lugar, pela criação de um novo hidrograma de tempo seco (caudal de base afluente) com base de registos de caudal e em segundo lugar na calibração e validação do modelo para tempo húmido.

5.2 Dados Base

5.2.1 Dados de Precipitação

5.2.1.1 Udógrafos

Os dois instrumentos de medição de quantidade de precipitação foram colocados no edifício dos Bombeiros Voluntários da Pontinha, em Odivelas, e na ETAR de Chelas, no vale de Chelas, em Lisboa (Figuras 31, 32 e 33). Para diferenciar os udógrafos já colocados e utilizados no estudo anterior, no Modelo SWMM aplicado ao Caneiro de Alcântara, estes últimos foram denominados por U5 e U7. Os dados obtidos por U5 e U7 aqui utilizados são referentes aos meses de Fevereiro, Março e Abril.

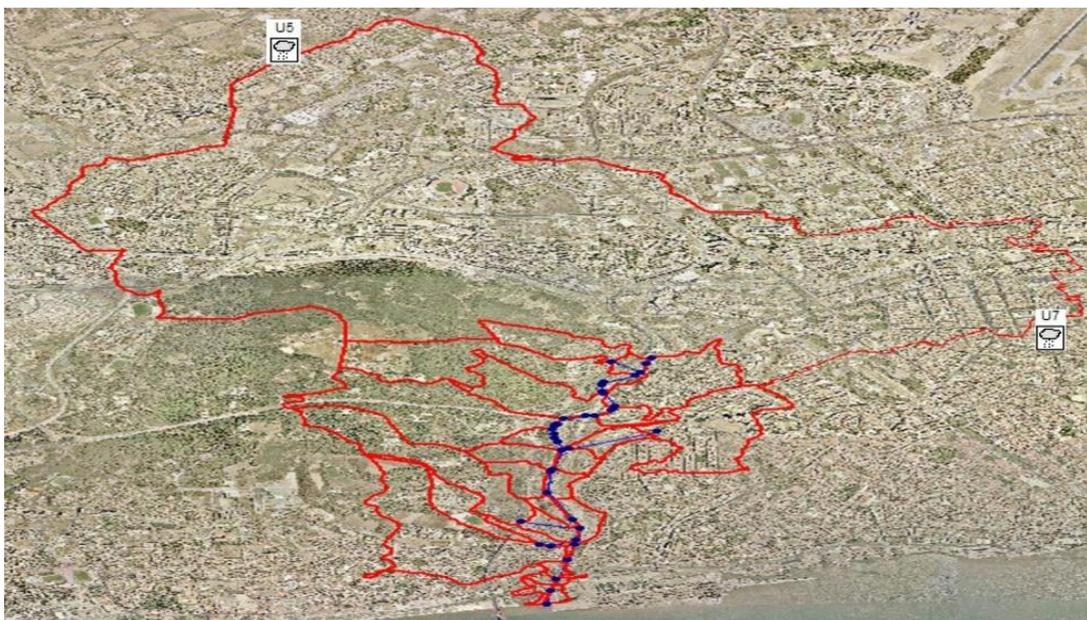


Figura 31 – Localização dos udógrafos.



Figura 32 – Udógrafo de Chelas (U7).

Fonte: SIMTEJO.



Figura 33 – Udógrafo instalado no edifício dos Bombeiros Voluntários da Pontinha (U5).

Fonte: SIMTEJO.

5.2.1.2 Registos de Precipitação

No Quadro 12, temos um exemplo dos dados de intensidade fornecidos por um dos udógrafos, de dois em dois minutos.

Quadro 12 – Dados de Intensidade do udógrafo.

Data e hora	Intensidade (mm/h)
14-02-2011 14:40	6.00
14-02-2011 14:42	0.00
14-02-2011 14:44	0.00
14-02-2011 14:46	0.00
14-02-2011 14:48	0.00
14-02-2011 14:50	0.00
14-02-2011 14:52	0.00
14-02-2011 14:54	6.00
14-02-2011 14:56	6.00
14-02-2011 14:58	0.00
14-02-2011 15:00	6.00
14-02-2011 15:02	6.00

No Quadro 13 apresenta o número de dias de chuva, a precipitação total, precipitação máxima mensal, a precipitação média diária, a intensidade máxima e o número e percentagem de falhas, ocorridas nos meses de Fevereiro, Março e Abril, nos udógrafos U5 e U7.

Quadro 13 – Principais resultados na análise dos registos de precipitação.

Udómetro	U5			U7		
	Fevereiro	Março	Abril	Fevereiro	Março	Abril
Meses						
Nº dias de chuva	11	14	9	12	13	8
Precipitação total (mm)	141,4	76,6	146,2	114,8	81,2	101,8
Precipitação máxima mensal (mm)	41,4	18,8	47,6	35	21,8	33,2
Precipitação média diária (mm)	5,1	2,5	4,9	4,1	2,6	3,4
Intensidade máxima (mm/h)	54,0	30	108	48,0	48	72
N.º Falhas	3	2	2	29	9	6
% Falhas (Mês)	0,01	0,01	0,01	0,14	0,04	0,03

No Quadro 14, pode observar-se os dias em que ocorreu precipitação (mm), para o caso de estudo (24 de Fevereiro a 15 de Abril). A título de curiosidade, no período em análise, choveu apenas no mês de Março. Na Figura 35, observar-se o Hietograma do período em estudo.

Quadro 14 – Precipitação Diária

Dias	Precipitação U5 (mm)	Precipitação U7 (mm)
05-Mar	2,80	2,80
06-Mar	4,00	7,20
07-Mar	2,80	3,40
08-Mar	12,20	7,40
09-Mar	0,20	0,00
10-Mar	0,00	0,40
11-Mar	6,20	11,00
12-Mar	2,20	3,80
13-Mar	8,40	4,20
14-Mar	19,00	21,60
22-Mar	0,80	0,00
26-Mar	2,60	3,40
27-Mar	0,60	1,00
28-Mar	14,40	14,40
29-Mar	0,40	0,20

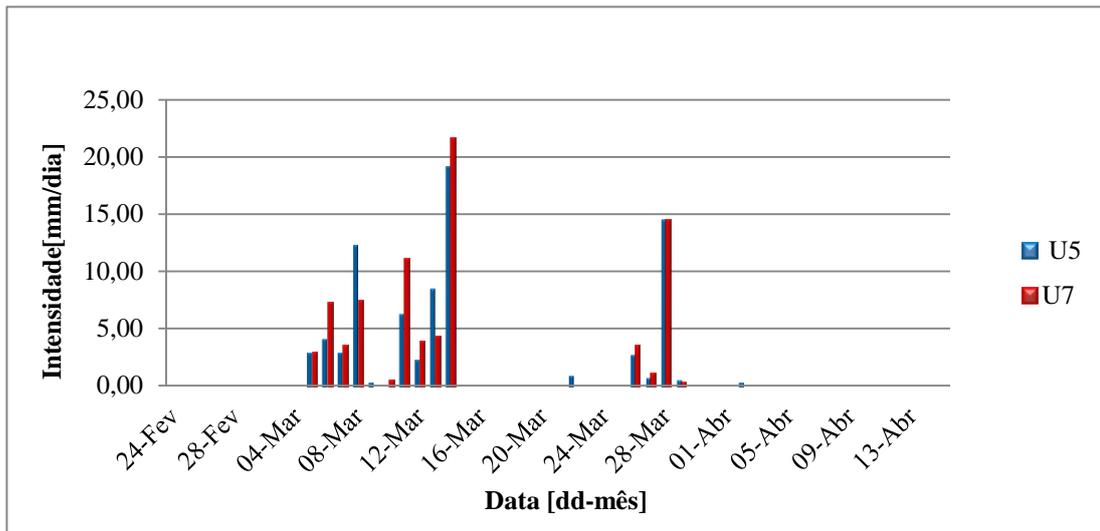


Figura 34 – Hietograma de 24 Fevereiro a 15 de Abril registados nos udógrafos, U5 e U7.

5.2.2 Dados de Caudal

5.2.2.1 Medidor de Caudal

O medidor de caudal foi instalado no Caneiro de Alcântara no mês de Janeiro do 2010 e localiza-se no troço que cruza o Aqueduto das Águas Livres, como se pode observar na Figura 35.

Tendo em conta a numeração do Modelo do Caneiro de Alcântara, utilizado nos estudos anteriores, o medidor encontra-se localizado entre os nós 08J001 e 08J004, mais concretamente no troço 08J001.1.



Figura 35 – Localização do medidor de caudal
Fonte: SIMTEJO

Este equipamento, com tecnologia radar com o nome de FLODAR, mede a velocidade e o nível ou altura de escoamento, de minuto a minuto, determinando o valor do caudal através da conjugação dessas duas medições. A recolha dos dados provenientes deste medidor está ao cargo da empresa SIMTEJO, podendo ser visualizados e disponibilizados através de um portal, via Web.

Nesta primeira fase, o medidor apenas mede para velocidades até 6 m/s o que nos dá uma limitação de leituras de caudal até aos 13 m³/s. No entanto, o equipamento possibilita a medição de nível para qualquer caudal observado no caneiro.



Figura 36 – Quadro electrónico do medidor de caudal FLODAR

Fonte: SIMTEJO



Figura 37 – Medidor de caudal FLODAR, visto no interior do Caneiro de Alcântara

Fonte: SIMTEJO

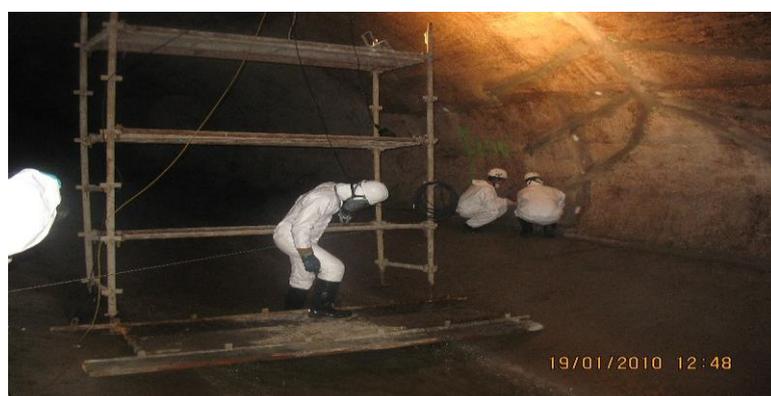


Figura 38 – Instalação do medidor de caudal no interior do caneiro.

Fonte: SIMTEJO

No Quadro 15 temos um exemplo da informação proveniente do medidor.

Quadro 15 – Quadro exemplificativo dos dados FLODAR

Data/Hora	Caudal [m ³ /sec]	Nível [m]	Velocidade [m/s]
24-02-2011 16:12	1,813	0,292	4,95
24-02-2011 16:13	1,784	0,283	4,938
24-02-2011 16:14	1,792	0,281	4,938
24-02-2011 16:15	1,776	0,278	4,938
24-02-2011 16:16	1,759	0,273	4,938
24-02-2011 16:17	1,781	0,277	4,999
24-02-2011 16:18	1,78	0,288	4,996
24-02-2011 16:19	1,806	0,292	4,999
24-02-2011 16:20	1,812	0,281	5,005
24-02-2011 16:21	1,828	0,288	4,968
24-02-2011 16:22	1,858	0,288	5,005
24-02-2011 16:23	1,82	0,282	4,993
24-02-2011 16:24	1,733	0,285	4,993
24-02-2011 16:25	1,797	0,287	4,987
24-02-2011 16:26	1,793	0,29	4,974
24-02-2011 16:27	1,821	0,284	4,983
24-02-2011 16:28	1,821	0,277	4,983
24-02-2011 16:29	1,798	0,283	4,999
24-02-2011 16:30	1,804	0,29	5,005
24-02-2011 16:31	1,831	0,281	4,999
24-02-2011 16:32	1,835	0,293	4,999
24-02-2011 16:33	1,785	0,286	4,999

Dos dados fornecidos pelo medidor foi apenas utilizado o caudal registados em cada minuto. Nas Figuras 39, 40 e 41, estão representados os hidrogramas correspondentes aos meses de Fevereiro, Março e Abril.

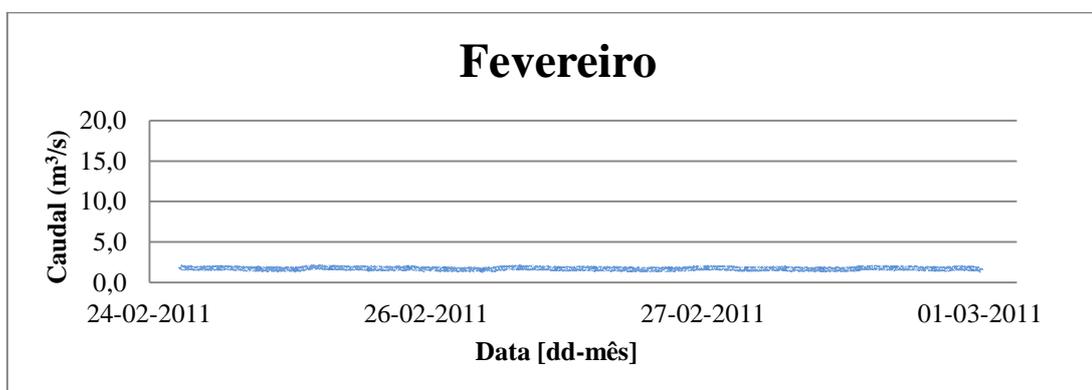


Figura 39 – Hidrograma do mês de Fevereiro

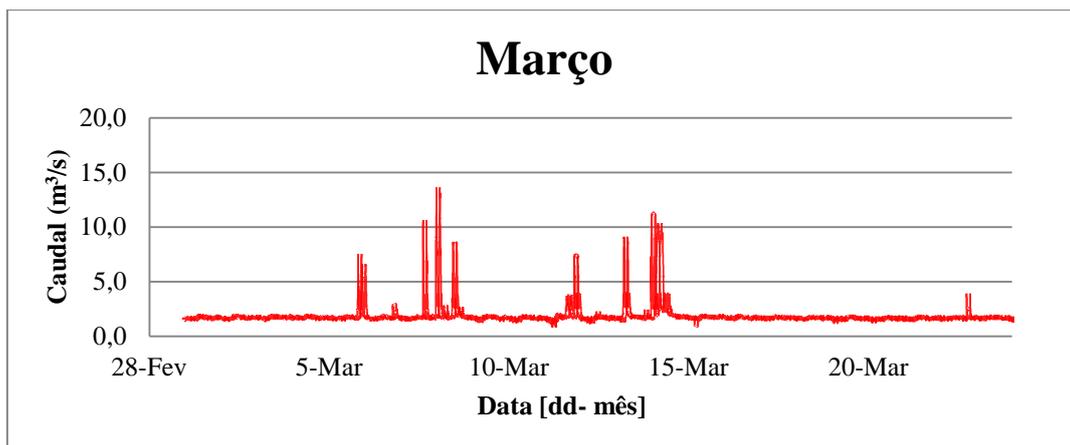


Figura 40 – Hidrograma do mês de Março

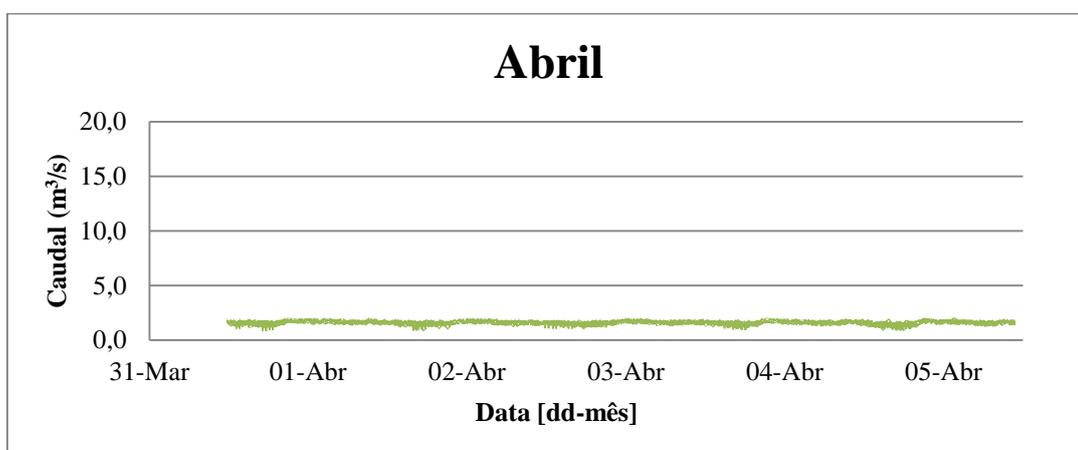


Figura 41 – Hidrograma do mês de Abril.

Como se pode verificar, apenas no mês de Março se regista situações de cheia correspondendo os outros dois meses essencialmente à ocorrência do caudal de tempo seco (caudal de base).

5.2.2.2 Dados de Caudal em Tempo Seco e Húmido

A metodologia utilizada no tratamento de dados foi a seguinte

- 1- Separação dos dados de tempo Seco e Húmido
- 2- Construção de hidrograma padrão para o tempo seco
- 3- Análise dos registos de caudal em tempo de chuva
- 4- Aplicação da curva vazão para determinação dos picos de caudal não medidos pelo medidor de caudal.

O tratamento de dados iniciou-se pela sobreposição dos hidrogramas de Caudal e hietogramas de Precipitação (Figura 42). Esta análise permitiu identificar, de modo visual, os dias com evento de precipitação que provocaram aumentos de caudal e que serão utilizados para a calibração do modelo em tempo húmido.

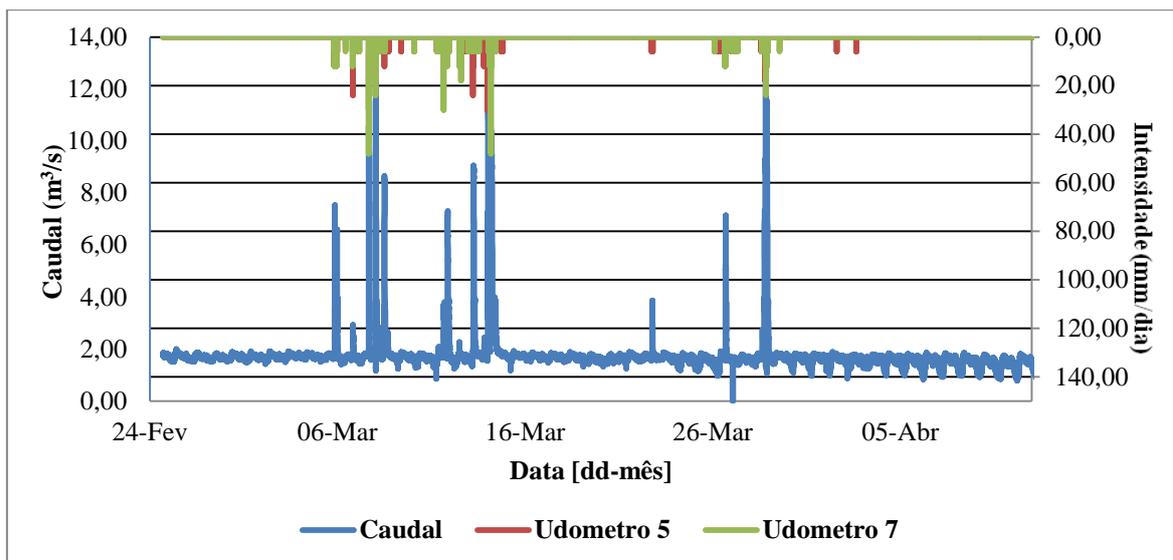


Figura 42 – Hidrograma e intensidade de 24 Fevereiro a 15 de Abril

Foi feita a separação dos dados dia a dia e um respectivo hidrograma de caudal escoado e precipitação (Figura 43), referentes a todos os dias do estudo.

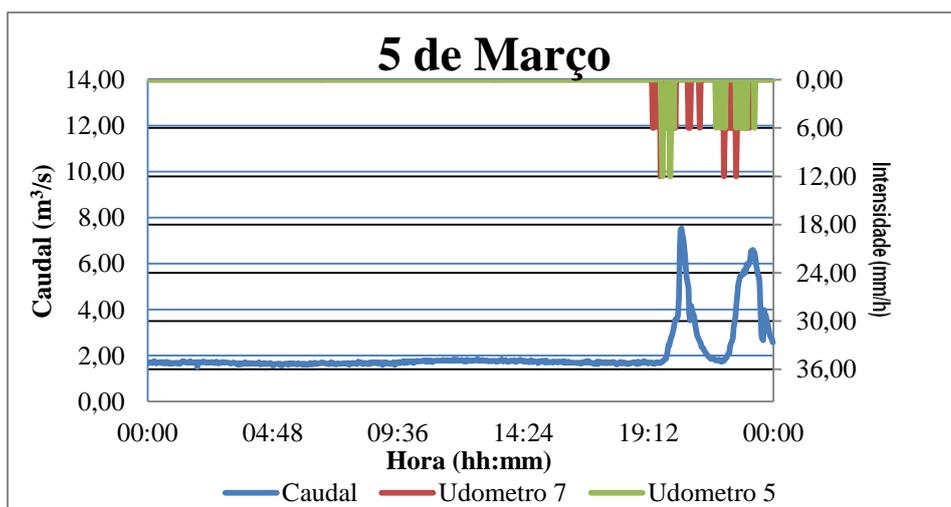


Figura 43 – Hidrograma, de 5 de Março, com a precipitação nos udógrafos 5 e 7.

Nos Quadros seguintes, para uma análise e diferenciação mais sucinta, é apresentado o caudal médio, o caudal de ponta e caudal mínimo registados no Flodar e a precipitação diária registada nos udógrafos U5 e U7, nos dias em estudo. Os dados de caudal de ponta, acima dos 13,0 m³/s, são valores estimados através duma curva de vazão apresentada mais a frente.

Quadro 16 – Análise Diária do caudal médio, caudal de ponta, caudal mínimo e precipitação, no mês de Fevereiro.

Dias	Caudal médio (m ³ /s)	Caudal de Ponta (m ³ /s)	Caudal Mínimo (m ³ /s)	Precipitação U7 (mm)	Precipitação U5 (mm)
24-Fev	1,759	1,903	1,668	0,00	0,00
25-Fev	1,727	2,041	1,463	0,00	0,00
26-Fev	1,692	1,877	1,491	0,00	0,00
27-Fev	1,674	1,865	1,476	0,00	0,00
28-Fev	1,700	1,915	1,454	0,00	0,00

Quadro 17 – Análise Diária do caudal médio, caudal de ponta, caudal mínimo e precipitação, no mês de Março

Dias	Caudal médio (m ³ /s)	Caudal de Ponta (m ³ /s)	Caudal Mínimo (m ³ /s)	Precipitação U7 (mm)	Precipitação U5 (mm)
01-Mar	1,692	1,922	1,458	0,00	0,00
02-Mar	1,701	1,928	1,414	0,00	0,00
03-Mar	1,735	1,938	1,498	0,00	0,00
04-Mar	1,737	1,893	1,517	0,00	0,00
05-Mar	2,045	7,543	1,505	2,80	2,80
06-Mar	1,725	2,944	1,384	7,20	4,00
07-Mar	1,912	10,657	1,406	3,40	2,80
08-Mar	2,559	13,638	0,975	7,40	12,20
09-Mar	1,704	1,911	1,234	0,00	0,20
10-Mar	1,662	1,881	1,234	0,40	0,00
11-Mar	2,115	7,334	0,839	11,00	6,20
12-Mar	1,656	2,291	1,171	3,80	2,20
13-Mar	2,100	9,125	1,293	4,20	8,40
14-Mar	3,147	11,238	1,674	21,60	19,00
15-Mar	1,742	1,938	1,401	0,00	0,00
16-Mar	1,717	1,881	1,487	0,00	0,00
17-Mar	1,701	1,858	1,397	0,00	0,00
18-Mar	1,690	1,895	1,452	0,00	0,00
19-Mar	1,634	1,823	1,158	0,00	0,00
20-Mar	1,609	1,822	1,207	0,00	0,00
21-Mar	1,650	1,891	1,338	0,00	0,00
22-Mar	1,722	3,931	1,423	0,00	0,80
23-Mar	1,693	1,892	1,460	0,00	0,00
24-Mar	1,624	1,865	1,044	0,00	0,00
25-Mar	1,592	1,860	0,864	0,00	0,00
26-Mar	1,719	7,154	0,827	3,40	2,60
27-Mar	1,618	1,793	1,340	1,00	0,60
28-Mar	3,160	15,919	0,990	14,40	14,40
29-Mar	1,706	1,862	1,363	0,20	0,40
30-Mar	1,657	1,839	0,863	0,00	0,00
31-Mar	1,647	1,853	0,962	0,00	0,00

Quadro 18 – Análise Diária do caudal médio, cauda de ponta, caudal mínimo e precipitação, no mês de Abril

Dias	Caudal médio (m ³ /s)	Caudal de Ponta (m ³ /s)	Caudal Mínimo (m ³ /s)	Precipitação U7 (mm)	Precipitação U5 (mm)
01-Abr	1,642	1,899	0,820	0,00	0,00
02-Abr	1,609	1,805	0,873	0,00	0,00
03-Abr	1,600	1,812	1,058	0,00	0,00
04-Abr	1,604	1,865	0,908	0,00	0,00
05-Abr	1,570	1,831	0,894	0,00	0,00
06-Abr	1,536	1,867	0,836	0,00	0,00
07-Abr	1,519	1,874	0,835	0,00	0,00
08-Abr	1,504	1,863	0,924	0,00	0,00
09-Abr	1,473	1,806	0,846	0,00	0,00
10-Abr	1,400	1,768	0,833	0,00	0,00
11-Abr	1,442	1,837	0,766	0,00	0,00
12-Abr	1,460	1,799	0,805	0,00	0,00
13-Abr	1,468	1,795	0,791	0,00	0,00
14-Abr	1,398	1,795	0,804	0,00	0,00
15-Abr	1,376	1,835	0,768	0,00	0,00

Após a separação dos meses, pretendeu -se estimar o hidrograma base de caudal em tempo seco (Figura 44) e efectuar uma comparação com o já implementado no modelo antigo.



Figura 44 – Caneiro de Alcântara, escoamento de águas residuais em tempo seco.

Fonte: SIMTEJO

Iniciou-se, então, esta etapa com a separação entre os dias sem precipitação e os dias com precipitação, conforme indicado nos Quadros 19 e 20. Foi, posteriormente, feita uma distinção entre os dias de semana e os de fim-de-semana, com a finalidade de criar dois hidrogramas de Caudal característico.

Quadro 19 – Dias sem ocorrência de precipitação

Dias de Semana	24-Fev	25-Fev	28-Fev	01-Mar	02-Mar	03-Mar	04-Mar
	15-Mar	16-Mar	17-Mar	18-Mar	21-Mar	23-Mar	24-Mar
	25-Mar	30-Mar	31-Mar	01-Abr	04-Abr	05-Abr	06-Abr
	07-Abr	08-Abr	11-Abr	12-Abr	13-Abr	14-Abr	15-Abr
Fim-de-Semana	26-Fev	27-Fev	19-Mar	20-Mar	03-Abr	09-Abr	10-Abr

Quadro 20 – Dias com ocorrência de precipitação

Dias de Semana	07-Mar	08-Mar	09-Mar	10-Mar	11-Mar	14-Mar	22-Mar
	28-Mar	29-Mar					
Fim-de-Semana	05-Mar	06-Mar	12-Mar	13-Mar	26-Mar	27-Mar	02-Abr

Foram excluídos os dias com precipitação e os dias 24 de Fevereiro e 15 de Abril que correspondem ao primeiro e último dia de campanha o que implica não existirem dados de caudal do dia inteiro. Foi feita uma análise dos dias de tempo seco relevantes para um hidrograma do caudal doméstico de semana e fim-de-semana.

Numa primeira fase, foram utilizados os dados de todos os dias em tempo seco sem qualquer execução, fazendo uma média do valor de caudal, nos mesmos períodos ao longo do dia, como exemplificado no Quadro 21, o que permitiu criar o respectivo hidrograma de caudais Figura 45.

Quadro 21 – Exemplo de valores de caudal em m³/s dos, dias de semana e a sua média, nos instantes.

Horas/Dias [m ³ /s]	25- Fev	28- Fev	01- Mar	02- Mar	03- Mar	04- Mar	15- Mar	16- Mar	Caudal médio 1 ^a Fase
00:00	1,732	1,644	1,633	1,603	1,660	1,746	1,755	1,713	1,603
01:00	1,656	1,618	1,658	1,694	1,657	1,768	1,716	1,740	1,557
02:00	1,676	1,669	1,655	1,639	1,680	1,720	1,713	1,712	1,555
03:00	1,655	1,594	1,601	1,590	1,721	1,702	1,701	1,682	1,494
04:00	1,647	1,582	1,633	1,625	1,684	1,733	1,594	1,686	1,436
05:00	1,639	1,667	1,607	1,593	1,590	1,693	1,696	1,684	1,403
06:00	1,618	1,580	1,605	1,646	1,659	1,678	1,603	1,657	1,429
07:00	1,568	1,610	1,642	1,671	1,672	1,669	1,627	1,622	1,454
08:00	1,721	1,666	1,663	1,676	1,756	1,742	1,740	1,635	1,608
09:00	1,868	1,843	1,861	1,876	1,911	1,833	1,865	1,875	1,811
10:00	1,861	1,823	1,818	1,835	1,842	1,814	1,885	1,816	1,784
11:00	1,871	1,848	1,772	1,825	1,835	1,811	1,784	1,751	1,744
12:00	1,880	1,795	1,769	1,806	1,747	1,803	1,787	1,778	1,734
13:00	1,820	1,753	1,729	1,755	1,727	1,751	1,787	1,794	1,704
14:00	1,776	1,731	1,706	1,752	1,773	1,712	1,799	1,744	1,696
15:00	1,803	1,795	1,748	1,747	1,788	1,788	1,814	1,800	1,716
16:00	1,735	1,735	1,660	1,708	1,714	1,761	1,761	1,689	1,672
17:00	1,715	1,682	1,704	1,679	1,713	1,703	1,763	1,708	1,628
18:00	1,744	1,701	1,586	1,629	1,716	1,644	1,735	1,671	1,584
19:00	1,733	1,670	1,637	1,656	1,703	1,715	1,675	1,677	1,592
20:00	1,735	1,719	1,691	1,670	1,739	1,736	1,784	1,724	1,643
21:00	1,691	1,760	1,736	1,753	1,758	1,768	1,763	1,723	1,692
22:00	1,755	1,755	1,755	1,739	1,777	1,723	1,785	1,781	1,688
23:00	1,684	1,691	1,657	1,652	1,792	1,630	1,764	1,695	1,625

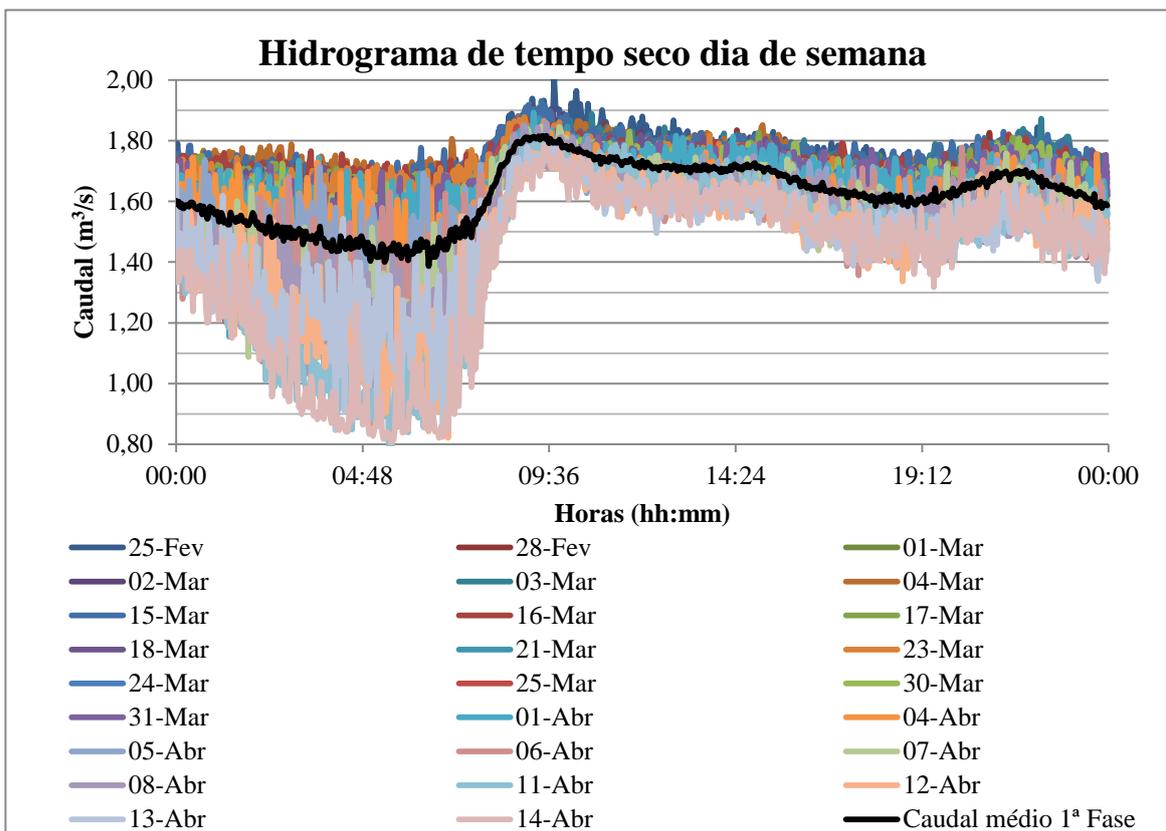


Figura 45 – Hidrogramas de tempo seco

Por observação directa dos registos de caudal verificou-se que, pelo menos, nos 3 dias após os eventos de precipitação, o Caneiro ainda tem caudal pluvial correspondente ao escoamento retido nas bacias. Verificou-se, recorrendo aos Quadros 16, 17 e 18, que no caudal médio de cada dia, nas duas últimas semanas continua a descer, visto que, o último evento, considerável, foi no dia 29 de Março. De forma a não haver influência de caudais de infiltração foram seleccionados apenas os dias que estão no Quadro 22, que originou um novo hidrograma (Figura 46) a que se designou hidrograma de 2ª fase.

Quadro 22 – Dias semana escolhidos para o hidrograma de Caudal Doméstico

05-Abr	06-Abr	07-Abr	08-Abr	11-Abr	12-Abr	13-Abr	14-Abr
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

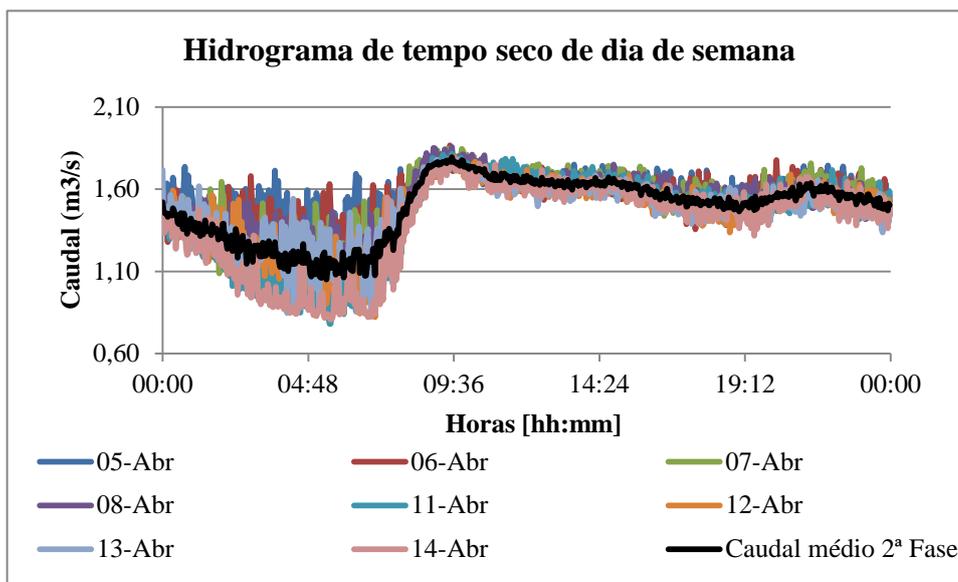


Figura 46 – Hidrograma de tempo seco dos Dias de Semana.

Ao comparar os resultados dos hidrogramas de 1ª fase e 2ª fase (Figura 47) é possível concluir que o caudal médio de 2ª fase é consideravelmente mais baixo e que deve estar mais próximo da realidade, uma vez que o de 1ª fase apresenta dias com caudal resultante da infiltração no solo com posterior drenagem retardada para a linha de água (caneiro).

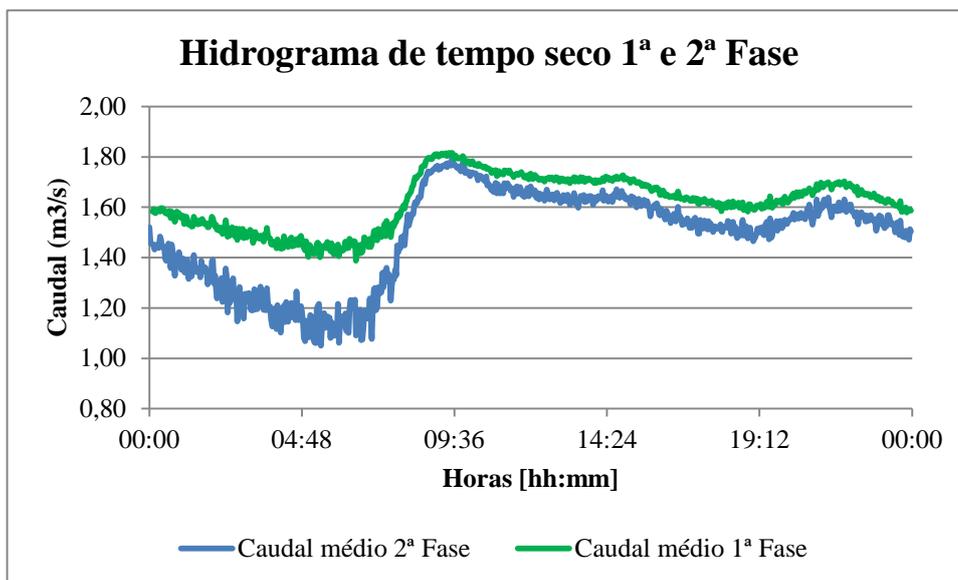


Figura 47 – Comparação dos Hidrogramas dos caudais médios, 1ª fase e 2ª Fase.

A execução do hidrograma de caudal dos dias de fim-de-semana passou, tal como para os dias de semana, por duas fases. Por haver um menor número de dias para análise referente aos fins-de-semana, na 1ª fase foram seleccionados todos os dias de fins-de-semana sem ocorrência de precipitação e na 2ª fase foram seleccionados apenas 2 dias, pela mesma razão apresentada na análise dos dias de semana (Quadro 23).

Quadro 23 – Dias de Fim-de-Semana escolhidos para as duas fases de estudo.

1ª Fase	26-Fev	27-Fev	19-Mar	20-Mar	03-Abr	09-Abr	10-Abr
2ª Fase	09-Abr	10-Abr					

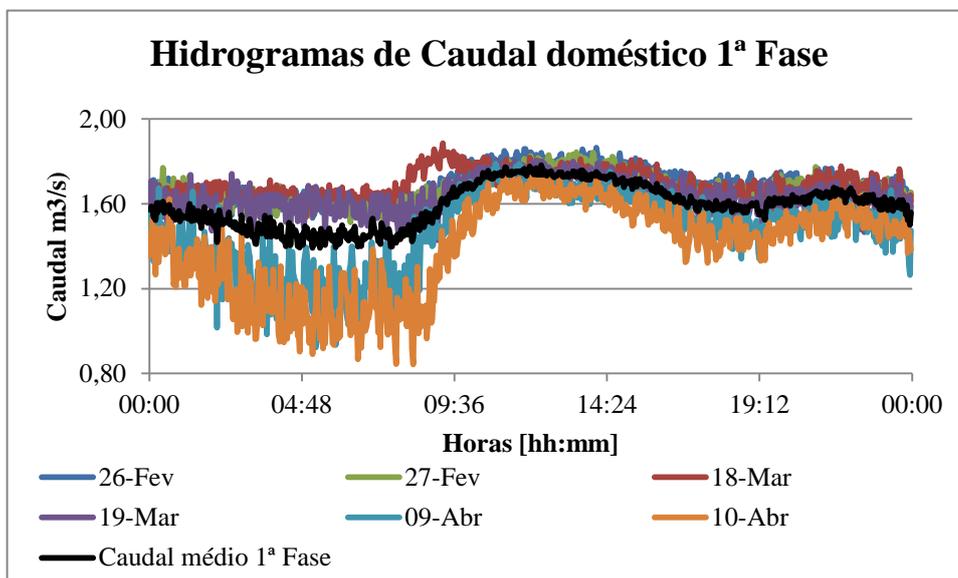


Figura 48 – Hidrogramas de Fim-de-Semana 1ª Fase.

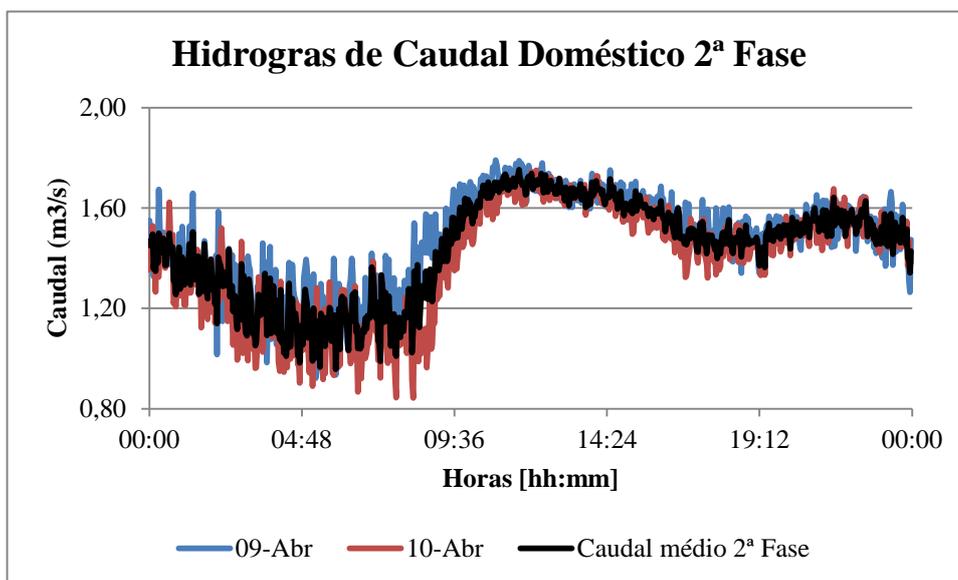


Figura 49 – Hidrogramas de Fim-de-Semana 1ª Fase.

Recorrendo ao mesmo tipo de análise relativa aos dias de semana, pode ser verificado que o caudal médio de 2ª fase é mais baixo pelas razões descritas anteriormente (Figura 50).

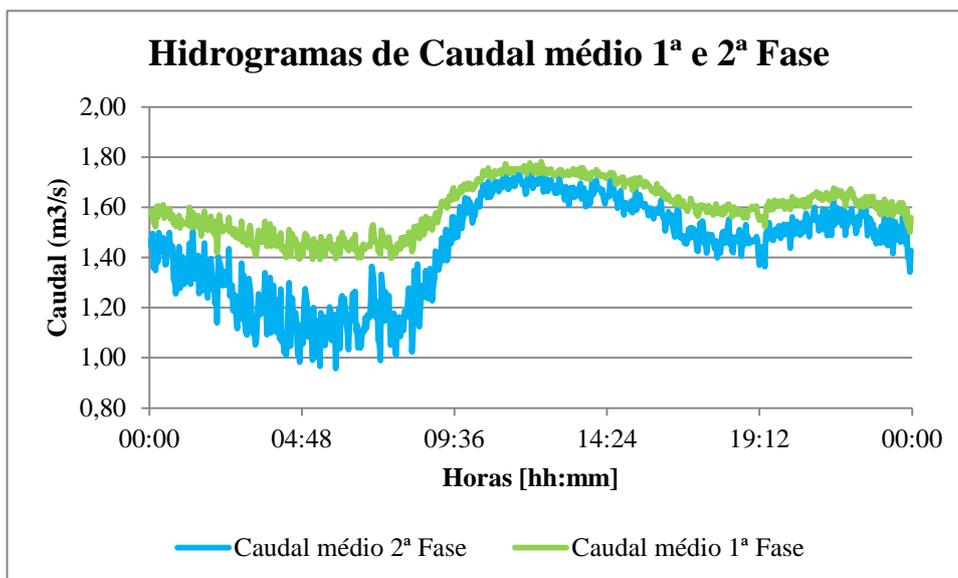


Figura 50 – Comparação dos Hidrogramas de Fim-de-Semana, 1ª e 2ª Fase.

O objectivo da determinação do caudal doméstico serve em primeiro lugar para inserir como dado de base do caudal de tempo seco no modelo. Em segundo lugar pretende-se também averiguar a adequação do anterior hidrograma caudal doméstico inserido no anterior estudo (modelo SWMM). Na Figura 51, pode verificar-se que o hidrograma de caudal utilizado no estudo anterior, está consideravelmente abaixo dos novos hidrogramas calculados.

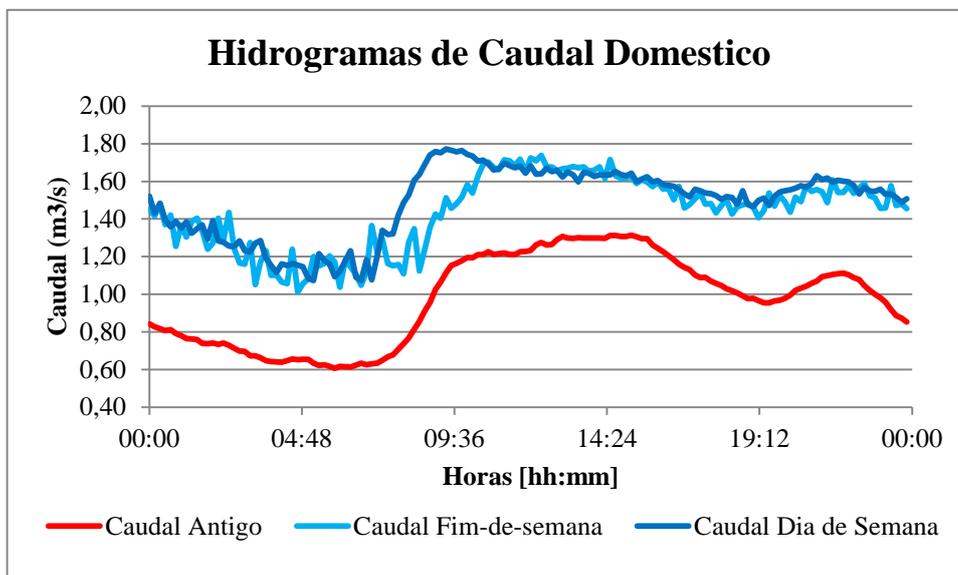


Figura 51 – Comparação do Hidrogramas Dias de Semana, Fim-de-Semana e Caudal Antigo.

A título de curiosidade, através da análise dos hidrogramas é possível verificar que os picos de caudal ocorrem de manhã, à hora do almoço e à hora de jantar. De realçar ainda que, o maior pico nos dias de semana ocorre sempre de manhã, entre as 8 e as 9 horas, e para os dias de fim-de-semana o pico de ponta de caudal ocorre no período da manhã mas mais tarde, entre as 11 e as 13 horas.

Tal como já referido, o medidor de caudal instalado na secção de referência do presente estudo apenas possibilita de modo correcto a medição de caudais inferiores a 13,0 m³/s. Durante o período de estudo verificaram-se no entanto ocasiões em que tal valor foi excedido.

Assim, optou-se por utilizar uma equação de vazão genérica na secção de estudo com base num coeficiente de vazão extrapolado a partir da relação caudal vs. altura do escoamento observada para valores de caudal inferiores a 13,0 m³/s. A equação de vazão simplificada utilizada toma a seguinte forma:

$$Q = C(h) \sqrt{2gh} \quad (23)$$

Em que C é o coeficiente de vazão aproximado por uma função de regressão aplicada aos dados de caudal inferior ao limite do medidor de caudal, g é a aceleração gravítica e h a altura do escoamento. A equação de regressão que permite relacionar o coeficiente de vazão com a altura do escoamento é a seguinte:

$$C h = -12,913h^2 + 24,644h - 7,8599 \quad (24)$$

A Figura 52 apresenta o gráfico da curva de vazão. Os valores a azul são os valores originais medidos pelo medidor de caudal e os valores a vermelho são os valores corrigidos com recurso à extrapolação da curva de vazão a partir de caudais menores.

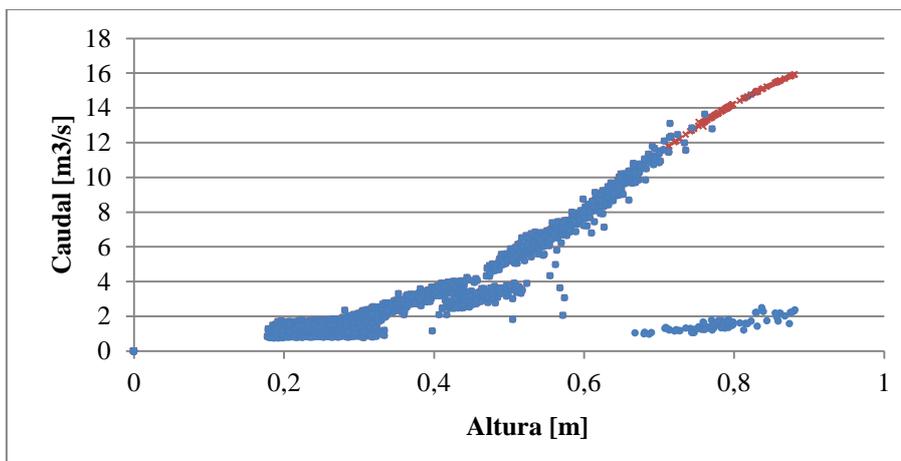


Figura 52 – Curva de vazão.

5.2.3 Introdução de dados no modelo

Foi introduzido um novo hidrograma de caudal doméstico em tempo seco e descrita no item anterior. Esta “time serie” vai ter a sua descarga no primeiro nó do modelo a montante do medidor, mais precisamente no nó 08J003, como se pode verificar na Figura 54.

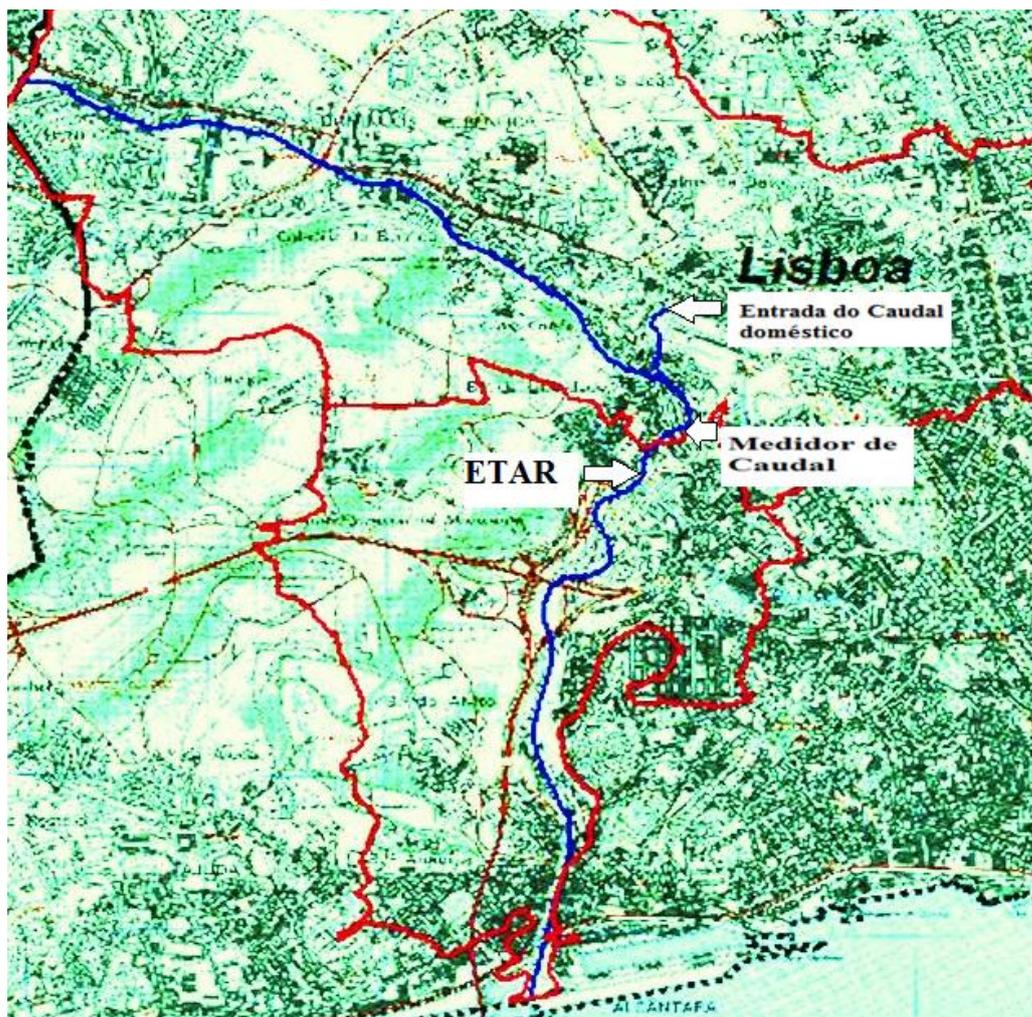


Figura 53 – Condições de Fronteira.

Foram localizados espacialmente no modelo os dois udómetros (Rain Gage) pertencentes à rede de udómetros da SIMTEJO e utilizados neste estudo. Para os dados de precipitação, foram inseridas outras “time serie” denominadas de U5 e U7, correspondente aos registos de intensidade dos udómetros.

A localização das Rain Gages, foi feita através das seguintes coordenadas:

- U5 (Bombeiros da Pontinha) – coordenada X: -93482.78; coordenada Y: -98661.63
- U7 (ETAR de Chelas) – coordenada X -85611.59; coordenada Y-103476.88

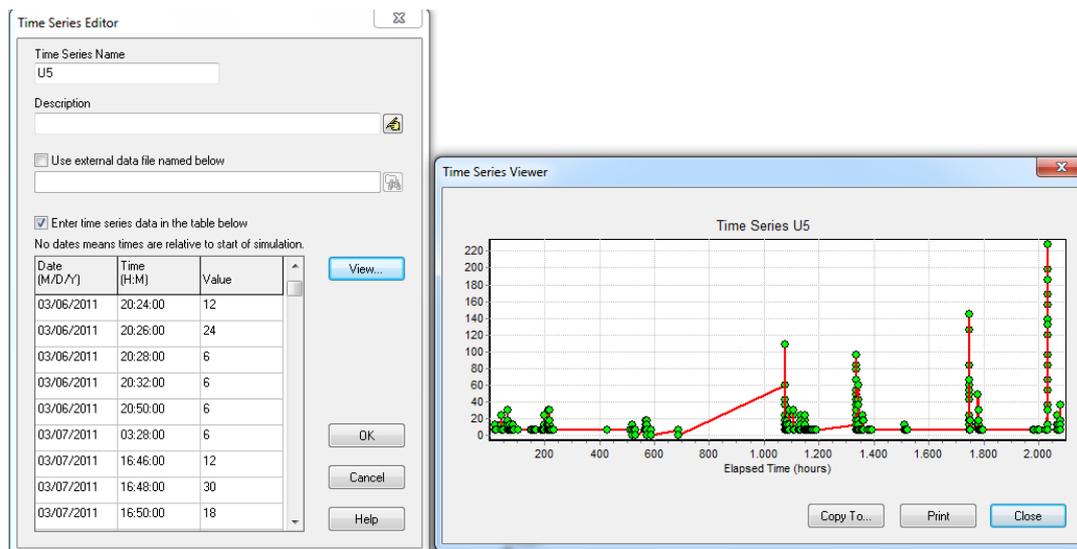


Figura 54 – Exemplo da Time serie de precipitação aplicada a um udómetro.

5.3 Calibração

O processo de calibração, tal como nos anteriores estudos (MOUSE E SWMM) recorreu aos mesmos critérios ou seja, às diferenças volumétricas entre os valores de escoamento medidos e simulados, à diferença entre caudais de ponta medidos e simulados, e à forma do hidrograma.

Os erros volumétricos e de pico do hidrograma são calculados de acordo com as expressões 21 e 22.

Os critérios de aceitação dos resultados da simulação consideram os seguintes intervalos, respectivamente para o volume e para o caudal de ponta:

Erro volumétrico: [-10%; +20%]

Erro no caudal de ponta: [-15%; 25%]

Da mesma forma que nos anteriores estudos, foram aceites alguns valores fora destes intervalos, tendo em conta as simplificações efectuadas. O modelo foi calibrado para que os erros volumétricos estivessem dentro do intervalo de valores aceitáveis, atribuindo menor peso aos erros de pico, pois o medidor de caudal menos fiável para caudais elevados.

Para os parâmetros de calibração, para além de usar as características das bacias tal como, a largura média (Width), o inclinação (Slope) e a percentagem de área impermeável (impervious), também foram testados dois modelos de infiltração, nomeadamente o, modelo Horton e o modelo de Curve Number, tendo o último dado uma resposta mais adequada aos resultados obtidos no estudo.

Efectuou-se uma análise de sensibilidade aos diversos parâmetros e verificou-se que ao alterarem-se os parâmetros das bacias, originam-se diferentes tipos de mudanças no comportamento do modelo hidrológico. Para o parâmetro da largura média da bacia, um aumento do valor vai provocar um aumento de volume e de pico de caudal. A inclinação é um parâmetro que está directamente relacionado com a velocidade de escoamento e com os

picos de caudal, pois quanto maior for a inclinação maior é a velocidade. A impermeabilidade do solo está directamente relacionada com o volume de água, porque quanto maior a infiltração menor é o caudal directo que aflui ao sistema de drenagem, ou seja, quanto menor a infiltração maior será o caudal directo de água pluvial afluyente à linha de água.

No anterior modelo foi utilizado o módulo RDII que permite reproduzir o comportamento do escoamento indirecto retardado proveniente de infiltração. Neste estudo, e com base nos novos registos de caudal, não houve necessidade de recorrer a este módulo.

6 Resultados

6.1 Considerações gerais

A calibração e validação do Modelo Matemático do Caneiro de Alcântara, tem especial ênfase na calibração de toda a zona a montante do medidor de caudal dando maior relevância à bacia “a montante”, por esta ter a maior área de influência sobre caneiro, às outras três bacias (07J001C, 08J003C e 08J001C), de menor dimensão, como se pode verificar na Figura seguinte.

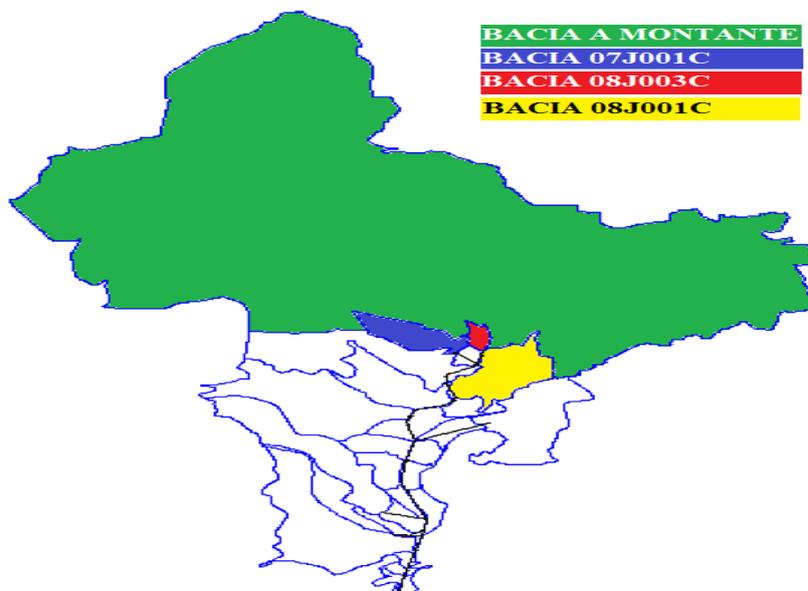


Figura 55 – Diferenciação das bacias a montante do medidor de caudal.

No processo de calibração, fez-se uma análise das 4 bacias, tendo-se verificado que a Bacia Montante era a única que tinha influência significativa nas simulações efectuadas. No Quadro 24 apresentam-se os parâmetros que, após inúmeras ponderações, se revelaram mais adaptados para a calibração do modelo.

Quadro 24 – Características da bacia “a montante”.

Características	Bacia a Montante
Área (ha)	2717
Largura média (m)	4000
Inclinação (%)	15
Impemeabilidade (%)	40

O modelo de infiltração, também foi alterado passando do modelo Horton para o SCS – Curve Number.

O estudo teve como alvo de análise o comportamento da bacia do caneiro de Alcântara em tempo de chuva tentando reproduzir o volume de água e os valores dos caudais de ponta para diferentes eventos. No período dos dados analisados, entre 24 de Fevereiro a 15 de Abril de

2011, foram analisados 3 períodos distintos com ocorrência de diferentes eventos de precipitação, no mês de Março:

- O primeiro período, desde dia 5 Março até 9 Março, com 5 picos de avaliação (utilizado para calibração).
- O segundo período, de 11 Março até 15 de Março, com 4 picos (utilizado para calibração).
- O terceiro, e último período, de 22 Março a 28 de Março, com, apenas, 3 picos (utilizado para validação).

O objectivo deste estudo foi alcançado ao fim de vários testes de simulação no modelo. Em cada teste efectuado alteraram-se um ou mais parâmetros. Nos seguintes subcapítulos, estão apresentados os resultados de cinco testes, em que do primeiro para segundo tinha interesse diminuir o volume, que foi alcançado com a redução da largura média da bacia a montante e aumentando, ligeiramente, a inclinação. Do segundo teste para o terceiro não se mudaram quaisquer parâmetros, apenas se trocou o modelo Curve Number pelo Horton, no que diz respeito a modelo de infiltração no solo. Da terceira para a quarta simulação chegou-se aos resultados mais aceitáveis, apenas com o ajuste da inclinação. No último teste, aumentou-se a impermeabilidade, o que se traduziu em resultados nada satisfatórios, comparando com o teste anterior.

Em conclusão o quarto teste, foi o mais satisfatório.

6.2 Apresentação de resultados

Efectuou-se a calibração do modelo com base nos primeiros períodos de registos.

Os valores dos erros do caudal de ponta, do volume de escoamento e o volume total, entre os hidrogramas medidos e simulados, obtidos para os diferentes eventos, encontram-se apresentados nos Quadros 25 e 26. Encontram-se assinalados a vermelho os valores que estão fora dos critérios estabelecidos.

Quadro 25 – Erros de simulação para o 1º período de registos.

1º Período						
Erros (%)	Volume	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 4	Pico 5
Teste 1	-30,9	-75,5	-42,0	-155,2	-75,9	-119,5
Teste 2	-23,16	-39,44	-10,68	-122,45	-38,75	-77,54
Teste 3	-1,87	-36,78	-2,05	-112,21	-25,53	-44,97
Teste 4	-1,86	8,3	16,0	-46,4	9,9	-15,4
Teste 5	-10,53	76,65	52,61	-11,22	36,08	1,58

Quadro 26 – Erros de simulação para o 2º período de registos.

2º Período					
Erros (%)	Volume	Pico 6	Pico 7	Pico 8	Pico 9
Teste 1	-51,6	-61,9	-149,7	-284,1	-87,0
Teste 2	-44,69	-30,15	-86,81	-203,26	-59,80
Teste 3	-7,77	-10,88	-62,08	-163,93	3,10
Teste 4	-7,76	4,0	-41,1	-91,3	10,1
Teste 5	-25,99	5,12	-12,72	-54,92	-12,89

Os hidrogramas medidos e simulados, do teste 1 e teste 4, são apresentados nas figuras a seguir, separadamente para os períodos entre 5 e 9 de Março (Figuras 56 e 57) e entre 11 e 15 de Março (Figuras 58 e 59).

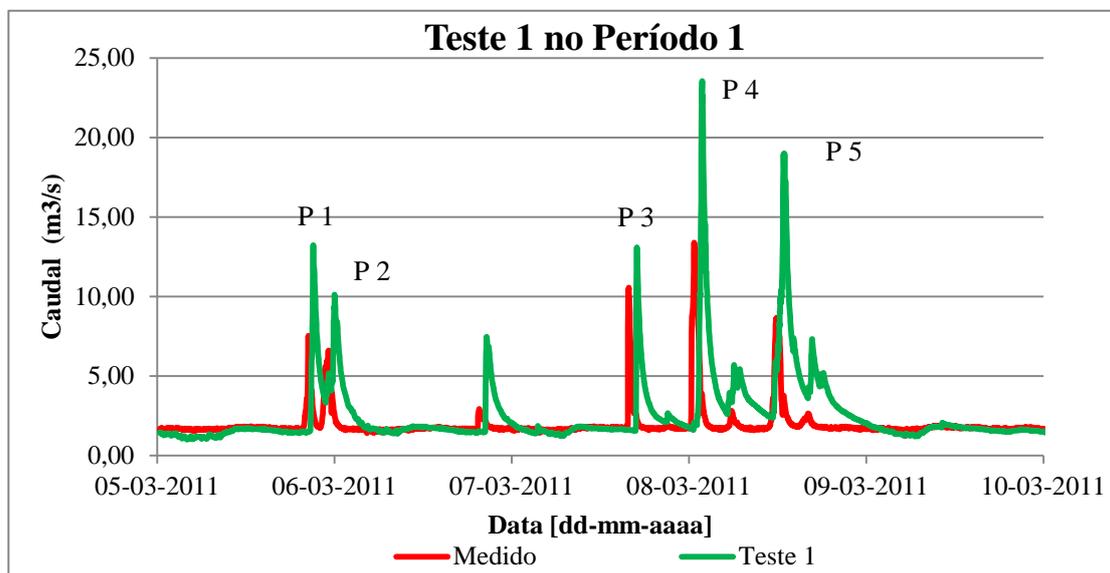


Figura 56 – Resultados da simulação do teste 1 no período entre 5 e 9 de Março.

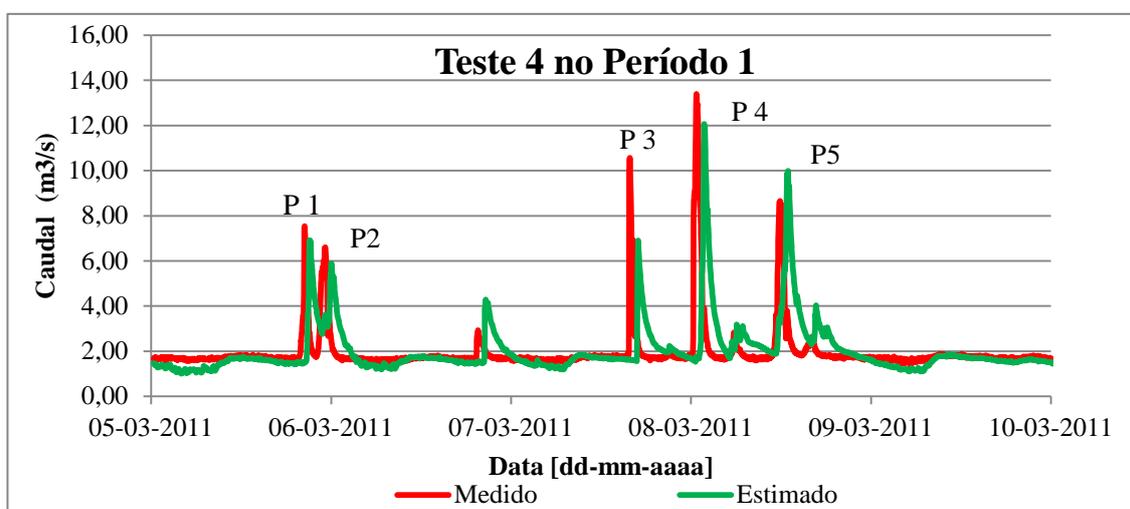


Figura 57 – Resultados da simulação do teste 4 no período entre 5 e 9 de Março.

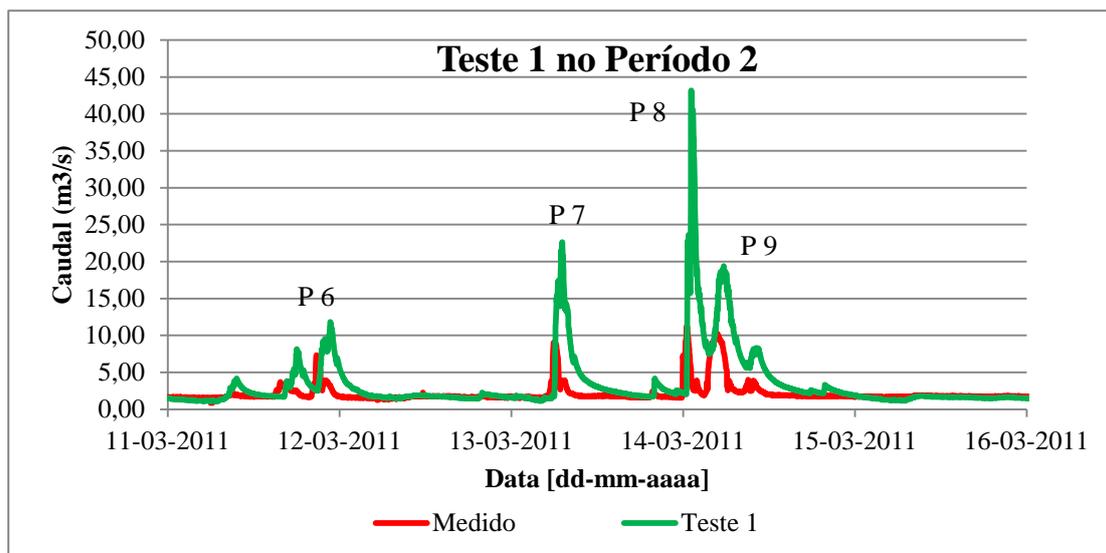


Figura 58 – Resultados da simulação teste 1 no período entre 11 e 15 de Março.

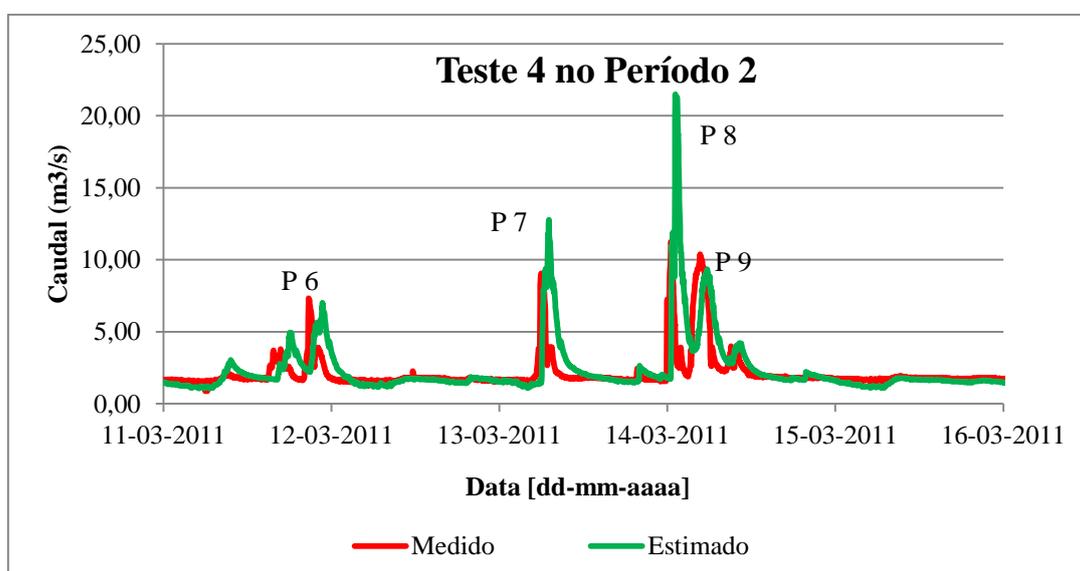


Figura 59 – Resultados da simulação do teste 4 no período entre 11 e 15 de Março.

Após o ajuste dos parâmetros das bacias na calibração aplicou-se o modelo para o terceiro período de dados entre 22 e 28 de Março para verificação do modelo. Este passo efectuou-se sem alterar qualquer parâmetro. Os resultados apresentam-se no Quadro 27.

Quadro 27 – Erros de simulação para o 3º período de registos.

3º Período				
Erros (%)	Volume	Pico 10	Pico 11	Pico 12
Teste 4	5,37	42,8	34,3	18,0

Apesar dos erros de pico se encontrarem fora do intervalo de aceitação, o erro de volume é pequeno. Como já foi referido anteriormente, durante a campanha experimental o medidor de caudal Flodar apresentava uma limitação no registo de velocidade de 6,0 m/s, o que

impossibilitou o registo de caudais acima de 13 m³/s. Uma vez que esta limitação foi suspeitada com o recurso ao método de curva de vazão, o erro associado aos picos de caudal poderá ser também devido a aplicação deste método e não só da dificuldade do modelo em representar os picos.

A comparação entre os hidrogramas medido e estimados resultantes da verificação, para o período entre 22 de Março e 28 de Março (Período 3), apresenta-se na Figura 60 para o teste 4.

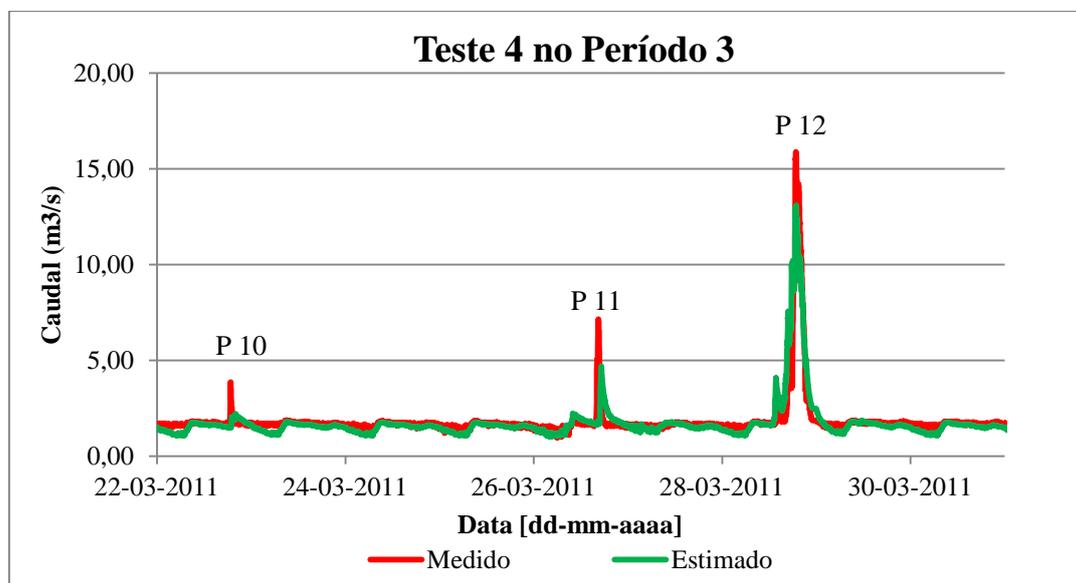


Figura 60 – Resultados da simulação do teste 4 no período 3.

6.3 Discussão

Foram necessárias diversas simulações nas quais foram sendo alterados os parâmetros da bacia a montante até serem obtidos resultados aceitáveis para o modelo. Desta forma, foram obtidos no teste 4 os resultados finais da calibração com um erro de volume aceitável para os períodos em análise, como se pode verificar no Quadro 28.

Quadro 28 – Erros de volume obtidos no teste 4.

Teste 4	Erros de Volume [%]
1º Período	-1,86
2º Período	-7,76

Apesar de alguns dos picos se encontrarem fora do intervalo de aceitação (Quadro 29), considerou-se que o modelo tinha o melhor ajuste possível para as medições disponíveis. A simplificação do modelo, transformando grande parte da rede e sub-bacias associadas numa única bacia de aproximadamente 2700 ha, implica uma maior dificuldade na calibração do modelo, nomeadamente nos seus picos. Além da simplificação do modelo, existia a limitação do medidor de caudal que apenas registava caudais até 13 m³/s. O recurso ao método da curva de vazão para ultrapassar esta limitação poderá também implicar um maior desfasamento entre os picos calculados e modelados.

Quadro 29 – Erros de pico do teste 4.

Erros de Pico [%]					
1º Período	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 4	Pico 5
	8,3	16	-46,4	9,9	-15,4
2º Período	Pico 6	Pico 7	Pico 8	Pico 9	-
	4	-41,1	-91,3	10,1	-

Após efectuado o ajuste dos parâmetros e consequentemente com bons resultados de calibração, efectuou-se a simulação do modelo com o terceiro período de registos de caudal. Apesar de não terem sido respeitados os erros de pico, estes foram considerados aceitáveis e validos devido aos valores obtidos no erro de volume (Quadro 30).

Quadro 30 – Erros de simulação para o 3º período de registos para o teste 4.

Erros [%]				
3º Período	Volume	Pico 10	Pico 11	Pico 12
	5,37	42,8	34,3	18,0

Comparando os resultados obtidos do modelo calibrado neste estudo, com os dos estudos anteriores, comprovou-se que houve uma melhoria significativa nos resultados (Quadro 31).

Quadro 31 – Erros de volume obtidos para o modelo em programa SWMM (2007 e 2011) e programa MOUSE.

Programa	MOUSE	SWMM 2007	SWMM 2011
Erro de Volume médio [%]	14,67	24,67	4,94

Apesar dos valores aceitáveis já demonstrados pelos erros de calibração e verificação, recomenda-se que o modelo seja novamente confrontado com novas medições de caudal, nomeadamente após ter sido corrigida a limitação de leituras de caudal superiores a 13 m³/s. Deverá ser feita uma nova tentativa de ajuste do modelo.

7 Conclusão e Propostas de desenvolvimento futuros

7.1 Conclusão

Os objectivos do presente trabalho consistiram na calibração e validação do modelo matemático do Caneiro de Alcântara, construído num estudo anterior, com base em novos registos de caudal.

Para os diferentes períodos analisados, obteve-se um bom ajustamento entre os hidrogramas simulados e medidos, nomeadamente no que respeita ao volume gerado, pois, contrariamente aos estudos anteriores (MOUSE e SWMM), os erros de volume são bastante satisfatórios no actual modelo. Os parâmetros da bacia montante foram alterados originando resultados com erros mínimos na ordem dos 5%. Os parâmetros mais significativos para os resultados de volume foram a largura média, a qual foi reduzida para metade do valor usado nos estudos anteriores e a impermeabilidade que passou de 100% para 40%,

Nos resultados obtidos, no que diz respeito aos caudais de ponta, os erros são superiores, mas podem estar agravados devido a uma menor precisão do medidor de caudal, quando os níveis de água são mais altos e as velocidades muito elevadas. Em novos estudos, a realizar no futuro, dever-se-á procurar aferir as medições, em situação de grandes caudais, eventualmente com a colocação em série de um outro medidor, eventualmente localizado a jusante do inicial, no descarregador existente junto da ETAR. Actualmente, após este estudo, foi aumentada a gama de registos de velocidade atingindo já valores de 83 m³/s e velocidades de 9,9 m/s.

Os erros de pico de caudal variam bastante de simulação para simulação e de evento para evento, o que se revelou uma tarefa desafiante. Na verdade, o comportamento da bacia é diferente consoante a intensidade e duração do evento, o que conduz à necessidade de calibração e validação do modelo com os diferentes eventos de diferentes características. O modelo matemático deverá conseguir responder a estes diferentes eventos de uma forma satisfatória.

Pode concluir-se que o modelo está calibrado e validado para estimar volumes, contudo para previsão de picos de caudal a sua calibração ainda não está totalmente adequada, sendo necessária alguma reserva relativamente a este tipo de análise.

Adicionalmente, deve ter-se em conta que a simplificação contida na consideração de uma única bacia desta dimensão, cujo comportamento é simulado através de um modelo sem representação da rede de colectores, tem influência no tipo de resposta e, conseqüentemente, nos resultados da modelação, dificultando também a sua calibração.

Para a gestão da operação da ETAR de Alcântara, uma boa resposta do modelo matemático do Caneiro de Alcântara em termos do volume de água é mais importante do que para o caudal de ponta, uma vez que a actual capacidade da ETAR está limitada a 3,3 m³/s em tempo seco e 6,6 m³/s em tempo de chuva. Os grandes caudais que acabam por não entrar na ETAR são descarregados directamente para o rio Tejo, não tendo, portanto, influência na gestão dos órgãos e equipamentos da estação de tratamento. Uma mais adequada calibração do modelo, em termos dos caudais de ponta, será importante para a análise e combate às inundações da zona baixa de Alcântara, que por vezes ocorrem, quando grandes caudais são simultâneos com níveis elevados

de maré, assim como para análise de número de descargas que podem ocorrer anualmente, ou durante eventos de precipitação.

7.2 Propostas de desenvolvimento

Para apoio a gestão e operação da ETAR de Alcântara o modelo agora calibrado poderá ser utilizado, podendo utilizar-se as séries de precipitação verificadas nas região de Lisboa, nos últimos 20 anos, de modo a poder estimar quais as descargas, que se esperam que possam ocorrer anualmente, o respectivo tempo descarga, quais as estimativas dos volumes tratados anualmente, quais consumos de energias e reagentes expectáveis e quais volumes estimados de lamas produzidos ao longo do ano.

O modelo apresentado no presente trabalho poderá vir a ser utilizado com maior fiabilidade em outros trabalhos, como por exemplo o controlo de inundações, desde que seja calibrado e verificado com outras medições de campo.

Para melhorar os resultados de pico de caudal também é importante assegurar que o medidor de caudal funciona plenas condições, visto que para certos valores de ponta o medidor poderá não funcionar com a precisão adequada.

Para análises futuras da SIMTEJO relativamente a ocorrência de descargas para o meio receptor seria desejável colocar um medidor de caudal a jusante do descarregador no caneiro, ou numa alternativa menos dispendiosa, um medidor de nível na crista do descarregador, de forma a permitir um melhor ajuste do modelo, assim como identificar e quantificar ocorrências de descarga.

Bibliografia

BEVEN, K. Changing ideas in hydrology: the case of physically-based models. *J. Hydrology*, 105:157-172, 1989.

CARDOSO, M.A., PINHEIRO, I., DAVID, L., MATOS, R., ALMEIDA, M.C. (1996) “*Project SPRINT 98 (SP98) - Extension: Application of hydraulic analysis to sewerage rehabilitation in member states*”. Final Report. Relatório 285/96-NHS, LNEC, Lisboa.

CARDOSO, M.A., DAVID, M.C., ALMEIDA, M.C., DAVID, L. (2006) “*Modelação matemática da bacia do caneiro de Alcântara*”. Relatório Técnico 1, Parte 1, Relatório 382/2006 - NES, Lisboa.

CARDOSO, M.A., PINHEIRO, I., BERGET, S., DAVID, L., MATOS, R., ALMEIDA, M.C. (1997) “*Project SPRINT 98 (SP98). Extension: Application of hydraulic analysis to sewerage rehabilitation in member states*”. Report on Model building, verification and alternative solutions. Relatório 88/97-NHS, LNEC, Lisboa.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. e MAYS, L. W., 1988, *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Student Edition, Singapura.

COSTA, P.C., “*Revisão do Plano Geral de Esgotos da Cidade*”, Camara Municipal de Lisboa, Direcção Municipal de Infra-Estruturas e Saneamento, Departamento de Saneamento, Drena, Outubro 1999.

CORREIA, F. N., 1984 a), “*Proposta de um método para a determinação de caudais de cheia em pequenas bacias naturais e urbanas*”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, ICT, Informação Técnica. Hidráulica. ITH 6, Lisboa.

DAVID, L.M. (2005). “*Descargas de excedentes de sistemas de drenagem urbana*” – estudo referenciado em resultados experimentais obtidos em Portugal. Dissertação elaborada no LNEC para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, I.S.T./U.T.L., Setembro de 2005.

DAVID, M.C, CARDOSO, M.A., ALMEIDA, M.C., DAVID, L.. (2006) “*Modelação matemática da bacia do caneiro de Alcântara*”. Relatório Técnico 1, Parte 2, NES, Lisboa. (em impressão).NES, Lisboa

DAVID, M.C., CARDOSO, M.A., ALMEIDA, M.C., DAVID, L. (2007) “*Modelação matemática da bacia do caneiro de Alcântara*”. Relatório Técnico 2, (em impressão)- NES, Lisboa.

DAVID, M.C., (2004) “*Avaliação do desempenho técnico da bacia de drenagem urbana da Quinta do Borel- Concelho Amadora*”, Relatório de Estágio Formal da ordem dos Engenheiros, LNEC, DHA, NES, Lisboa.

ENGEL, B.A.; SRINIVASAN, R.; REWERTS, C.C. “*A spatial decision support system for modeling and managing agricultural non-point-source pollution*”. In: *Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. “Environmental modeling with GIS”*. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 20, p. 231-237

EPA (2010), *Storm Water Management Model – User’s Manual*. EPA/600/R-05/040

EPA (2006), *Urban Watershed Management Research*, U.S.EPA <http://www.epa.gov/ednrmr/ml/models/swmm/index.htm>, consultada em Dezembro 2006.

GARCIA, J.I.B., 2005, “Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da bacia Hidrográfica do Arroio Cancela”. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GOODCHILD, M.F. “*The state of GIS for environmental problem-solving.*” In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 2, p. 8-15

HUBER, W.C.; DICKINSON, R.E. *Storm Water Management Model: Version 4: User’s Manual*. Athens: U.S. Environmental Protect Agency. Georgia, 1992

HIS, (1994). “*The Wallingford Procedure*”. Training Course Notes.

LAMAS, José M. Ressano Garcia – *Morfologia Urbana e Desenho da Cidade*. 2ª Edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian / Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, 1993

LENCASTRE, A., FRANCO, F. (2003). “*Lições de Hidrologia*”. Fundação Armando Lencastre. Edição XXV.

LISBOA, C.M., 1940, “Projecto da Canalização da Ribeira de Alcântara.” Memória Descritiva

MAIDMENT, D. R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 14, p. 147-167.

MAIDMENT, D. R. (editor in chief), 1993, *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc., USA, p.5.1-5.51

MATOS, R.M., CARDOSO, M.A., ALMEIDA, M.C., DAVID, L.D. (1998). Alcântara Pilot Study. Apresentação do estudo piloto de Alcântara no CD – “*Applying the Wallingford Procedure in European Member States*”, Accompanying Measures for SPRINT SP098 Project.

MELLER, A., (2004), “*Simulação Hidrodinâmica Integrada de Sistema de Drenagem em Santa Maria-RS*”. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PONCE, V. M., (1989).” *Engineering Hydrology. Principles and practices.*” Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

PORTELA, M., M., 2006, Apontamentos da disciplina de “*Modelação Hidrológica*”, Instituto Superior Técnico, 2006.

RAWLS, W. J., AHUJA, L. R., BRAKENSIEK, D. L. e SHIRMOHAMMADI, A., 1993, “*Infiltration and soil water movement*”, in *Handbook of Hydrology*. Ed. David R. Maidment, McGraw-Hill, Inc., USA, p.5.1-5.51.

RENNÓ, C.R., SOARES, J.V. (2003); “*Conceitos básicos de modelagem hidrológica*”, Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial, Divisão de Processamento de Imagens (DPI), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil.

SHAW, E. M., 1984, *Hydrology in practice*. Van Nostrand Reinhold (UK). Co. Ltd., England.

SPRINGER, E. P., B. J. MCGURK, R. H. HAWKINS E G. B. COLTHARP, 1980, “*Curve number for watershed data*”. Proceedings, Symposium on Watershed Management. ASCE, Boise, Idaho, p. 938-950 (*).

VISSMAN, Jr. W. e LEWIS, G. L., 1996, “*Introduction to Hydrology*”, 4ª Edição, Harper Collins College Publishers, Nova Iorque.

TUCCI, C.E.M.(Organizador), 1993. “*Hidrologia: ciência e aplicação.*” Editora da Universidade, ABRH. EDUSP, Portalegre, Brasil.

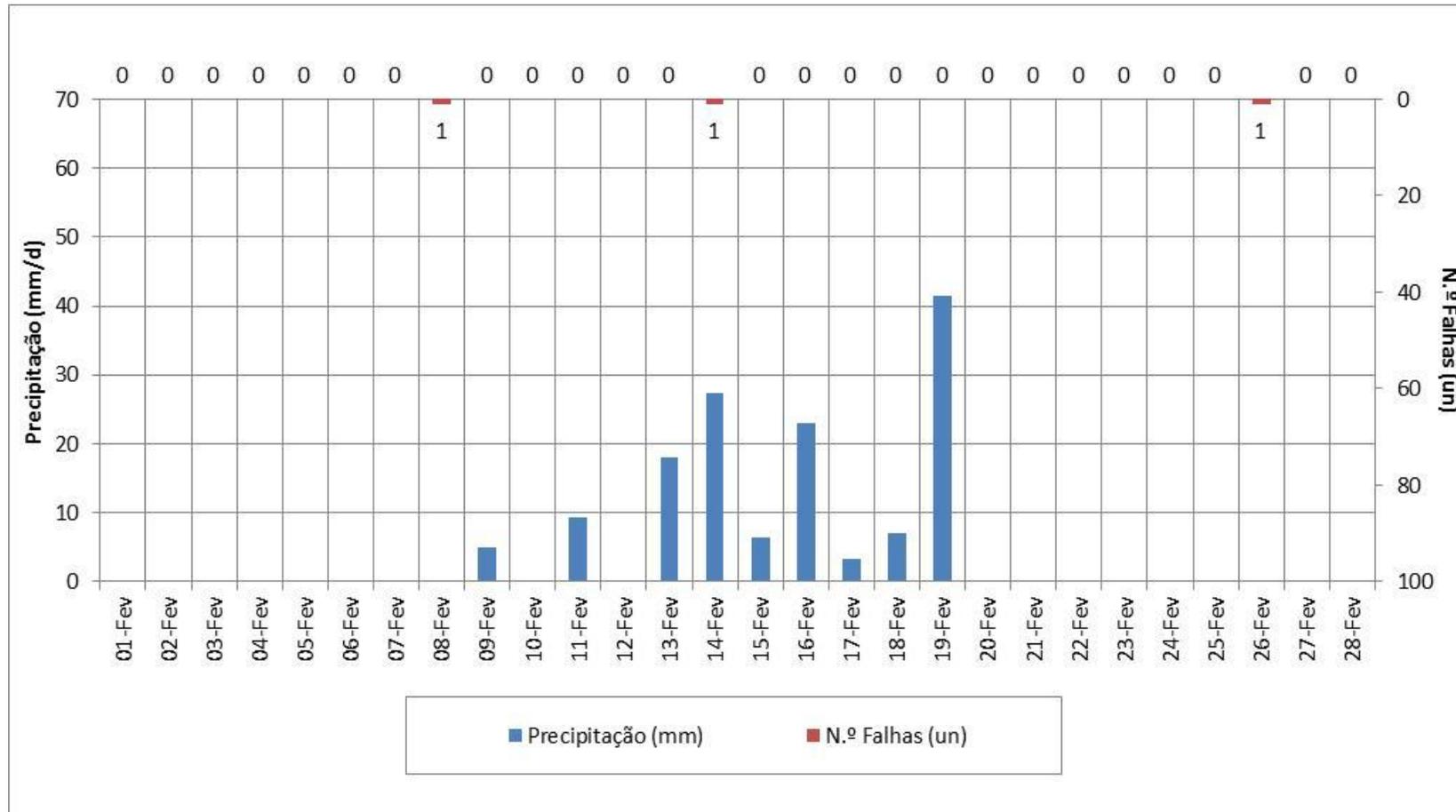
TIBÚRCIO E. C.,CASTRO M. A. H., 2007, “*Uso de Sistema de Informação Geografica para determinação do Curve Number em Regiões Hidrológicas*”, Simposio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.

WANIELISTA, M., KERSTEN, R. e EAGLIN, R., 1997, “*Hydrology:water quantity and quality control.*”, 2 nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., Usa.

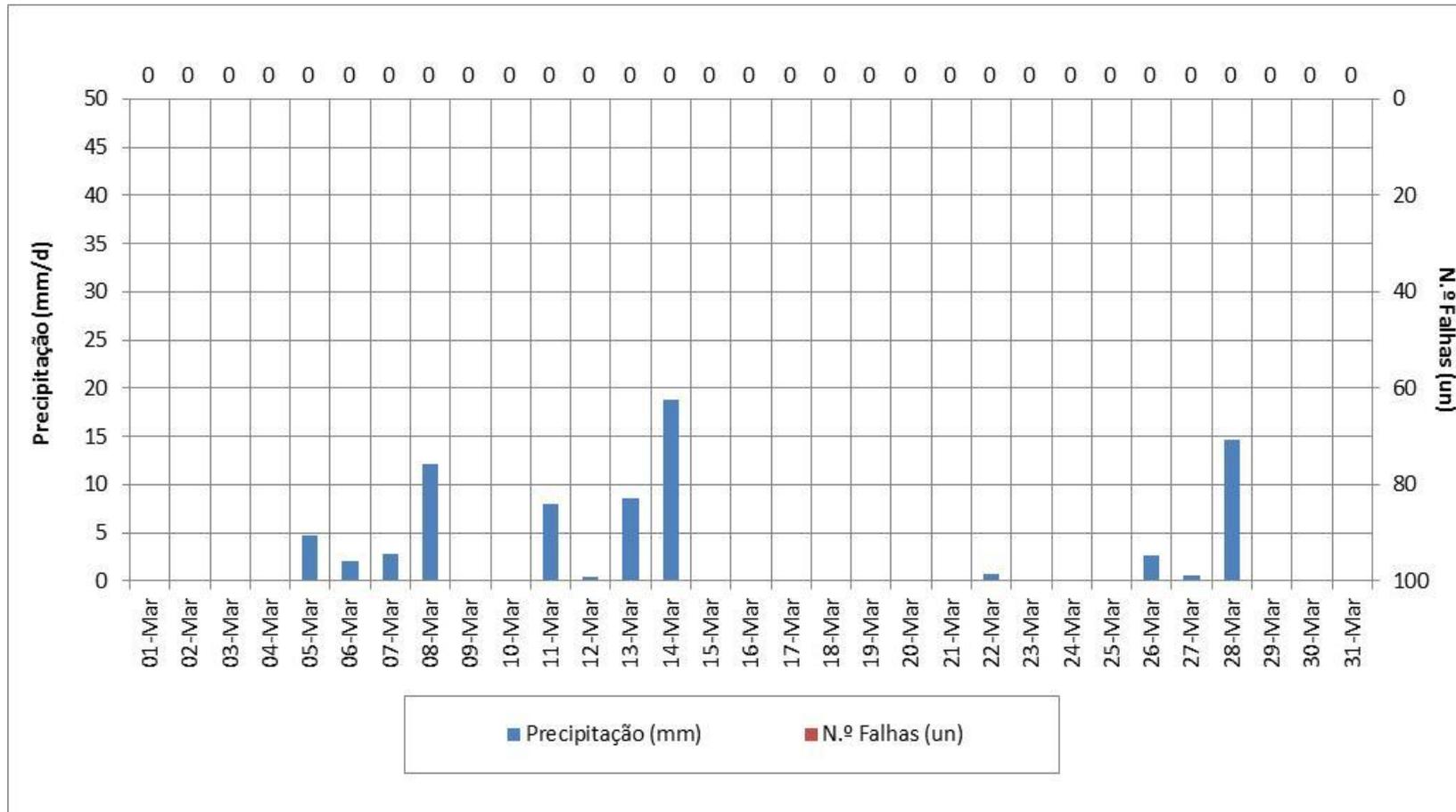
WILSON, E. M., 1983, “*Engineering hydrology*”. 3 rd edition, The MacMillan Press LTD, Hong Kong.

Anexos

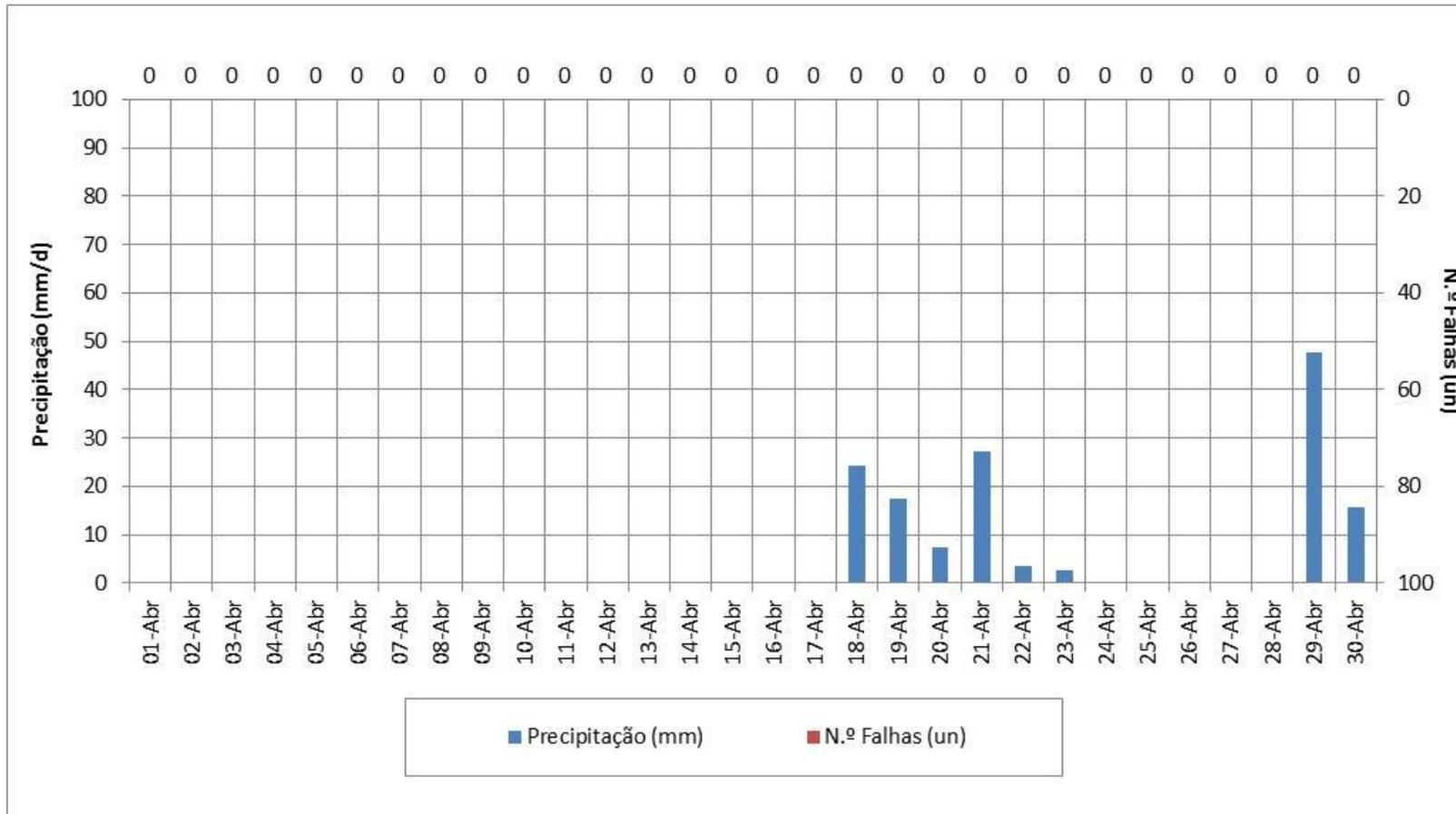
Anexo I – Hietograma e Falhas do Udógrafo U5, no mês de Fevereiro.



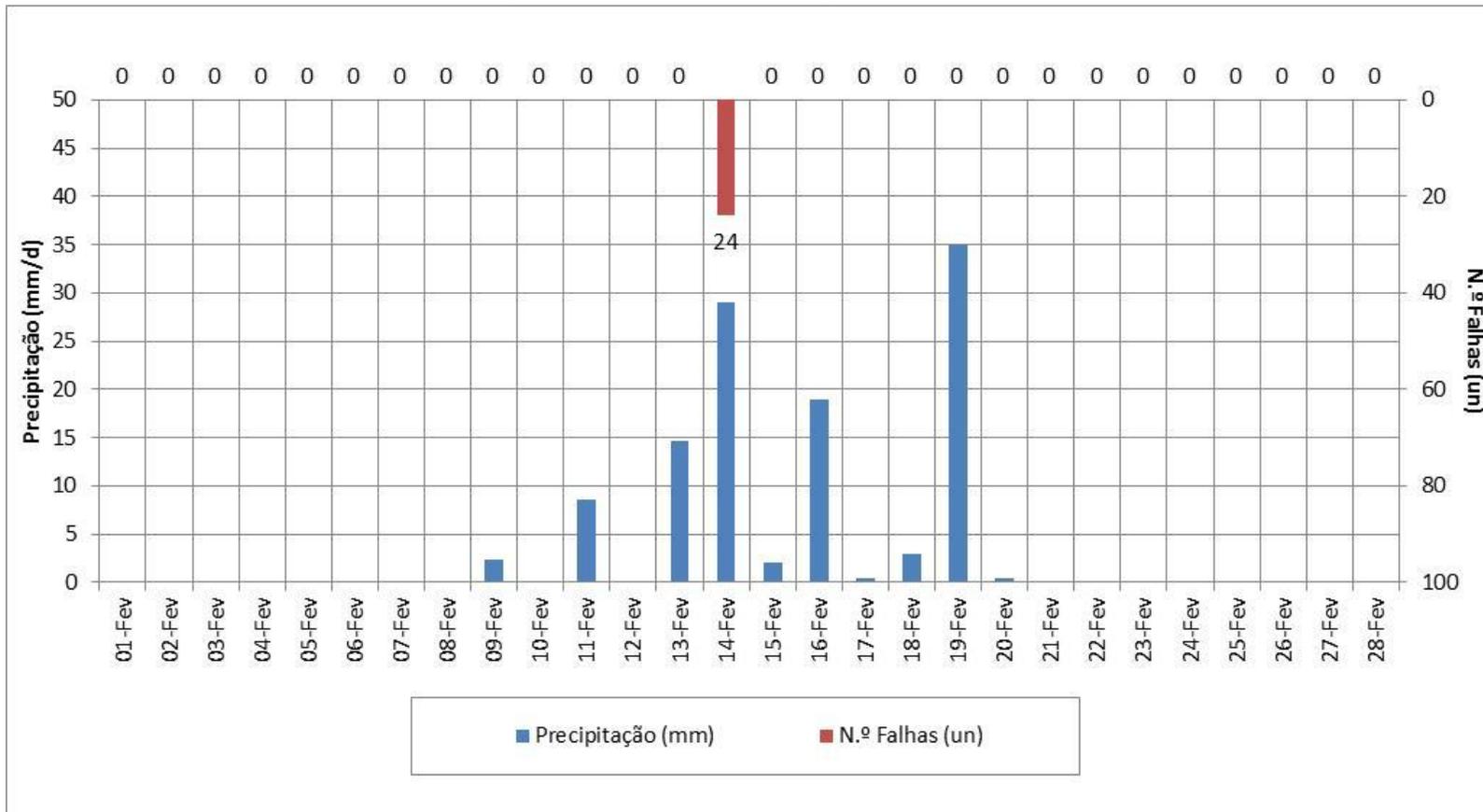
Anexo II – Hietograma e Falhas do Udógrafo U5, no mês de Março.



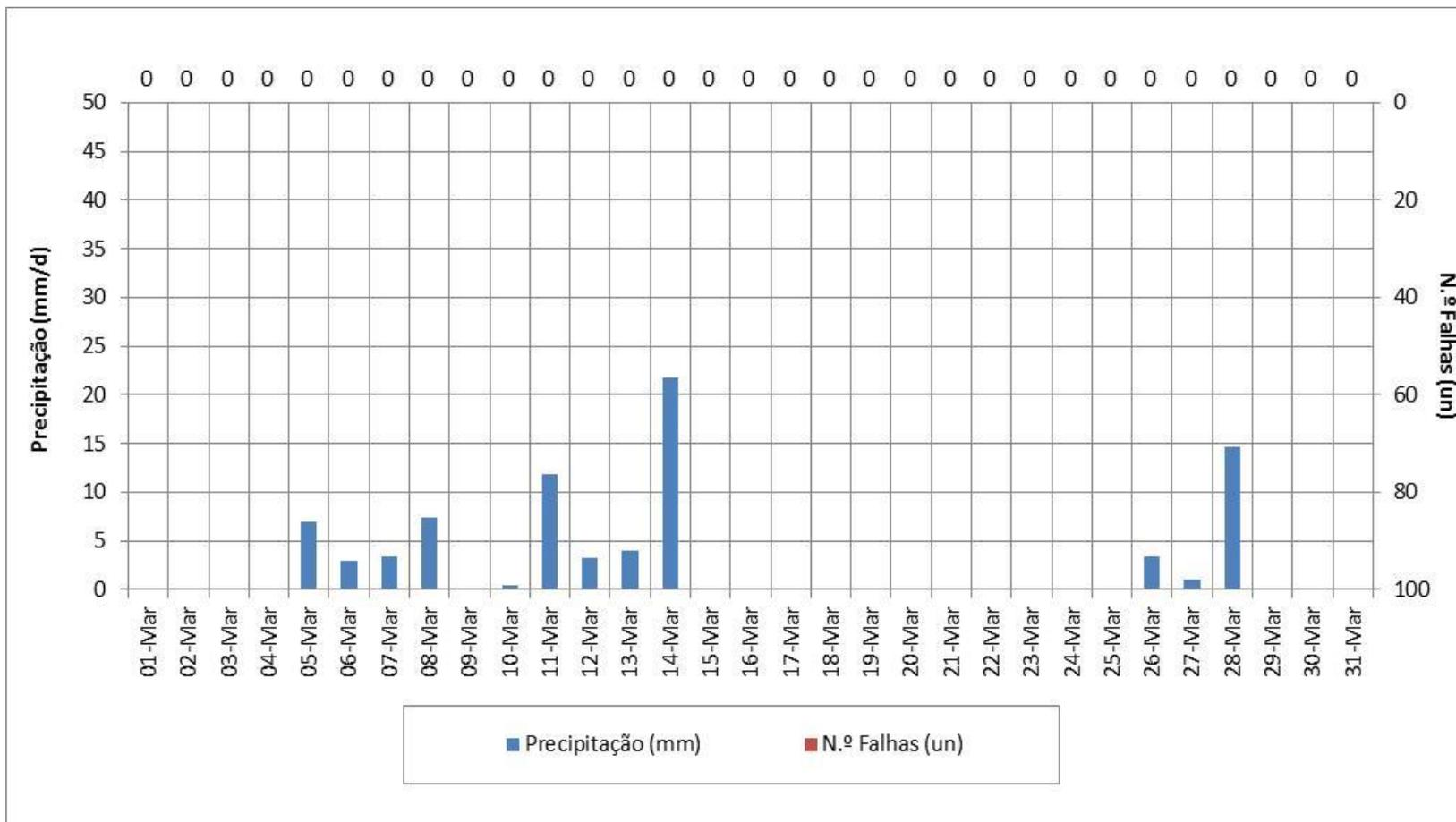
Anexo III – Hietograma e Falhas do Udógrafo U5, no mês de Abril.



Anexo IV – Hietograma e Falhas do Udógrafo U7, no mês de Fevereiro.



Anexo V – Hietograma e Falhas do Udógrafo U7, no mês de Abril.



Anexo VI – Hietograma e Falhas do Udógrafo U7, no mês de Abril.

