



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Lourenço Ferreira

**Sistema de Previsão e Alerta de
Cheias e Inundações para as bacias
dos rios Selho e Este**

Sistema de Previsão e Alerta de Cheias e Inundações para as bacias dos rios Selho e Este

João Pedro Lourenço Ferreira

Uminho | 2016

Dezembro de 2016



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Pedro Lourenço Ferreira

**Sistema de Previsão e Alerta de
Cheias e Inundações para as bacias
dos rios Selho e Este**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Luís da Silva Pinho

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças a várias pessoas, a quem gostaria de deixar o meu agradecimento por todo o apoio e colaboração ao longo deste período.

Em primeiro lugar, gostaria de deixar o meu agradecimento na realização da dissertação ao meu orientador Professor José Luís Pinho. Agradeço todas as horas de trabalho conjunto a ajudar-me em todas as dificuldades que existiram durante este percurso. Agradeço também a dedicação, disponibilidade, entusiasmo e apoio que me transmitiu ao longo dos últimos meses. Um agradecimento muito especial à minha namorada, Mónica Fernandes, que sempre me apoiou incondicionalmente durante toda esta fase, nas horas desperdiçadas para me ajudar nos trabalhos efetuados e sempre me aconselhou no caminho certo.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos de curso que me acompanharam durante esta última etapa do ensino superior, em especial ao Rafael Coelho pelas muitas horas de lazer e de estudo partilhadas. Gostaria também de agradecer em especial aos meus amigos Carlos Ferreira, Flávio Martins, Ricardo Lopes e Stefano Gomes pelos bons momentos de descontração e estudo conjunto durante todo o curso.

Por fim mas sempre em primeiro, agradeço à minha família, em especial à minha mãe e ao meu pai, que me possibilitaram a realização desta etapa de estudo no ensino superior, e aos meus irmãos, que sempre me apoiaram e incentivaram, aos quais dedico a felicidade que sinto agora com a conclusão de mais uma etapa na minha vida.

RESUMO

Cada um de nós é afetado pelo clima que nos rodeia. Este é influenciado pelas condições atmosféricas globais. As cheias e inundações são dois fenómenos naturais que advêm da dinâmica associada às condições atmosféricas. Caracterizam-se por um aumento temporário de caudais num determinado curso de água, originando o aumento da velocidade da corrente e a subida do nível das águas, o que poderá provocar o transbordamento do leito normal desse curso de água e conseqüente inundação dos terrenos adjacentes. As conseqüências podem ser catastróficas, provocam perda de vidas, destruição de bens materiais e danos no ambiente. Por se tratar de um fenómeno intenso e inconstante não pode ser eliminado, mas os seus danos podem ser reduzidos através de medidas preventivas e um bom conhecimento do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas e respetivas linhas de água.

Esta dissertação tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de um sistema de previsão e alerta de cheias e inundações utilizando ferramentas computacionais de modelação hidrológica e hidrodinâmica e resultados de previsões de modelos atmosféricos, para previsão de caudais fluviais em situações de cheias.

Procedeu-se à implementação da componente hidrológica, baseada no modelo de Sacramento, num modelo hidrodinâmico de escoamento da rede fluvial da bacia hidrográfica do rio Ave, construído no *software* SOBEK.

Posteriormente o modelo foi inserido no sistema Delft-FEWS que possibilita a manipulação e a ligação de inúmeros dados hidrometeorológicos, tanto monitorizados como previstos, bem como modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. Trata-se de um *software* através do qual é possível implementar sistemas de previsão, tendo sido configurado para atender às condições específicas das bacias dos rios Selho e Este. Foram identificados e incorporados dados de entrada necessários à realização de previsões, os parâmetros de calibração do modelo obtidos através de uma ferramenta de otimização e configuradas as saídas de resultados. Finalmente, o processo de execução dos modelos e apresentação de resultados foi devidamente configurado.

Palavras-chave: Cheias; inundações; rios Selho e Este; Delft-FEWS; Sistemas de Previsão de Cheias

ABSTRACT

Each of us is affected by the climate around us. This is influenced by the global weather conditions. Floods and flooding are two natural phenoms that arise from the dynamics associated with atmospheric conditions. They are characterized by a temporary increase of flow rates in a certain water course, causing an increase in stream velocity and rising water levels, which may cause the normal bed to overflow and consequent flooding of adjacent lands. The consequences can be catastrophic, lead to loss of life, destruction of properties and damage to the environment. Because it is an intense and inconstant phenomenon, it can't be eliminated, but its damage can be reduced through preventive measures and a good knowledge of the hydrological behavior of the river basins and their water lines.

The main objective of this dissertation is to contribute to the development of flood and flooding prediction and warning system using computational tools of hydrological and hydrodynamic modeling and results of predictions of atmospheric models to predict river flows in situations of floods.

The hydrological component, based on the Sacramento model, was implemented in a hydrodynamic flow model of the fluvial network of the Ave river basin, built in the SOBEK software.

Later, the model was inserted in the Delft-FEWS system that allows the manipulation and the connection of numerous hydrometeorological data, both monitored and predicted, as well as hydrological and hydrodynamic models. It is a software through which it is possible to implement forecasting systems, having been configured to meet the specific conditions of the Selho and East river basins. The input data required to perform predictions, the calibration parameters of the model obtained through an optimization tool and the results outputs were identified and incorporated. Finally, the execution process of the models and presentation of results was properly configured.

Keywords: Floods; flooding; Selho and Este rivers; Delft-FEWS; Flood Forecasting Systems

ÍNDICE

Agradecimentos.....	I
Resumo	III
Abstract.....	V
Lista de Figuras	IX
Lista de Tabelas.....	XIII
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	XV
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos da dissertação.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
2. Cheias e Inundações	7
2.1 Generalidades.....	7
2.2 Avaliação e gestão das zonas de risco de inundações	8
2.3 Fatores que influenciam o comportamento de cheia	9
2.4 Redução dos efeitos das cheias	11
2.5 Programa de gestão para defesa contra cheias	13
2.6 Identificação de áreas inundáveis	14
2.7 Sistemas de Previsão e Alerta	16
3. Modelação de Cheias e Inundações.....	18
3.1 Formulação matemática de escoamentos com superfícies livre em sistemas unidimensionais.....	18
3.2 Métodos de previsão de caudais de cheias	22
3.3 Sistemas de Informação Geográficas	27
3.4 Software de Modelação Hidrodinâmica e Hidrológica	29
3.5 Plataforma Delft-FEWS	47
3.5.1 Fontes de dados incluídas na plataforma Delft-FEWS dos rios Este e Selho	49
4. Caracterização da zona em estudo.....	55
4.1 Bacia Hidrográfica do Rio Ave.....	55

4.2	Bacia Hidrográfica do Rio Este	57
4.3	Bacia Hidrográfica do Rio Selho	59
5.	Modelo Hidrológico e Hidrodinâmico	61
5.1	Modelo Hidrológico	61
5.2	Modelo Hidrodinâmico	67
6.	Plataforma Delft-FEWS – Rios Este e Selho	79
6.1	Funcionamento da plataforma Delft-Fews dos rios Este e Selho	79
6.2	Resultados ilustrativos das previsões no Delft-FEWS dos rios Este e Selho	87
7.	Conclusões e recomendações para Desenvolvi- mentos futuros	97
7.1	Conclusões	97
7.2	Recomendações para Desenvolvimentos Futuros	98
	Referências Bibliográficas.....	99
	Anexo I – Dados Hidrométricos e Hidrológicos Rio Este	103
	Anexo II – Dados Hidrométricos e Hidrológicos Rio Selho.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1_Áreas inundáveis para diferentes cheias (Veloso, 2015).....	15
Figura 2_Esquema de funcionamento de um Sistema de Alerta de Cheias e Inundações	17
Figura 3_Variáveis intervenientes na Equação da Energia (Cardoso, 1998)	19
Figura 4_Volume de controlo para a derivação da Equação da Continuidade (Cardoso, 1998)	20
Figura 5_Volume de controlo para a derivação da Equação da Quantidade de Movimento (Cardoso, 1998).....	21
Figura 6_Relação entre a precipitação total e a precipitação útil (Lencastre & Franco, 1984)	25
Figura 7_Componentes de um SIG (adaptado de Santos et al. 2014)	28
Figura 8_Display de entrada no SOBEK.....	32
Figura 9_Janela de gestão de casos, SOBEK	32
Figura 10_Janela de gestão de casos após abrir/criar um novo caso, Sobek.....	33
Figura 11_Janela Settings, Sobek	34
Figura 12_Criação de um evento de precipitação, Sobek	35
Figura 13_Adicionar área no nó de Sacramento, Sobek.....	36
Figura 14_Adicionar resultados RRL no nó de Sacramento, Sobek	36
Figura 15_Adicionar resultados RRL no nó de Sacramento, Sobek	37
Figura 16_Vista de perfil do Rio Este, Sobek	37
Figura 17_Vista de perfil do Rio Selho, Sobek.....	38
Figura 18_Exemplo de implementação do modelo (WL, 2005).....	39
Figura 19_Esquema de funcionamento do modelo hidrológico de Sacramento (Pinho & Vieira,2006).....	41
Figura 20_Inserção da área da bacia a calibrar, RRL	42
Figura 21_Software RRL: formulário de seleção do modelo hidrológico.	43
Figura 22_Séries de Precipitação, Evaporação e Caudal, RRL	43
Figura 23_Escolha do algoritmo de otimização e respetiva função objetivo, RRL.....	45
Figura 24_Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Ave (Costa, 2009)	55
Figura 25_Caracterização do Rio Ave e seus Afluentes (Veloso,2014)	57
Figura 26_Rio Este.....	58
Figura 27_Rio Selho	59

Figura 28_ Método de Thiessen para a bacia hidrográfica do Rio Este	61
Figura 29_ Método de Thiessen para a bacia hidrográfica do Rio Selho	62
Figura 30_ Valores calculados ‘vs’ valores observados, Rio Este – combinação 1	64
Figura 31_ Valores calculados ‘vs’ valores observados, Rio Este – combinação 2	64
Figura 32_ Valores calculados ‘vs’ valores observados, Rio Selho – combinação 1	66
Figura 33_ Valores calculados ‘vs’ valores observados, Rio Selho- combinação 2	66
Figura 34_ Modelo hidrodinâmico da bacia do Ave efetuado no Sobek	68
Figura 35_ Modelo hidrodinâmico da Bacia do Este, Sobek	69
Figura 36_ Modelo hidrodinâmico da Bacia do Selho, Sobek.....	69
Figura 37_ Gráfico dos resultados da simulação 9 Dezembro de 1995 a 8 Dezembro 2000....	70
Figura 38_ Gráfico dos resultados da regressão linear 9 de Dezembro de 1995 a 8 de Dezembro de 2000.....	71
Figura 39_ Gráfico caudal-precipitação 9 de Dezembro de 1995 até 8 de Dezembro de 2000	72
Figura 40_ Gráfico caudal-precipitação de 6 Agosto de 1997 a 8 de Junho de 1998.....	72
Figura 41_ Gráfico dos resultados da simulação de 6 Agosto de 1997 a 8 de Junho de 1998..	73
Figura 42_ Gráfico dos resultados da regressão linear de 6 Agosto de 1997 a 8 de Junho de 1998	73
Figura 43_ Gráfico dos resultados da simulação 1 de Outubro de 1985 a 30 de Setembro de 1990	74
Figura 44_ Gráfico dos resultados da regressão linear 1 de Outubro de 1985 e 30 de Setembro de 1990.....	75
Figura 45_ Gráfico caudal-precipitação de 1 de Outubro de 1985 e 30 de Setembro de 1990.	75
Figura 46_ Gráfico caudal-precipitação de 6 Agosto de 1989 a 8 de Junho de 1990.....	76
Figura 47_ Gráfico dos resultados da simulação 6 Agosto de 1989 a 8 de Junho de 1990	76
Figura 48_ Gráfico dos resultados da regressão linear de 6 Agosto de 1989 a 8 Junho de 1990	77
Figura 49_ Interface principal da plataforma Delft-FEWS	80
Figura 50_ Import External, Delft- FEWS	81
Figura 51_ Update, Delft- FEWS.....	81
Figura 52_ Forecasting GFS, Delft-FEWS	82
Figura 53_ Forecasting WRF, Delft - FEWS	82

Figura 54_Visualização dos basins/nós de Sacramento nos respetivos modelos (Delft/Sobek)	83
.....	83
Figura 55_Time Series, Delft-FEWS.....	83
Figura 56_Dados de Radar Meteogalicia, Delft-FEWS	84
Figura 57_Precipitação no modelo WRF, Delft-FEWS	85
Figura 58_Vento no modelo WRF, Delft-FEWS.....	85
Figura 59_Pressão no modelo WRF, Delft-FEWS	85
Figura 60_Precipitação no modelo GFS, Delft-FEWS.....	86
Figura 61_Temperatura no modelo GFS, Delft-FEWS.....	86
Figura 62_Time Series, Delft-FEWS.....	87
Figura 63_Time Series, Delft-FEWS.....	87
Figura 64_Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 21 de Setembro	88
Figura 65_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 21 de Setembro .	89
Figura 66_Delft-FEWS - Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 23 de Setembro	90
Figura 67_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 23 de Setembro .	90
Figura 68_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 6 de Outubro ...	91
Figura 69_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 6 de Outubro	91
Figura 70_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 8 de Outubro ...	92
Figura 71_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 8 de Outubro	93
Figura 72_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 10 de Outubro .	94
Figura 73_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 10 de Outubro ...	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1_Medida Estruturais e Não-Estruturais (Maia & Ribeiro)	12
Tabela 2_Parâmetros de Sacramento (Podger, 2004)	46
Tabela 3_Percentagens da área correspondente a cada estação meteorológica utilizada na calibração da bacia hidrográfica do rio Este.....	62
Tabela 4_Percentagens da área correspondente a cada estação meteorológica utilizada na calibração da bacia hidrográfica do Rio Selho	63
Tabela 5_Resultados dos parâmetros de Sacramento no software RRL	65
Tabela 6_Resultados dos parâmetros de Sacramento no software RRL	67
Tabela 7_Diferenças entre caudal real e caudal simulado, Ponte Junqueira.....	70
Tabela 8_Diferenças entre caudal real e caudal simulado, Ponte Brandão	74

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ARH – Administração da Região Hidrográfica
CE – Comissão Europeia
Delft-FEWS – Delft Hydraulics-Flood Early Warning System
DHI – Danish Hydraulic Institute
GIS – Geographic Information System
HEC – Hydrologic Engineering Center
RAS – River Analysis System
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
SVARH - Sistema de Vigilância e Alerta de Recursos Hídricos
RR – Rainfall Runoff
RRL – Rainfall Runoff Library
SIG – Sistema de Informação Geográfica
USACE – U.S. Army Corps of Engineers
INAG – Instituto Nacional da Água
SIG – Sistema de Informação Geográfica
GUI - Grafical User Interface
APA - Agência Portuguesa do Ambiente
CAD - Computer Aided Design

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As cheias e inundações são dois fenómenos naturais com grande poder destrutivo que acontecem de forma rápida e por vezes inesperada. Apesar de toda a tecnologia desenvolvida, ainda ocorrem cheias que causam milhares de mortos todos os anos e milhões de euros em estragos materiais. As mudanças climáticas que neste momento atravessamos tornam cada vez mais importante prever atempadamente os seus efeitos e diminuí-los ao máximo.

As cheias formam-se quando ocorre precipitação intensa que provoca o aumento do caudal das linhas de água, resultando numa elevação do nível das águas e consequente eventual extravasamento das margens associadas a caudais mais baixos, provocando assim inundações. Nesta definição de cheias estão excluídas "as cheias" provocadas por outros fatores (artificiais ou naturais), como por exemplo a rutura de barragens ou a fusão de neve. Uma cheia pode ser causada por fatores naturais ou por fatores antrópicos.

Dentro dos fatores naturais é de salientar:

- Clima;
- Características dos solos;
- Cobertura Vegetal;
- Características das bacias hidrográficas.

Como fatores com influência humana:

- Impermeabilização dos solos;
- Desflorestação;
- Obstrução/ocupação e alteração de linhas de água.

As inundações estão relacionadas com a incapacidade de infiltração dos solos na drenagem das águas superficiais, podendo ser definidas como uma "cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água. Inclui as cheias ocasionadas pelos rios, pelas torrentes de montanha e pelos cursos de água efémeros, e as inundações ocasionadas pelo mar nas zonas costeiras, e pode excluir as inundações com origem em redes de esgotos" (Comissão Europeia, 2007).

A APA, Agência Portuguesa do ambiente, tem por missão propor, acompanhar e assegurar a execução da política nacional no domínio dos recursos hídricos de forma a assegurar a sua gestão sustentável. Assim, a Direção de Serviços de Recursos Hídricos tem como finalidade,

garantir o funcionamento do “Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias”, integrado no SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos), que disponibiliza informação atualizada através de dados medidos em estações meteorológicas e hidrométricas. Este sistema funciona de forma permanente para que não ocorra o risco de se declarar uma cheia demasiado tarde, sendo possível emitir os alertas com maior antecedência permitindo assim uma maior eficiência na minimização dos impactos negativos provocados por cheias.

O radar meteorológico permite registar episódios de precipitação. Permite monitorizar a precipitação em tempo real, facilitando a aquisição, armazenamento e tratamento informático de dados pluviométricos com uma elevada resolução espacial e temporal (Fragoso, 1996).

Na última década, modelos de simulação, modelos de otimização, modelos de decisão, sistemas de bases de dados e sistemas de informação geográfica (SIG) têm sido ferramentas largamente utilizadas, isoladamente, na investigação e na gestão de sistemas aquáticos. A integração coerente destas ferramentas informáticas constitui um Sistema de Suporte à Decisão (SSD), garantindo aos seus utilizadores um meio valioso para manuseamento de toda a informação necessária ao processo de decisão (Pinho & Vieira, 2002).

A modelação matemática em hidráulica constitui uma metodologia eficiente e útil para a análise, estudo e previsão de cheias e inundações. Este domínio resulta da junção de métodos numéricos, matemáticos e princípios físicos associados à hidrodinâmica e hidráulica. No caso específico de problemas hidráulicos, envolvendo cheias e inundações, é sem dúvida uma metodologia de enorme potencial quer para a simulação e prevenção das mesmas, quer para a análise de técnicas de gestão e controlo dos impactos negativos, possível desde que as medidas tomadas sejam coordenadas à escala das bacias hidrográficas (Martins, 2012).

Existem diferentes soluções de *software* disponível para modelação hidrológica e hidrodinâmica que resolvem numericamente as equações de escoamentos em superfície livre. São vários os programas que poderão ser utilizados neste tipo de trabalho destacando-se desde já alguns daqueles com maior número de aplicações, como o SOBEK da Deltares (Pinho & Vieira, 2002), o MIKE 11 da DHI Water & Environment (Lucas et al, 2010) e o HEC- RAS da USACE (Timbadiya et al, 2011).

A previsão dos acontecimentos envolvidos no ciclo hidrológico tem proporcionado inúmeros desafios devido à sua elevada complexidade que, acompanhados com o desenvolvimento da linguagem matemática, dos sistemas de resolução e aumento das capacidades de computação, levou à criação e aperfeiçoamento de diversos instrumentos para modelação dos recursos hídricos (Araújo, 2011).

Os resultados de previsões de modelos atmosféricos são de grande utilidade para a previsão de cheias e inundações. Baseiam-se em parâmetros recolhidos em estações meteorológicas e modelos computacionais baseados nas leis físicas que regulam o comportamento da atmosfera (comparam o estado inicial da atmosfera e simulam a sua evolução provável em horizontes temporais predefinidos) para a produção de previsões do estado da atmosfera (Rennó, 2004). Existem diversos modelos atmosféricos operacionais que poderão ser utilizados no estudo e previsão de cheias e inundações. Destacam-se os seguintes: o GFS (Global Forecast System) desenvolvido pela NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration), o modelo regional WRF (Weather Research and Forecasting) da MeteoGalicia, o modelo de circulação geral atmosférico INPE/CPTEC do NCEP (National Centers for Environmental Prediction) e o modelo regional Eta, desenvolvido pelo COLA (Center for Ocean–Land–Atmosphere Studies) (Oliveira, 2006, Herdies et al, 2002).

A configuração de sistemas que incluam os dados de precipitação estimados ou monitorizados pelas tecnologias atrás apresentadas e ferramentas de modelação hidrológica e hidráulica constitui uma resposta eficaz para a mitigação de riscos associados a fenómenos extremos agravados pelos impactos decorrentes das alterações climáticas. O presente trabalho contribuirá para a avaliação destas tecnologias na definição de sistemas de previsão e alerta em duas pequenas bacias hidrográficas: as bacias dos rios Selho e Este.

1.2 Objetivos da dissertação

A presente dissertação tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de um sistema de previsão e alerta de cheias e inundações utilizando ferramentas computacionais de modelação hidrológica e hidrodinâmica e resultados de previsões de modelos atmosféricos, para previsão de caudais fluviais em situações de cheias.

Como objetivos específicos teremos:

- (i) Modelação hidrodinâmica e hidrológica;

As ferramentas de modelação permitem simular vários problemas complexos que incluem diferentes estruturas capazes de alterar as características do escoamento como pontes, variações de secções e leitos fluviais, açudes e barragens. Através de modelação é possível estudar em pormenor as diferentes características dos escoamentos, incluindo a velocidade e níveis da água.

Pretende-se neste trabalho uma caracterização pormenorizada das diferentes ferramentas disponíveis bem como um estudo das suas funcionalidades. Após esta avaliação será utilizado,

um modelo hidrológico e hidrodinâmico unidimensional de duas sub-bacias de pequena dimensão (rios Selho e Este) que será desenvolvido a partir de um modelo existente da bacia hidrográfica do rio Ave.

- (ii) Análise de séries de dados hidrometeorológicos históricos, utilização de dados históricos de radar meteorológico, e acesso a resultados de modelos atmosféricos.

- (iii) Realização de simulações hidrológicas e hidrodinâmicas com base em previsões de precipitação. O modelo desenvolvido será utilizado para realizar simulações de situações de cheia. Será realizada uma análise ao seu desempenho apresentando-se resultados para diferentes situações de previsão de dois modelos atmosféricos operacionais: o GFS (Global Forecast System) da NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) e o WRF (Weather Research and Forecasting) da MeteoGalicia.

- (iv) Configuração da plataforma Delft-FEWS de suporte ao trabalho desenvolvido

Procedeu-se à configuração desta plataforma que permite a visualização dos resultados das simulações e a operacionalização de dados e modelos.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema desta dissertação, bem como as motivações e objetivos, e disposição da mesma.

O capítulo 2 explica os fenómenos das cheias e inundações, expondo quais os fatores que contribuem para as suas ocorrências, efeitos que possam ter no território e sociedade, bem como medidas a adotar para minimizar os seus efeitos.

O capítulo 3 apresenta a modelação de cheias e inundações. A formulação matemática utilizada para escoamentos com superfície livre em sistemas unidimensionais e os métodos de previsão de caudais de cheia. Contém uma análise geral de diversos programas de modelação hidrodinâmica, hidrológica e de modelação geográfica de possível utilização.

O capítulo 4 caracteriza a zona de estudo, é feita uma descrição da bacia do Ave e respetivas sub-bacias do rio Este e Selho.

O capítulo 5 abrange todo o processo realizado para desenvolvimento do modelo hidrológico e hidrodinâmico, com uma breve descrição do funcionamento do programa SOBEK e da ferramenta RRL. São, ainda, apresentados os resultados da calibração do modelo e os respetivos parâmetros do modelo hidrológico de sacramento.

O capítulo 6 descreve e aprecia os resultados das previsões efetuadas no Delft-FEWS. É também realizada uma breve resenha sobre o funcionamento da plataforma.

O capítulo 7 apresenta as principais conclusões retiradas deste estudo e são propostos trabalhos a desenvolver no futuro.

2. CHEIAS E INUNDAÇÕES

2.1 Generalidades

Cheias e inundações são geralmente confundidos no quotidiano, onde se associam estes dois fenómenos naturais ao termo cheia para designar um aumento de caudal do rio, independentemente das margens serem ultrapassadas ou não. Embora existam diferenças entre eles, cheias e inundações são dois fenómenos que ocorrem de forma rápida e por vezes inesperada associados a um elevado poder de destruição difícil de quantificar aquando do extravasamento das margens do rio provocando a destruição de bens materiais assim como o meio ambiente, tanto na flora como na fauna existente.

O conceito cheia define-se como um fenómeno hidrológico extremo provocado por uma precipitação intensa ao nível de uma bacia hidrográfica originando caudais superiores ao escoamento do leito menor do rio, normalmente associados a elevados períodos de retorno. As inundações estão relacionadas com a incapacidade de infiltração dos solos e na drenagem de águas superficiais, podendo ser definidas como uma "cobertura temporária por água de uma terra normalmente não coberta por água".

Os impactos negativos provenientes destes dois fenómenos fazem com que o estudo e implementação de novas medidas preventivas seja cada vez mais importante. Apesar de serem incapazes de se evitar, ao longo do tempo, o Homem tem sido capaz de reduzir os seus efeitos, seja através de medidas estruturais (barragens, diques, açudes, etc.) e/ou medidas não estruturais, com a realização de cartas de zonas inundáveis, cartas de riscos de inundações e planos de proteção civil.

A modelação matemática é hoje uma ferramenta essencial, sendo um dos grandes avanços tecnológicos para a gestão de recursos hídricos, constituindo uma metodologia eficiente e útil para a análise, estudo e previsão de cheias e inundações que resulta da junção de métodos numéricos, matemáticos e princípios físicos associados á hidrodinâmica e hidráulica.

2.2 Avaliação e gestão das zonas de risco de inundações

O estudo preliminar dos riscos de inundações é realizado em todas as regiões hidrográficas ou em qualquer unidade de gestão que é definida, analisando potenciais riscos para determinação de zonas inundáveis com maior probabilidade de ocorrência e as respetivas medidas suplementares para a sua mitigação. No estudo deverão constar as cartas da região hidrográfica para que seja possível elaborar cartas de zonas inundáveis e cartas de zonas com riscos de inundações, indicativas das potenciais consequências prejudiciais associadas a diferentes cenários de inundação, com base em descrições e avaliações de inundações ocorridas no passado incluindo as atividades que provocam o aumento do risco. Desta forma são criadas condições para minimizar potenciais consequências das futuras inundações para a saúde humana, o ambiente e as atividades económicas envolvidas no processo.

Para cada região hidrográfica são elaborados planos de gestão de riscos de inundações, no caso das bacias hidrográficas abrangerem o território de dois países, estes devem cooperar para que seja criado apenas um único plano de gestão. Estes planos estabelecem medidas para a redução de potenciais inundações e para a sua menor magnitude nos danos prejudiciais visando a prevenção, a proteção e a preparação para as situações possíveis de inundações, tendo em consideração aspetos pertinentes da gestão da água e dos solos, o ordenamento do território, a afetação dos solos e a conservação da natureza.

Os cenários previstos nos estudos de alterações climáticas evidenciam tendências que apontam para um aumento de risco de inundações e dos respetivos prejuízos. Devem ser consideradas em primeiro lugar o provável aumento de frequência e magnitude das cheias, fruto das alterações climáticas e do respetivo aumento do nível médio das águas do mar. Em segundo lugar, aliado a uma má gestão dos rios, a longo prazo existe um aumento de vulnerabilidade devido ao maior número de pessoas e atividades económicas situadas em zonas de risco de inundações.

Esta avaliação é realizada com o intuito de prever impactos causados e assim serem reduzidos em comparação com os impactos ocorridos em anos anteriores. Neste contexto, devem ser considerados quanto possível o impacto das alterações climáticas em ocorrências futuras bem como as alterações topográficas registadas ao longo do tempo.

2.3 Fatores que influenciam o comportamento de cheia

O tipo de cheia varia conforme as características hidro-morfológicas de um rio evoluindo com um comportamento cada vez mais indefinido para jusante. Normalmente, na secção a montante o leito de cheia apresenta um canal confinado de escoamento muito diferente da secção a jusante, que apresenta um extravasamento das zonas de cheias para um aumento da capacidade do escoamento.

Os hidrogramas de cheia variam dependem de fatores permanentes e temporários. Nos fatores permanentes os mais relevantes são as características do canal de escoamento, características da bacia hidrográfica, impermeabilização e inclinação do terreno. Como fatores temporários existem as tempestades que variam em função da quantidade e tipo de precipitação bem como a sua dimensão.

Fatores permanentes:

- Características do Canal

Dependendo do tipo de canal em que ocorre o escoamento existem diferentes características de cheias. O pico de cheia encontra-se diretamente relacionado com a velocidade do escoamento do canal, onde maiores velocidades proporcionam picos de cheia mais intensos e que se atingem de modo mais rápido.

- Relativamente à largura do canal, quanto menor for, maior será a probabilidade de ocorrência de cheias, pois a secção é menor originando velocidades superiores quando comparadas com um canal mais largo que permite escoamentos mais lentos.

- Um canal constituído por uma superfície muito irregular origina uma maior turbulência que retarda o pico de cheia devido à dissipação de energia e assim proporciona menores velocidades de escoamento.

- Características da bacia hidrográfica

As características da bacia hidrográfica, a área da bacia e a sua forma, influenciam tanto a intensidade do escoamento como os tempos que se demora a atingir o pico de cheia.

As bacias de maiores dimensões apresentam valores de caudais superiores, pois a área de drenagem dos cursos de água também é maior, e caudais de ponta são mais espaçados no tempo.

A forma da bacia influencia o escoamento pelo impacto que tem sobre a intensidade dos fluxos e sobre o tempo médio de condução da água desde o ponto de impacto até ao de saída. As bacias podem agrupar-se segundo três formas diferentes relacionadas com a relação comprimento/largura.

-Forma alongada: apresenta um curso de água principal e ramificada com afluentes de pouca importância. Durante uma chuva intensa existe um pico rápido de aumento de caudal sucedido por um período estacionário onde o caudal se mantém praticamente constante.

-Forma Arredondada: constituída por cursos de água com comprimentos e importâncias semelhantes, provocando uma maior probabilidade de cheias visto os seus tempos de concentração serem semelhantes.

-Forma Ramificada: no geral é um aglomerado de bacias parciais alongadas que se reúnem num mesmo troço, onde uma chuva estendida a toda a bacia origina cheias parciais com vários caudais de ponta.

2.3.1 Indicadores de forma e relação com a ocorrência de cheias

A partir da forma da bacia hidrográfica é possível calcular determinados índices que traduzem a sua suscetibilidade a concentrar o escoamento superficial resultante de precipitações intensas.

O coeficiente de compacidade ou índice de Gravellius, I_G , é a relação entre o perímetro da bacia em e o perímetro de uma bacia circular de igual área. Este valor quanto mais próximo se encontrar da unidade maior é a sua tendência para a ocorrência de cheias.

$$I_G = \frac{P_b}{2\sqrt{\pi * P_c}} \quad (1)$$

em que:

P_b é o perímetro da bacia de estudo

P_c é o perímetro de uma bacia circular de igual área

Índice de forma, I_f , é a relação entre a largura média da bacia e o comprimento axial da bacia.

A probabilidade de ocorrências de cheias é menor quanto mais baixo for este valor, comparativamente a uma bacia do mesmo tamanho, mas de índice de forma mais elevado.

$$I_f = \frac{L_B}{C_B} \quad (2)$$

em que:

L_B é a largura média da bacia,

C_B é o comprimento axial da bacia.

Densidade de drenagem, D_d , exprime a relação entre comprimento total dos cursos de água da bacia e área total da bacia, indicando a sua drenagem natural. As bacias com grandes valores de densidade de drenagem estão mais vulneráveis a cheias.

$$D_d = \frac{\sum C_i}{A_b} \quad (3)$$

Em que:

$\sum C_i$ é o somatório dos comprimentos dos cursos de água,

A_b é a área da bacia.

2.3.2 Tipos de precipitações

A distribuição temporal e espacial da precipitação dita as características das tempestades. Quanto mais intenso for o período de precipitação, bem como a sua duração, maior vai ser a probabilidade de ocorrência de uma cheia.

As precipitações podem ser classificadas como precipitações de convecção, orográficas e de ação frontal dependendo da sua origem.

- Precipitações de convecção térmica originam chuvas intensas e de curta duração proveniente de nuvens resultantes do cruzamento entre uma massa de ar fria com uma massa de ar quente, aquecida por radiação solar provocando a sua dilatação e conseqüentemente a sua ascensão.
- Precipitações orográficas originam chuvas de intensidades constantes e de longa duração resultantes do choque de correntes de ar com cadeias montanhosas, elevando as massas de ar para a atmosfera provocando o seu arrefecimento e conseqüente geração de nuvens.
- Precipitações frontais criam chuvas pouco intensas, mas com grande duração provenientes do contacto entre duas massas de ar com características de humidade e temperaturas distintas.

2.4 Redução dos efeitos das cheias

Os fatores meteorológicos são os principais causadores das cheias. Durante vários anos a resposta ao risco de situações de cheia passou pela construção de soluções estruturais, como reservatórios e barragens, com o objetivo de reduzir o escoamento superficial.

Os impactos negativos daquele tipo de solução motivaram a adoção de novas medidas para redução dos efeitos de cheias baseadas em soluções não-estruturais, como implementação de sistemas de previsão e alerta e medidas jurídicas/regulamentares na gestão de cheias, que deverão refletir estes distintos tipos de situações.

Para uma redução dos efeitos das cheias de forma eficaz é necessário realizar ações antes, durante e após as cheias, e quando possível de forma combinada.

As medidas pré-cheia são preventivas pois servem para minimizar os impactos negativos provenientes das cheias bem como consciencializar a população para os seus perigos.

Destacam-se:

- A limpeza de zonas de risco como ribeiras, aquedutos e condutas;
- A construção de infraestruturas de defesa de cheia;
- Implementação de sistemas de previsão e alerta;
- O planeamento e gestão do uso do solo em toda a bacia;
- Desencorajamento no desenvolvimento inapropriado nas zonas de cheia;
- Informação pública dos riscos de cheia e das ações a desenvolver em caso de emergência.

A gestão das cheias passa por uma deteção, através da previsão meteorológica, da possibilidade de formação de cheia bem como as suas condições de escoamento, onde surge a emissão de um aviso/alerta às autoridades competentes e ao público para que uma resposta desses intervenientes seja pronta e eficiente.

Após uma cheia é necessário, primeiramente, promover a ajuda aos afetados, sendo eles os principais prejudicados pelo desastre. Caso não existam humanos acidentados, procede-se a uma reconstrução dos edifícios, infraestruturas e defesas de cheia afetadas e finalmente na recuperação e regeneração do ambiente e das atividades económicas na área afetada. No caso de uma cheia severa ou num grande número de cheias sucessivas, é necessário reformular/adaptar as atividades de gestão de cheias, para melhoramento do plano e as suas ações de defesa face a futuros acontecimentos.

Na Tabela 1 encontram-se medidas estruturais e não estruturais de redução dos efeitos de cheias, adaptado de (Maia & Ribeiro, 1998).

Tabela 1_Medida Estruturais e Não-Estruturais (Maia & Ribeiro)

<i>Medidas Estruturais</i>		
Desvio de cheias	Utilização de canais de desvio e zonas de armazenamento	
Estruturas no leito do rio	Barragens e Reservatórios	
	Barragens de desvio	
Proteção Estrutural	Permanentes	Elevação das estruturas (por aterros ou pilares)
		Bermas, cortinas de estanquidade
		Proteção de infraestruturas (válvulas de retenção em coletores de esgoto)

		Materiais e construções que sejam resistentes à água
	Temporárias	Barreiras de Proteção
Medidas não estruturais		
Prenúncios de cheias	Alertas/Avisos/Previsões de cheias	
Medidas de Emergência	Combate e proteção (sacos de areia, barreiras)	
	Evacuação	
	Serviços de apoio a desastres (alojamento temporário; distribuição de alimentos,...)	
Gestão das zonas inundadas	Campanhas de Educação e consciencialização pública	
	Delineação das zonas de cheia	Mapeamento
		Marcação das zonas de cheia
		Referenciação de sinais e níveis de cheias passadas
	Medidas Financeiras	Incentivos e desincentivos
		Seguros
	Mudanças Diretas	Realojamento
		Regulamentação de zonas de cheia
	Legislação Nacional/ Internacional/ Comunitária	Planos de Ordenamento Regionais
		Planos Diretores Municipais
		Restrições e acordos de Construção
		Restrições à emissão de licenças de Construção
Ações de planeamento de uso e controlo da utilização do solo		

2.5 Programa de gestão para defesa contra cheias

A necessidade do Homem habitar junto a cursos de água, principalmente nas zonas de cheias, obrigaram a uma necessidade de alerta das populações para os riscos de cheia motivando

efeitos nefastos a nível económico, social e psicológico na sociedade. Entre os principais impactos negativos socioeconómicos de cheias podem referir-se:

- Possibilidade de perda vidas humanas;
- Desalojamento de pessoas;
- Danos graves em infraestruturas e áreas agrícolas;
- Diminuição de produção e conseqüente decréscimo na economia local.

Sendo impossível a eliminação destes acontecimentos, através de maiores investimentos no melhoramento de previsões e na adoção de medidas mitigadoras, procura-se maximizar os benefícios na redução dos efeitos de cheias e conseqüente redução nos custos económicos e ambientais no pós-cheia.

Para cada região hidrográfica são elaborados planos de gestão de risco de cheias. Os planos de gestão estabelecem objetivos de redução das potenciais conseqüências prejudiciais para a saúde humana, o ambiente, o património cultural e as atividades económicas. Estes abrangem todos os aspetos da gestão de riscos de cheias fluviais e também inundações provocadas pelo mar.

Os planos devem estabelecer medidas adequadas visando a redução da probabilidade de inundação e da magnitude dos danos gerados. Estas medidas devem visar a prevenção, a proteção e a preparação para as situações de inundação, tendo em conta aspetos pertinentes da gestão da água e dos solos, o ordenamento do território, a afetação dos solos e a conservação da natureza. A criação destas medidas não pode gerar um aumento dos riscos de inundações, tanto a montante como a jusante, em locais da mesma bacia hidrográfica.

O Plano Municipal de Emergência apresenta um papel importante neste contexto, quer na identificação dos fatores de risco e delimitação das áreas de vulnerabilidade, quer na definição do organigrama da Proteção Civil ao nível local.

Através da previsão meteorológica, com sistemas de elevada precisão, é possível prever a ocorrência de cheias assim como as suas condições de escoamento e características. É possível desenvolver um melhoramento nos alertas às autoridades competentes, para que as medidas de contenção e proteção sejam postas em prática mais eficazmente e de imediato, assim como um aviso à população geral para prevenção de eventuais cheias.

2.6 Identificação de áreas inundáveis

O leito principal dos cursos de água é relativamente plano em todo o seu percurso, à exceção da nascente, onde as inundações periódicas a montante provocam o transporte de sedimentos que acabam por se depositar em locais adjacentes ao canal, colmatando-o.

Toda a região, que ladeia a maior parte dos cursos de água, inundada durante as cheias, atribui-se a designação de planície de inundação.

De forma geral podem definir-se dois tipos de planícies de inundação:

- Planície de inundação hidrológica: engloba os terrenos adjacentes ao canal fluvial localizados abaixo da designada cota de inundação, com a ocorrência de dois alagamentos a cada três anos.
- Planície de inundação topográfica: engloba os terrenos anteriores acrescidos de outros adjacentes até à cota da cheia de uma dada frequência.

O grande benefício da planície de inundação é a capacidade de providenciar um espaço temporário para a água e para os sedimentos produzidos na bacia hidrográfica. Permite à planície de inundação aumentar o desfasamento temporal entre os picos de precipitação e do escoamento, reduzindo o risco de cheia a jusante.

São áreas muito propícias à agricultura devido à fertilidade do solo, onde por vezes se encontram destas situações. São relativamente próximas do rio, podem ser inundadas temporariamente durante as cheias sem que daí advenham grandes prejuízos.

O zonamento é um instrumento amplamente utilizado nos planos diretores, onde as áreas com risco de cheia são delimitadas e sobre as quais incidem diretrizes diferenciadas para diferentes tipos de utilização (habitação, turismo, indústria, agricultura, etc.). Terá de ser uma atividade dinâmica e periódica, onde os modelos matemáticos de propagação de cheias com diversos períodos de retorno (entre 5 a 10 anos) são uma boa base para se fazer zonamento, precavendo eventuais alterações nos comportamentos de cheia. Na Figura 1 temos um exemplo das possíveis áreas inundáveis para diferentes tipos de cheia.

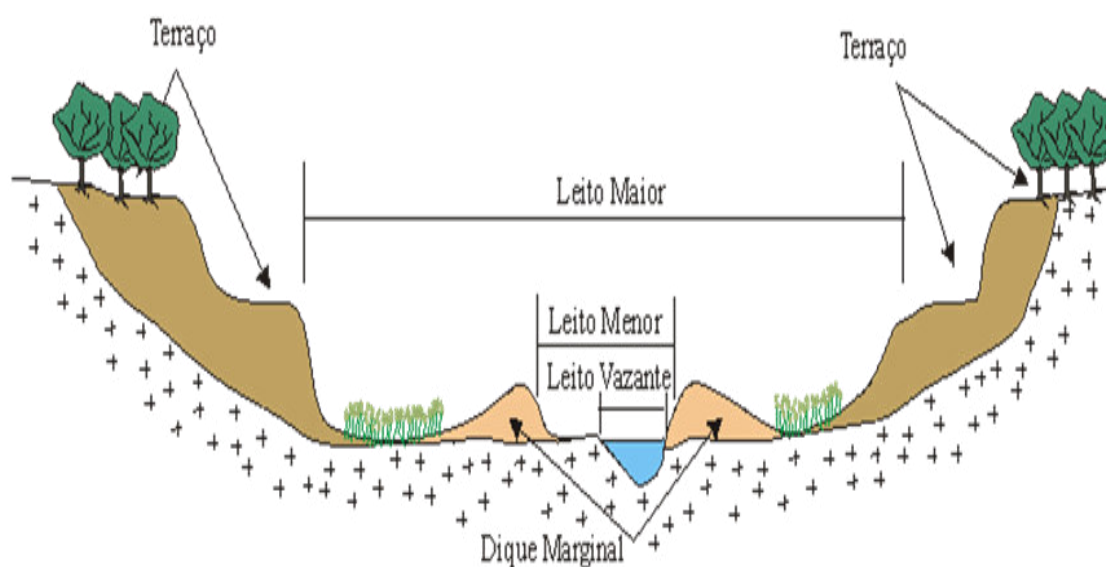


Figura 1_Áreas inundáveis para diferentes cheias (Veloso, 2015)

2.7 Sistemas de Previsão e Alerta

O desenvolvimento da previsão hidrológica e dos sistemas de alerta são elementos essenciais nas estratégias de prevenção de cheias e inundações. Em Portugal, a Agência Portuguesa do Ambiente tem o controlo e jurisdição sobre todo o território nacional. Compete-lhe acompanhar e assegurar a execução da política nacional no domínio dos recursos hídricos de forma a assegurar a sua gestão sustentável, bem como garantir a efetiva aplicação da Lei da Água e demais legislação complementar.

Atualmente, está em vigor o “Sistema de Vigilância e Alerta de Cheias”, integrado no SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos), que disponibiliza toda a informação atualizada através de dados medidos em estações pluviométricas e hidrométricas. Integra componentes de hidrologia e de exploração de albufeiras cujos resultados permitem prever com algum tempo de avanço como é que a onda de cheia irá progredir, e que áreas irão provavelmente ser inundadas.

As informações do Sistema de Vigilância e Alerta constitui a base para a atuação dos serviços da proteção civil, promove a interação com as autoridades espanholas e mantém o contato permanente com as operadoras dos aproveitamentos hidroelétricos nacionais e demais instituições envolvidas, intervenções de emergência e até evacuação da população.

Os recentes desenvolvimentos em previsões meteorológicas e recolha de dados hidrológicos originaram um aumento do interesse na importação e processamento de dados. Os desafios para o desenvolvimento de um sistema de previsão hidrológico moderno e um sistema de alerta encontram-se na integração de grandes conjuntos de dados, módulos especializados no processamento de dados e interfaces que permitam uma fácil integração das capacidades de modelação existente. (Deltares, 2010)

Em resposta a estes desafios, a plataforma Delft-FEWS fornece um sistema de previsão hidrológica e um sistema de alerta de última geração (Figura 2). O sistema é composto por um conjunto sofisticado de módulos desenvolvidos para a construção de um sistema de previsão hidrológica personalizadas consoante as necessidades específicas de cada um. Este inclui um módulo de correlação que gera previsões para uma localização a jusante com base na correlação de eventos nesse local e num local a montante.

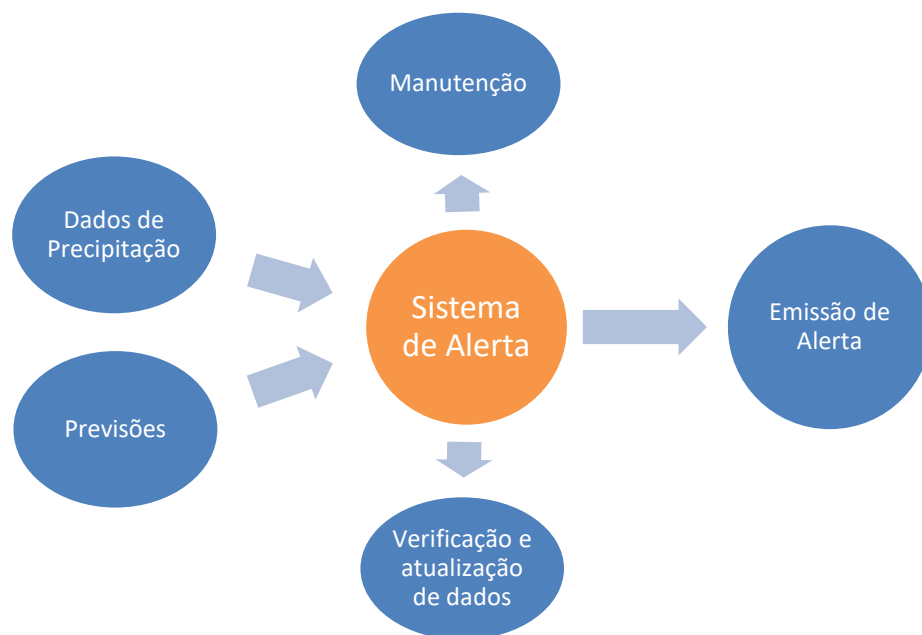


Figura 2_Esquema de funcionamento de um Sistema de Alerta de Cheias e Inundações

O principal objetivo do sistema consiste em administrar o tratamento de dados e o processo de previsão. Este *shell* (ligação entre utilizador e o sistema) incorpora uma ampla biblioteca de manipulação de dados. Pode ser integrado no sistema uma grande variedade de modelos de previsão externos. A importação de dados externos inclui níveis de água observados, precipitações, conjuntos de previsões meteorológicas normalmente produzidos por agências de previsão meteorológica.

A grande versatilidade do sistema permite que ele seja utilizado eficazmente tanto em sistemas complexos como rudimentares e ser adaptado a inúmeras aplicações, incluindo a previsão de inundações, previsão qualidade da água, gestão de águas subterrâneas, controle em tempo real ou simplesmente usado como um repositório de dados.

Em suma, o futuro dos sistemas de previsões cheias e inundações em Portugal e em todo o mundo passará pela criação de um sistema operacional conectado a uma eficiente fonte de dados externos. A Deltares, uma de várias empresas na vanguarda da investigação aplicadas ao domínio da água, criou o Delft- FEWS. É o mais recente sistema de previsões, que fornece um conjunto de módulos de importação para a criação de um sistema de previsão, onde permitem a importação de dados de fontes online externas, como dados meteorológicos ou hidrológicos.

3. MODELAÇÃO DE CHEIAS E INUNDAÇÕES

3.1 Formulação matemática de escoamentos com superfícies livre em sistemas unidimensionais

A modelação matemática aplicada à resolução de problemas hidráulicos permite a produção de informação de apoio à decisão, auxiliando na gestão dos recursos hídricos.

Nas aproximações unidimensionais, como indica o próprio nome, considera-se apenas as variações das características dos escoamentos no sentido do escoamento, desprezando a distribuição das velocidades nas direções vertical e lateral.

A formulação matemática de sistemas unidimensionais baseia-se nas equações da energia, da quantidade de movimento e da continuidade. Em hidráulica, as equações da continuidade e da quantidade de movimento em conjunto, são conhecidas como equações de Saint-Venant.

3.1.1 Equação da energia

A equação da energia, também conhecida como equação de Bernoulli, é utilizada para escoamentos permanentes de líquidos perfeitos ao longo de uma trajetória. O trinómio da equação representa a energia mecânica total por unidade de peso do fluido (Cardoso, 1998).

$$\frac{\rho}{\gamma} + y + \frac{u^2}{2g} = const \quad (4)$$

sendo:

- ρ pressão em qualquer ponto da trajetória (Pa),
- γ peso volúmico (N/m^3),
- y elevação relativamente a um plano horizontal de referência (m),
- u velocidade (m/s),
- g aceleração da gravidade (m/s^2).

O estudo de escoamentos líquidos reais requer uma alteração da equação (4) de forma a que a distribuição das velocidades e as perdas de energia sejam consideradas. Assim o escoamento denomina-se por escoamento permanente gradualmente variado (Figura 3).

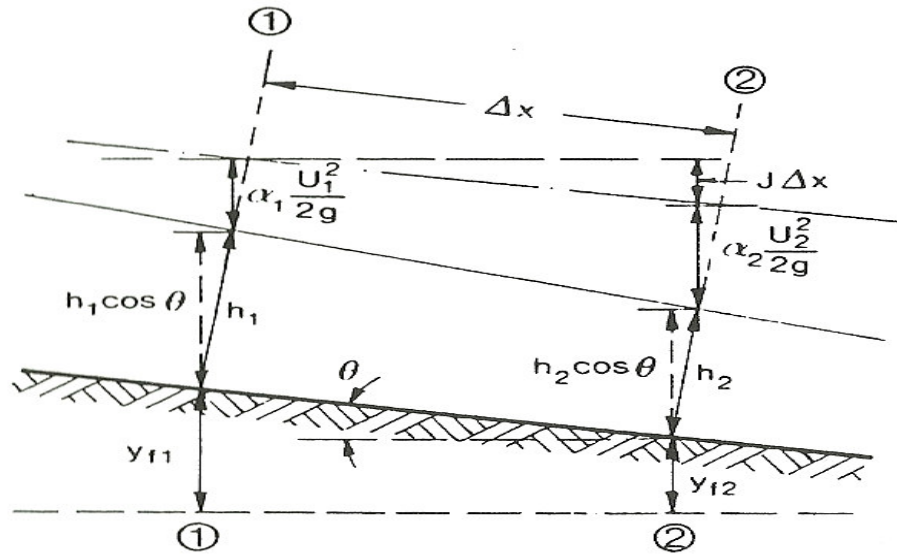


Figura 3_Variáveis intervenientes na Equação da Energia (Cardoso, 1998)

Para este tipo de escoamentos, em canais pouco inclinados (o $\cos \theta \approx 1$, sendo θ o ângulo que o fundo faz com a horizontal), a equação da energia passa a ser:

$$h_1 + y_{f1} + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} = h_2 + y_{f2} + \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g} + J\Delta x \quad (5)$$

em que,

1 e 2 índices que são referentes às secções 1 e 2,

y_f cota do fundo (m),

J perda de carga unitária (m/m),

α coeficiente de Coriolis (-),

Δx comprimento do troço (m).

O coeficiente de *Coriolis* traduz a forma da distribuição de velocidade numa secção transversal através da equação:

$$\alpha = \frac{1}{A} \int \left(\frac{v}{U}\right)^3 dA \quad (6)$$

em que,

v velocidade média pontual (m/s),

U velocidade média na secção transversal do escoamento (m/s),

A secção transversal (m^2).

3.1.2 Equação da continuidade

A equação da continuidade segue o princípio da conservação da massa, onde a variação da massa fluida contida num dado volume de controlo, durante um dado intervalo de tempo, é

igual à diferença entre massas fluidas que entram/saem do respetivo volume de controlo nesse intervalo. (Cardoso, 1998).

Tendo por base a Figura 4 e desprezando os termos de ordem superior a um, a variação de volume no intervalo de tempo Δt é dada pela equação:

$$\left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \Delta t = - \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t \quad (7)$$

em que,

Δx comprimento para o volume de controlo, do canal definido (m),

Q caudal na secção central OO (m^3/s),

Δt intervalo de tempo (s).

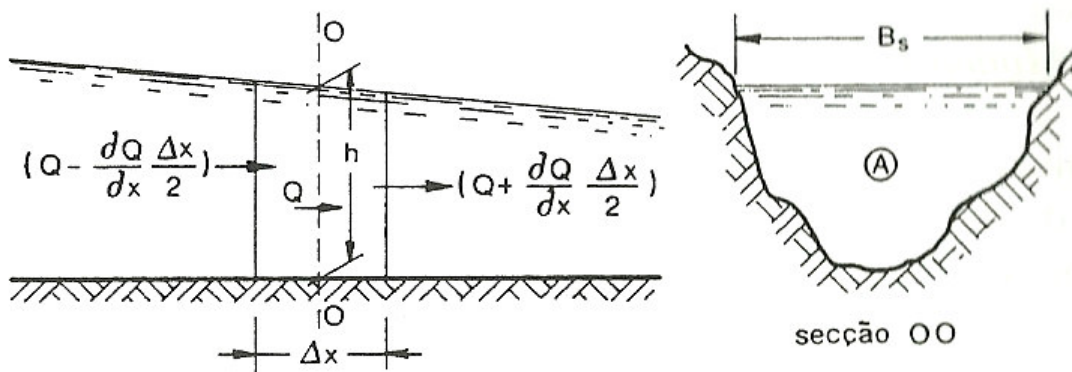


Figura 4_Volume de controlo para a derivação da Equação da Continuidade (Cardoso, 1998)

A mesma variação de volume num intervalo de tempo pode ser descrita por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (A \Delta x) \Delta t \quad (8)$$

Pelo que, igualando a equação (7) com a (8), se obtém a equação da continuidade sob a forma geral de:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

Em escoamentos onde exista adição ou subtração lateral de caudal por unidade de comprimento ao longo do percurso, a equação (9) fica,

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \pm q_x \quad (10)$$

onde $\pm q_x$ representa adição ou subtração de caudal (m^3/s).

3.1.3 Equação da quantidade de movimento

A equação da conservação da quantidade de movimento surge na necessidade do cálculo de escoamentos variados unidimensionais, onde se admite o declive de fundo pouco acentuado,

permanecendo válida a lei hidrostática de pressões. Deste modo, o princípio da conservação da quantidade de movimento aplicado num dado volume de controlo, segundo a direção do escoamento, toma a forma de:

$$F_x + \int_V \rho g_x dV = \int_S \rho u (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS + \frac{\partial}{\partial t} (\int_V \rho u dV) \quad (11)$$

onde,

V volume de controlo,

S superfície,

g_x componente aceleração da gravidade segundo x ,

u componente vetor velocidade segundo x ,

\vec{u} vetor velocidade,

F_x somatório das forças de contacto segundo a mesma direção (N),

\vec{n} versor normal à superfície (-).

E,

$\int_V \rho g_x dV$ representa as forças de massa,

$\int_S \rho u (\vec{u} \cdot \vec{n}) dS$ corresponde à transferência de quantidade de movimento através de uma superfície de controlo,

$\frac{\partial}{\partial t} (\int_V \rho u dV)$ corresponde à variação por unidade de tempo da quantidade de movimento, associada ao volume de controlo.

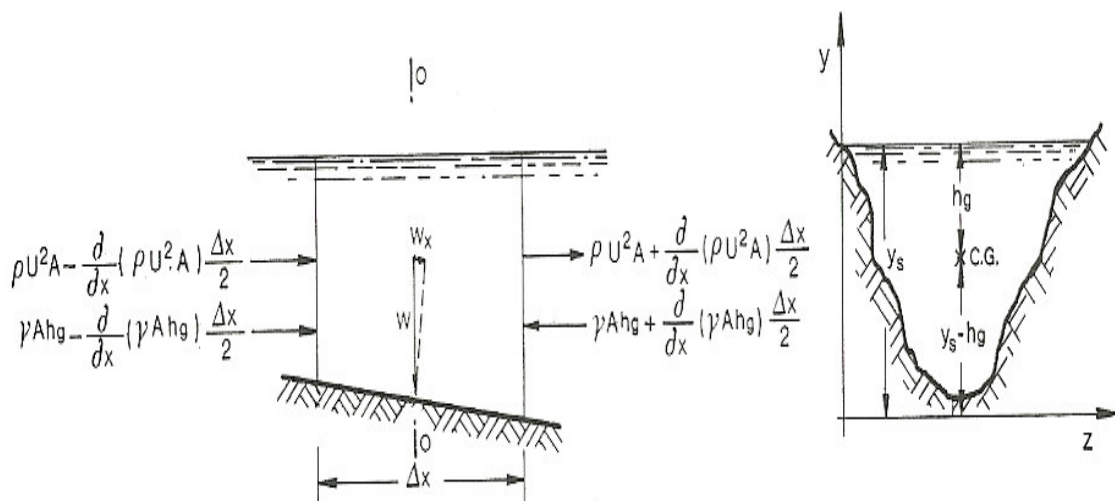


Figura 5_Volume de controlo para a derivação da Equação da Quantidade de Movimento (Cardoso, 1998)

As forças de contacto que atuam segundo x são denominadas forças de pressão, e estas podem ser forças de pressão hidrostática e forças de arrastamento. As forças de pressão hidrostática

atuam nas secções de montante e de jusante e as forças de arrastamento nas paredes laterais e no fundo (Figura 5) (Cardoso,1998).

A equação (11) pode ser também apresentada na seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y_s}{\partial x} + gAJ \quad (12)$$

3.2 Métodos de previsão de caudais de cheias

O estudo de caudais de cheias pode ser elaborado de variadas formas, conforme a sua finalidade. É possível dividir os modelos para previsão de caudais de cheias em empíricos, estatísticos e cinemáticos. O objetivo é obter uma primeira aproximação dos caudais de ponta de cheias ao invés do hidrograma completo.

3.2.1 Métodos empíricos

As equações utilizadas para o cálculo dos caudais de ponta através de métodos empíricos têm por base a experiência e os registos existentes, em função apenas da área da bacia hidrográfica. Ainda são utilizadas nos dias de hoje para o cálculo de cheias em regiões climáticas idênticas para as quais foram deduzidas, quando não existem dados hidrométricos fiáveis.

Sendo o caudal de ponta (Q_p) em (m^3/s), a área da bacia (A) em (Km^2) temos:

- **Fórmula de Pagliaro** (Utilizada em áreas inferiores a $1000 Km^2$)

$$Q_p = A \left(\frac{2900}{90+A} \right) \quad (13)$$

- **Fórmula de Forti** (Utilizada em áreas inferiores a $1000 Km^2$)

$$Q_p = A_b \left(b \frac{500}{A+125} + c \right) \quad (14)$$

b, c - constantes de valor 2,35 e 0,5, respetivamente, para intervalos de uma precipitação máxima diária menor que 200 mm, e valores de 3,25 e 1,00 para uma precipitação máxima diária compreendida entre 200 mm e 400 mm.

- **Formula de Whistler** (Utilizada para áreas entre 1000 e $12000 Km^2$)

$$Q_p = A \left(\frac{1538}{A+259} + 0,054 \right) \quad (15)$$

- **Fórmula de Iskowski**

A fórmula de Iskowski em Portugal, conduz a caudais inferiores aos reais, pelo facto de ter sido deduzida a partir de dados de cheias máximas de rios da Europa Central, com diferentes

bacias hidrográficas e menor número de precipitações intensas de curta e média duração, que contrariam os acontecimentos no nosso país (Lencastre & Franco,1984).

$$Q_p = K * m * I * A \quad (16)$$

K coeficiente variável entre 0,017 e 0,8 (depende da categoria dos solos, da cobertura vegetal e do relevo)

m coeficiente variável com a área da bacia,

I precipitação média anual (m).

3.2.2 Métodos cinemáticos

O tempo de concentração (t_c), corresponde ao tempo do escoamento superficial para a contribuição total da sua bacia hidrográfica, numa dada secção. Pode ser ainda definido como o tempo de uma gota caída no ponto cinematicamente mais afastado da bacia leva a chegar à secção em estudo.

As fórmulas cinemáticas têm em conta as características do escoamento na bacia hidrográfica, expressas em função do tempo de concentração e da chuvada crítica (Lencastre & Franco,1984).

- **Kirpich** propõe a seguinte equação:

$$t_c = 0.0663 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} = 0.0663 * \frac{L^{1.155}}{\Delta H^{0.385}} \quad (17)$$

em que:

t_c tempo de concentração (h),

L comprimento do rio principal (Km),

S declive médio,

ΔH diferença de cotas entre as respetivas extremidades,

A área da bacia hidrográfica (Km^2).

Por vezes é necessário um estudo mais aprofundado em zonas onde não existem canais definidos, o tempo de concentração pode ser determinado através da variação das velocidades e em função do tipo de solo e o seu declive (Lencastre & Franco,1984).

- **Fórmula racional**

A fórmula racional é bastante simples e pode ser utilizada com grande eficiência para bacias com a área inferior a $25 km^2$, no entanto, alguns dos princípios em que se baseia não correspondem à realidade, onde o valor do coeficiente de escoamento não varia para as

diferentes intensidades de chuvadas e é ignorado os efeitos de armazenamento na rede hidrográfica.

$$Q_p = CIA \quad (18)$$

Q_p é o caudal de ponta de cheia (m^3/s),

C é coeficiente de escoamento, baseado no tipo e características da superfície do terreno (1-terreno impermeável e 0-terreno permeável),

I é a intensidade de precipitação para determinada frequência de ocorrência, com duração igual ao tempo de concentração da bacia (m/s),

A é a área total da bacia (Km^2).

A intensidade de precipitação pode ser calculada segundo a equação:

$$I = a \times t_c^b \quad (19)$$

a, b são constantes que dependem do período de retorno e da região,

t_c é o tempo de concentração (s).

- **Fórmula de Giandotti**

O tempo de concentração segundo Giandotti é dado por:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A_b} + 1.5L_b}{0.8\sqrt{h_m}} \quad (20)$$

t_c tempo de concentração (h).

A_b área da bacia hidrográfica (km^2)

L_b comprimento do curso de água principal da bacia (km)

h_m altura média da bacia (m)

O cálculo do caudal de ponta é muito semelhante a fórmula racional, mas o coeficiente de escoamento é determinado em função da área da bacia (Lencastre & Franco,1984).

$$Q_p = \frac{\lambda * A * h}{t_c} \quad (21)$$

h é a altura da precipitação máxima (mm),

λ valores que dependem da área da bacia,

I é a intensidade de precipitação para determinada frequência de ocorrência, com duração igual ao tempo de concentração da bacia (m/s).

- **Fórmula do Soil Conservation Service (SLS)**

$$Q_p = \frac{0.277 * k * A * h_u}{t_p} \quad (22)$$

K é um fator de ponta que pode tomar o valor de 1, caso a bacia seja muito declivosa, e 0.5 se bacia muito plana. O valor intermédio de 0.75 é frequentemente utilizado.

h_u é a altura de precipitação útil (m),

t_p é o tempo para a ponta (h).

Para alturas de precipitação total (h), a altura de precipitação útil (h_u) correspondente é calculada:

$$\text{Para } h < h_0: h_u = \frac{(h-h_0)^2}{h+4*h_0} \quad (23)$$

$$\text{Para } h > h_0: h_u = 0 \quad (24)$$

Em que h_0 corresponde às perdas iniciais da chuvada, antes de se iniciar o escoamento de superfície. Pode ser calculado através da seguinte equação,

$$h_0 = \frac{5800}{N} - 50.8 \quad (25)$$

Sendo;

N o número de escoamento, que depende do tipo hidrológico do solo, da sua utilização e das condições de superfície (Figura 6).

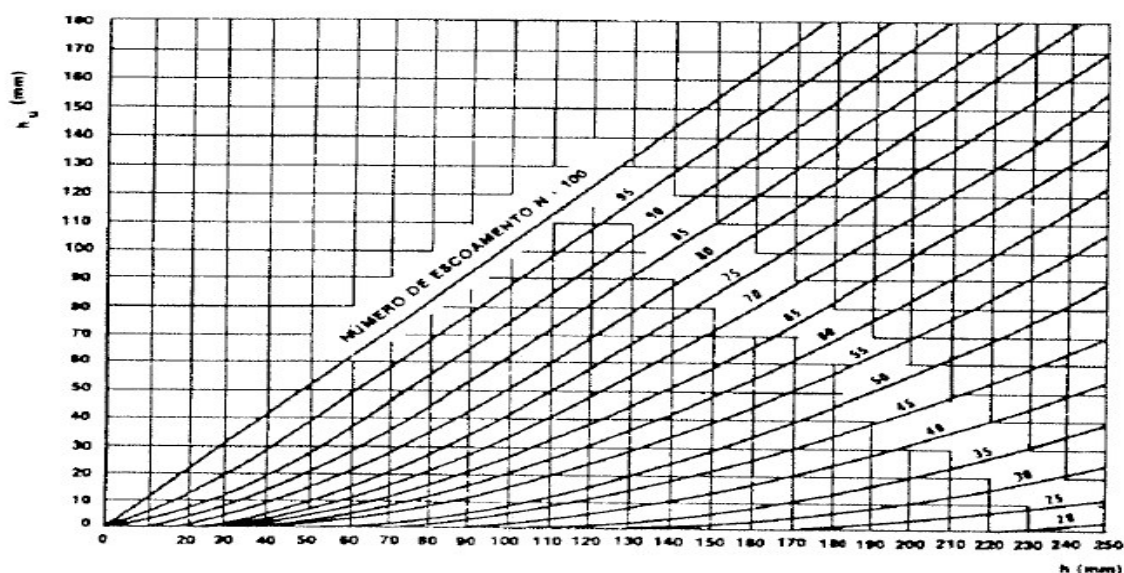


Figura 6_Relação entre a precipitação total e a precipitação útil (Lencastre & Franco, 1984)

Existem 4 tipos hidrológicos de solos segundo a classificação do Soil Conservation Service e são classificados segundo o potencial de escoamento superficial. Variam desde o tipo A, com grande capacidade de infiltração e baixa capacidade de escoamento superficial, até ao tipo D, que possui fraca capacidade de infiltração e consequentemente elevada capacidade de escoamento superficial (Lencastre & Franco, 1984).

- **Formula de Mockus**

A seguinte expressão aplica-se a bacias com tempo de concentração inferior a 4 horas, pois por definição, $(t_r)_{crit} \geq t_c$. Admitindo que o valor máximo Q_p , para uma certa frequência estatística, corresponde á chuvada útil com duração:

$$(t_r)_{crit} = 2 * \sqrt{t_c} \quad (26)$$

3.2.3 Métodos estatísticos

Estes métodos são utilizados em estudos dos caudais de cheia quando é necessária a análise, modelação e projecção de valores de caudais referentes a uma secção, transformando o conjunto das observações numa série estatística, para de seguida determinar funções analíticas que traduzam a distribuição estatística e por fim fazer a extrapolação (previsão probabilística) (Martins, 2013).

- **Método de Foster-Hazen**

O processo de cálculo realiza-se pelas seguintes etapas;

1. Cálculo do caudal médio

$$Q_m = \frac{\sum Q_i}{n} \quad (27)$$

2. Cálculo dos desvios, dos seus quadrados e cubos (V, V^2, V^3)

$$V = \frac{Q}{Q_m} - 1 \quad (28)$$

3. Calcular os somatórios dos caudais e desvios

4. Calcular os coeficientes de dispersão (C_d) e de assimetria (C_a)

$$C_d = \sqrt{\frac{\sum V^2}{n-1}} \quad (29)$$

$$C_a = \sqrt{\frac{\sum V^3}{(n-1)*C_d^3}} \quad (30)$$

5. Correção do coeficiente de assimetria (utilizando a formula de Hazen)

$$C_{a,a} = C_a \left(1 + \frac{8.5}{n}\right) \quad (31)$$

6. Determinar a %T

$$\%T = \frac{100}{T} \quad (32)$$

7. Utilização do coeficiente de assimetria e da %T nas tabelas de Foster-Hazen para retirar o parâmetro K para ser aplicado no calculo do caudal dado por,

$$Q = Q_m * (K * C_d + 1) \quad (33)$$

sendo:

Q_m o caudal médio de cheia,

- n o número de observações feitas,
 V são desvios,
 C_d coeficiente de dispersão,
 C_a coeficiente de assimetria,
 $C_{a,a}$ correção do coeficiente de assimetria,
 Q caudal de cheia pretendido.

- **Método Loureiro**

Loureiro desenvolveu estudos de cheias por todo o país, delimitando zonas com caudais semelhantes. A determinação dos parâmetros baseou-se na aplicação da lei de Gumbel (Lencastre & Franco, 1984).

O cálculo foi realizado com a equação seguinte:

$$Q_p = C \times A^z \quad (34)$$

C e z parâmetros regionais relacionados com o período de retorno.

3.3 Sistemas de Informação Geográficas

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitem a integração e análise dos dados provenientes das mais diversas fontes, como imagens fornecidas por satélites, mapas, cartas climatológicas, entre outros, que caracterizam a variabilidade espacial da bacia hidrográfica num único sistema, por isso, num plano conceptual, pode afirmar-se que os SIG são capazes de apoiar a modelação hidrológica.

A ligação de um SIG e um modelo de simulação dos processos de evaporação, precipitação e escoamento, permite efetuar a previsão do escoamento superficial e simultaneamente analisar a sua distribuição espacial numa bacia hidrográfica (Santos, 2006).

“A visão integrada dos problemas da água, numa bacia hidrográfica, requer uma abordagem assente em múltiplos critérios, para o que os SIG podem constituir uma ferramenta essencial de gestão” (Saraiva, 1999).

É importante que a escolha do tipo de modelo esteja em conformidade com os objetivos definidos e com as simulações a executar. O tipo de informação disponível utilizada no desenvolvimento de um determinado modelo é essencial e o desempenho do modelo é dependente da informação recolhida.

Os SIG's oferecem um conjunto de potencialidades no que se refere à cartografia ambiental, uma vez que a partir de toda a aquisição, manipulação e integração de informação, é possível

a geração de cartas temáticas, possibilitando a relação dos elementos característicos do meio físico com os elementos socioeconómicos da bacia hidrográfica (Faria & Pedrosa, 2005).

Num contexto geral, podem-se identificar os seguintes componentes num SIG (Figura 7):

- Interface com usuário;
- Entrada e integração de dados;
- Consulta, análise espacial e processamento de imagens;
- Visualização e impressão;
- Armazenamento e recuperação de dados (organizados sob a forma de um banco de dados geográficos).

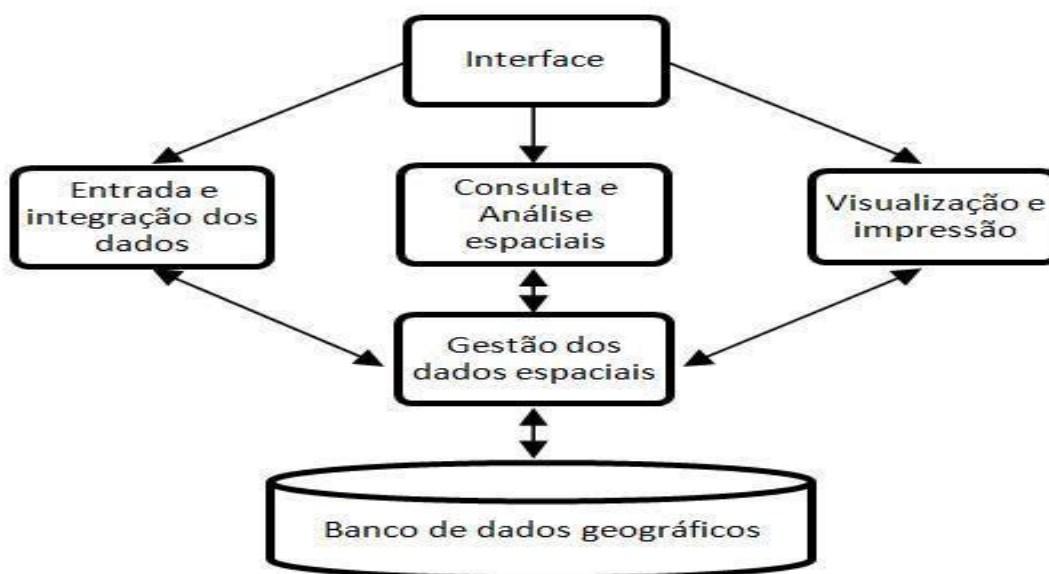


Figura 7_Componentes de um SIG (adaptado de Santos et al. 2014)

3.3.1 Ferramentas de modulação geográfica

A incorporação de SIG nesta dissertação teve como principal objetivo a utilização da ferramenta que possibilita a utilização do método de Thiessen. AutoCAD é um software do tipo CAD, criado e comercializado pela AutoDesk desde 1982. É utilizado principalmente para a elaboração de peças de desenho técnico em duas e três dimensões, para além de vários recursos em visualização de diversos formatos.

O método de Thiessen considera a não uniformidade da distribuição espacial dos postos de precipitação, mas não tem em consideração o relevo da bacia (Tucci, 2004).

A metodologia consiste no seguinte:

1. Ligar os postos por trechos retilíneos;

2. Traçar linhas perpendiculares aos trechos retilíneos passando pela mediatriz da linha que liga os dois postos;

3. Prolongar as linhas perpendiculares até encontrar outra linha.

O denominado polígono de Thiessen é formado pela interseção das linhas, correspondendo à área de influência de cada posto. O método dos Polígonos de Thiessen permite determinar áreas de influência de um determinado posto pluviométrico. Considera-se que no interior dessas áreas a altura pluviométrica é a mesma do respetivo posto, e desconsidera-se a área do polígono fora da bacia (Andrade, 2008).

A precipitação média na bacia é calculada pelo método de Thiessen de acordo com a seguinte expressão:

$$Pm = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad (35)$$

sendo:

Pm é a precipitação média na bacia (mm);

Pi é a precipitação no posto i (mm);

Ai é a área de influência do posto;

A é a área total da bacia.

Na aplicação do método de Thiessen, para determinação da área de influência de cada posto pluviométrico, foram traçados os polígonos de Thiessen, e considerou-se apenas a área de influência dos mesmos dentro da bacia em questão.

3.4 Software de Modelação Hidrodinâmica e Hidrológica

Existem diferentes soluções de *software* disponível para modelação hidrológica e hidrodinâmica que resolvem numericamente as equações de escoamentos em superfície livre. São vários os programas que poderão ser utilizados neste tipo de trabalho destacando-se alguns daqueles com maior número de aplicações, como o SOBEK da Deltares, o RRL do Catchment Hydrology's Predicting Catchment Behaviour Research Program, o MIKE 11 da DHI Water & Environment e o HEC- RAS da USACE.

3.4.1 Sobek

No presente trabalho, tendo em conta os objetivos finais, foi selecionado o programa SOBEK para a modelação hidrodinâmica e hidrológica. O software de modelação SOBEK foi desenvolvido por (WL)Delft Hydraulics. Os modelos criados com o programa SOBEK poderão ser incluídos no Delft-FEWS (Flood Early Warning System) sendo utilizado para previsão hidrológica e sistemas de alerta.

O SOBEK é um software complexo e robusto baseado nas equações de Saint Venant utilizado em diferentes aplicações e estudos: na previsão de cheias, na resolução de problemas de modelação hidrodinâmica, na reabilitação de sistemas fluviais e de drenagem, controlo de sistemas de irrigação, projeto de redes de esgotos, morfologia de leitos de rios, intrusão salina e qualidade de águas superficiais.

O programa é constituído por sete módulos, sendo eles: hidrologia, hidrodinâmica em canais/rios, redes de águas residuais, controlo em tempo real, qualidade da água e previsão de áreas inundáveis, que permitem a simulação de problemas envolvendo vários destes módulos em simultâneo. É capaz de fazer simulações 1D e 2D através de um eficiente algoritmo de solução numérica denominado grau mínimo com solução iterativa.

Para além das equações de Saint Venant são ainda utilizadas na construção de modelos unidimensionais, expressões adequadas ao cálculo das características de escoamento em estruturas como por exemplo pontes, passagens hidráulicas, bombas, etc.

Nestas estruturas o escoamento depende dos níveis a montante e a jusante da estrutura, das suas dimensões e de um conjunto de parâmetros específicos de cada uma delas (Pinho, et al., 2011). O programa permite uma abordagem integrada sendo possível trabalhar com vários módulos em simultâneo.

O software calcula o caudal e a altura de água em redes simples ou complexas, podendo ser constituídas por um elevado número de canais, secções e estruturas. É possível definir diferentes tipos de condições de fronteira, bem como definir as entradas e saídas laterais usando séries temporais ou fórmulas. O processo de precipitação/escoamento em áreas urbanas também é possível de se modelar, existindo vários tipos de áreas que poderão ser consideradas, pavimentadas ou não pavimentadas, tendo em conta o uso do solo, a zona não saturada, as águas subterrâneas, a ascensão capilar e a interação com os cursos de água com escoamentos com superfície livre. Para a qualidade da água e problemas ambientais o uso do módulo de Qualidade da Água oferece possibilidades quase ilimitadas.

No programa SOBEK temos a vantagem de se poder sobrepor a rede criada sobre um mapa (GIS ou foto aérea) onde é possível ver os canais, reservatórios, barragens, estações de bombagem, estações de tratamento, áreas urbanas e rurais, permitindo desta forma, o ajuste ou a modificação da rede conforme as necessidades. Através de opções de animação e vista lateral podemos observar a direção do escoamento na rede.

Para a modelação unidimensional, a construção de modelos é feita utilizando a opção SOBEK-Rural, SOBEK-Urban e SOBEK-River, mas para 2D pode ser utilizado a opção SOBEK Overland Flow.

O programa SOBEK Rural incorpora quatro módulos: hidrodinâmico, hidrológico, qualidade da água e controlo em tempo real.

O programa SOBEK Urban constitui uma ferramenta de modelação abrangente para sistemas de drenagem urbanos simples ou complexos compostos por esgotos e canais abertos. Permite criar modelos de infraestruturas em novas áreas urbanas ou analisar e melhorar as existentes. O cálculo é extremamente rápido, independentemente da dimensão das redes. Além disto o programa SOBEK Urban oferece praticamente qualquer opção de controlo em tempo real de bombas e comportas. É a ferramenta ideal para a conceção, gestão e renovação de sistemas de esgotos urbanos.

Em semelhança com o SOBEK Rural, também é possível conjugar o programa SOBEK com ferramentas SIG para se desenhar uma rede ou corrigir eventuais problemas.

O programa SOBEK River foi desenvolvido para simulação de sistemas fluviais e estuários simples e complexos. É capaz de simular os escoamentos, a qualidade da água e as alterações morfológicas, estuários e outros tipos de redes de canais aluvionares. As redes podem ser ramificadas ou emalhadas. Permite trabalhar com perfis transversais complexos compostos por várias subsecções. A interface baseada em Windows torna-o fácil de usar. A visualização direta da rede fluvial possibilita uma visão global do sistema a analisar.

A utilização do programa SOBEK é bastante acessível e clara, sendo necessário apenas o conhecimento de algumas regras de funcionamento. O software permite criar um projeto, abrir ou editar um já existente e ainda permite tomar notas que poderão ser relevantes para o projeto.

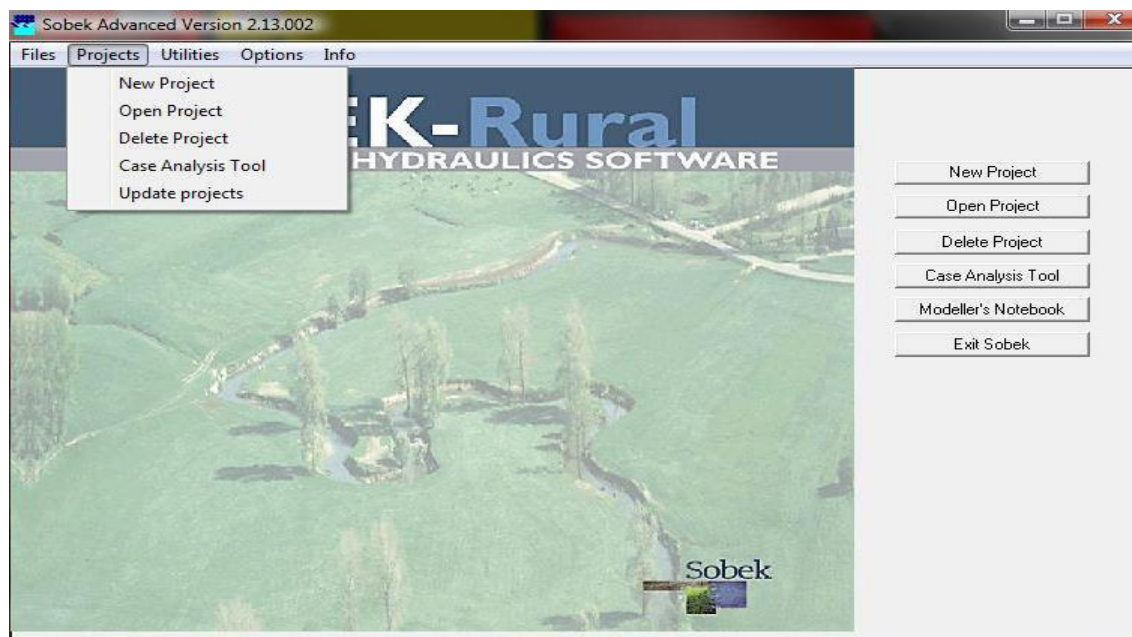


Figura 8_Display de entrada no SOBEK

Criando um novo projeto ou abrindo um já existente, será apresentada ao utilizador, a interface da ferramenta de gestão de casos, que consiste na organização dos diferentes casos de estudo existentes em cada projeto e que permite controlar todas as variáveis inerentes ao mesmo.

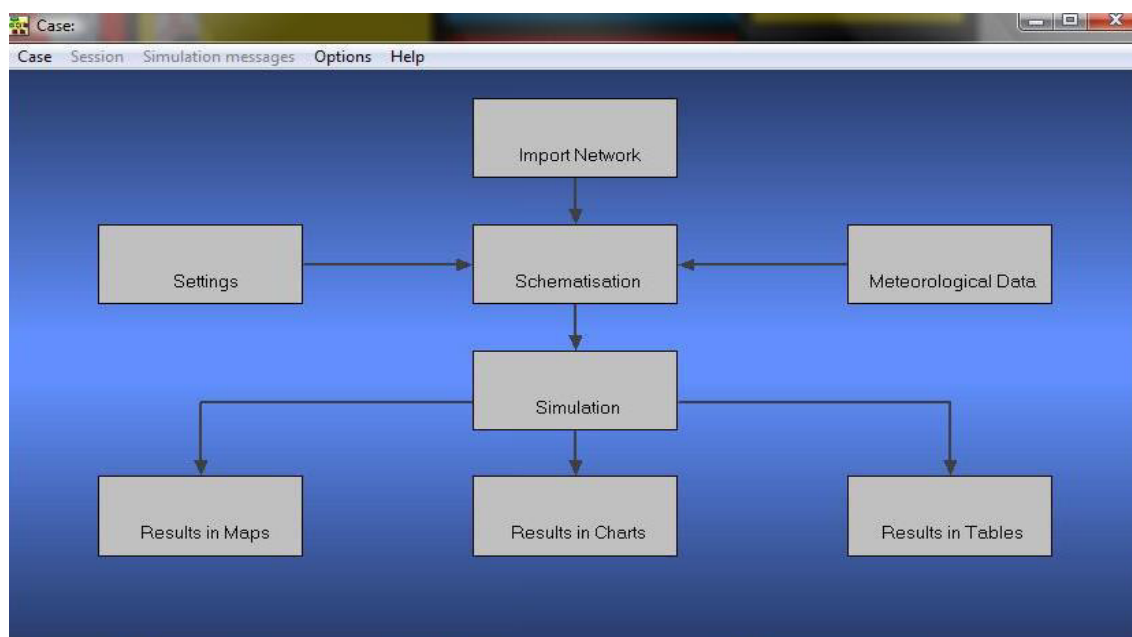


Figura 9_Janela de gestão de casos, SOBEK

Cada bloco na ferramenta de gestão de casos representa uma tarefa na modelação. O bloco Import network permite a importação de um modelo de um outro programa que seja compatível com o SOBEK. Em Settings é possível seleccionar o tipo de modelo desejado a partir das opções disponíveis e já referidas bem como as condições de simulação do próprio modelo.

É ainda possível inserir dados meteorológicos tais como a precipitação a evaporação ou o vento utilizando o Meteorological Data. Uma das tarefas mais importantes a ser executada é o Schematization, uma vez que permite inserir ou editar modelos e os dados das diferentes estruturas que o compõem. A tarefa Simulation é a responsável por fazer a simulação com os dados introduzidos. Os blocos Results in maps, Results in charts e Results in tables, têm como função apresentar os resultados das simulações.

Os sentidos das ligações entre os blocos indicam quais as tarefas que deverão ser executadas em primeiro lugar e as que serão executadas subsequentemente. Nesta ferramenta é possível abrir, criar, copiar ou apagar diversos casos no mesmo projeto. Para tal basta aceder ao menu Case localizado na zona superior esquerda do ecrã.

Após a abertura ou criação de um caso os blocos de tarefas poderão adotar três cores diferentes, amarelo, vermelho e verde, sendo que quando estes permanecem em cinzento significa que nenhum caso foi selecionado ou definido.

Enquanto o amarelo autoriza a execução da tarefa, o vermelho proíbe-a, uma vez que necessita de execução prévia das tarefas precedentes (amarelas). Aquando da execução das tarefas, estas permanecerão em roxo e uma vez concluídas ficaram a verde.

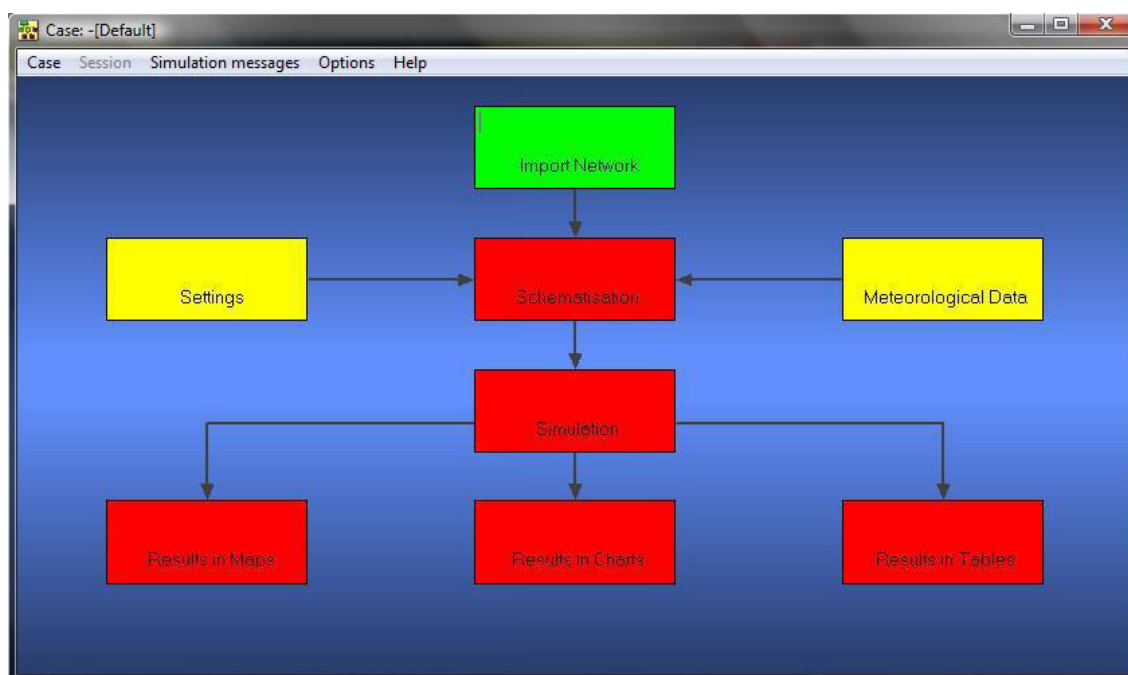


Figura 10_Janela de gestão de casos após abrir/criar um novo caso, Sobek

Inicialmente para se ativar o módulo hidrológico do Sobek tem de se aceder à janela “*settings*” e seleccionar o módulo RR (Rainfall-Runoff), onde a partir deste momento poderão ser adicionados os nós de sacramento correspondentes ao módulo hidrológico.

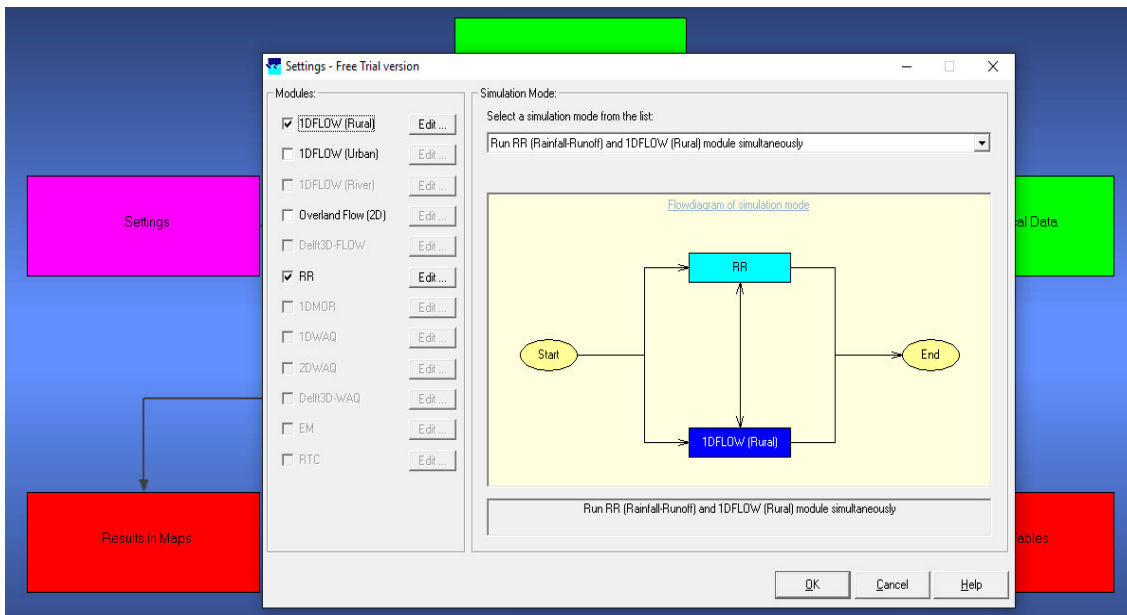


Figura 11_Janela Settings, Sobek

Dependendo do objetivo do modelo e dos dados recolhidos procede-se às definições da calibração do modelo onde são definidas as condições iniciais do sistema, como a definição de um volume de água inicial e o intervalo de tempo para a calibração

A construção do modelo fica completa com a importação dos valores de precipitação e evaporação para o Sobek de modo a ser possível iniciar o processo de validação do modelo. No caso da precipitação, selecciona-se a janela “*Meteorological Data*” no menu principal, onde aparecerá uma janela com os vários dados que se pode inserir que são: Precipitação, Evaporação, Vento e Temperatura. Para o estudo apenas se considerou os dados de precipitação e evaporação. No caso da precipitação, terá de se criar um novo evento de precipitação, “*Precipitation*New event*”, definindo-se o número de estações, que representam os nós de Sacramento que existem no modelo e define-se o início e fim do evento. Os valores são introduzidos fazendo *copy-paste* das folhas de cálculo Excel com as séries de precipitação recolhidas no SNIRH. Completando este passo cria-se um ficheiro com a extensão *.bui* que corresponde ao evento de precipitação. Na evaporação, inicialmente escolhe-se o termo dos valores do período de precipitação escolhido anteriormente, referentes às series retiradas da plataforma web SNIRH, onde os valores são introduzidos, no intervalo de tempo da série de precipitação, fazendo *copy-paste* das folhas de cálculo Excel. A evaporação é inserida diretamente para o respetivo período a simular.

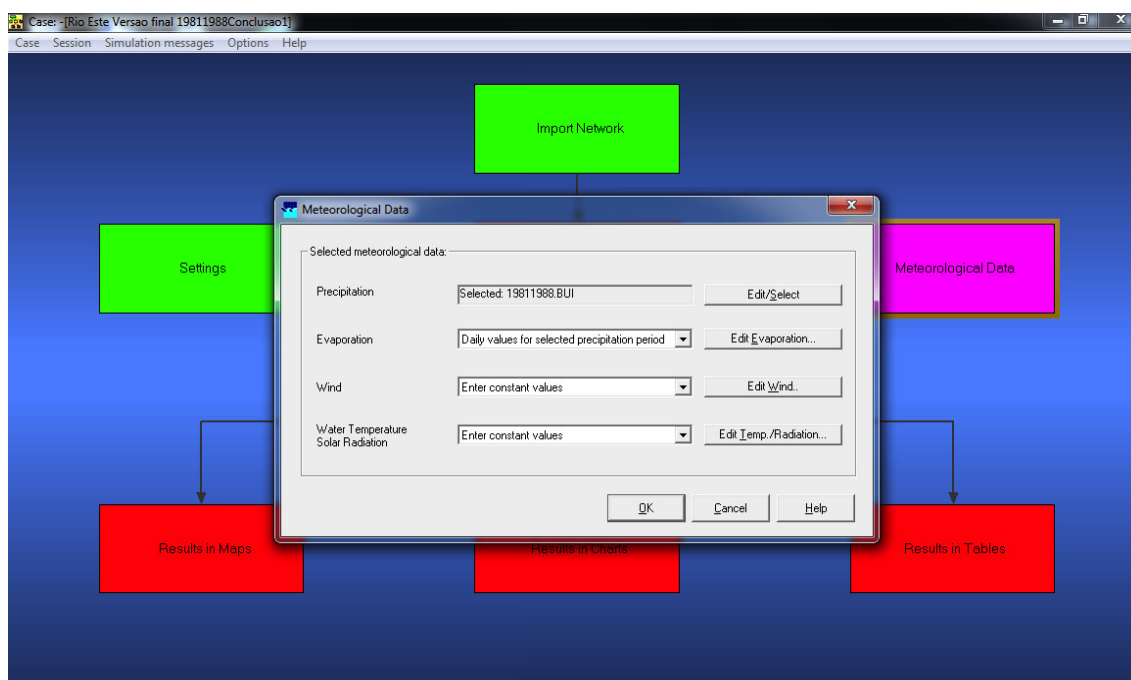


Figura 12_Criação de um evento de precipitação, Sobek

Para efetuar uma simulação terá de se criar um evento de precipitação e evaporação para um determinado período de tempo que pretenda simular. As séries, tanto de precipitação como de evaporação apresentam valores diários, e para o efeito escolheu-se um intervalo de tempo diário e a calibração média horária para obter um maior número de resultados.

Posteriormente, já no modelo hidrodinâmico, procede-se à inserção da área de influência e a respetiva série de precipitação, para determinado período, em cada nó de Sacramento. Para inserir uma determinada área num nó de Sacramento é necessário selecionar o nó e com o botão direito do rato escolher '*Model Data*'/'*Rainfall Runoff Data*' e inserir a respetiva área (*surface*) correspondente e dados de calibração correspondentes. Os valores das áreas dos nós de Sacramento são determinados com a ajuda do AutoCad.

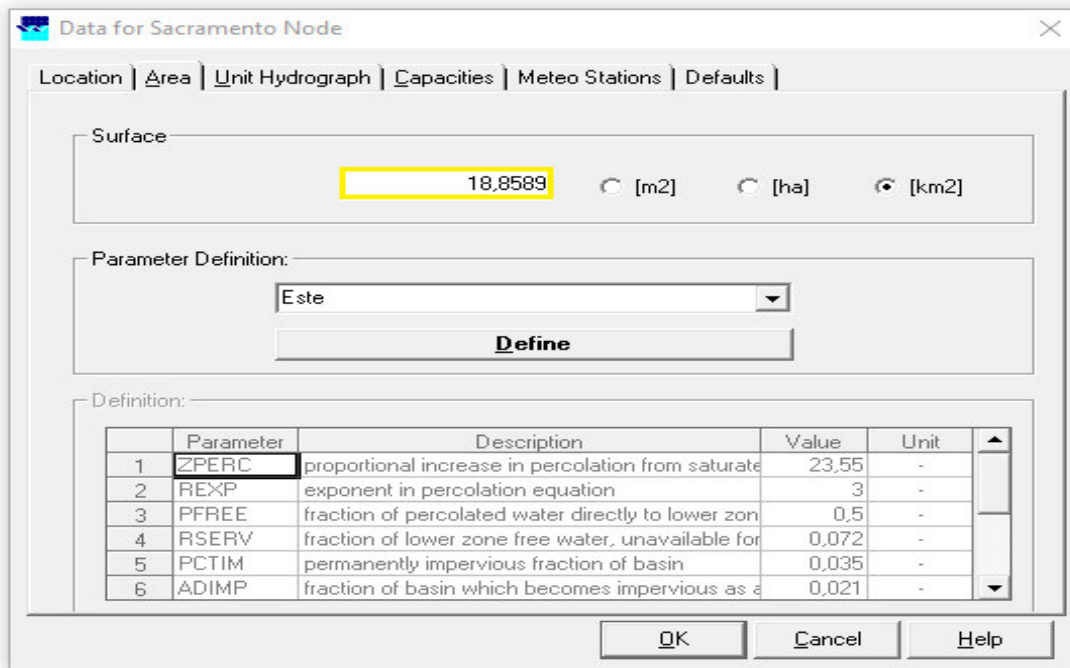


Figura 13_Adicionar área no nó de Sacramento, Sobek

Para a inserção dos valores do modelo hidrológico, obtidos anteriormente através da calibração no Rainfall Runoff, é necessário definir os valores, uma parte deles na mesma janela na opção 'Parameter Definition' (Figura 14) e os restantes na janela 'Capacities'(Figura 15).

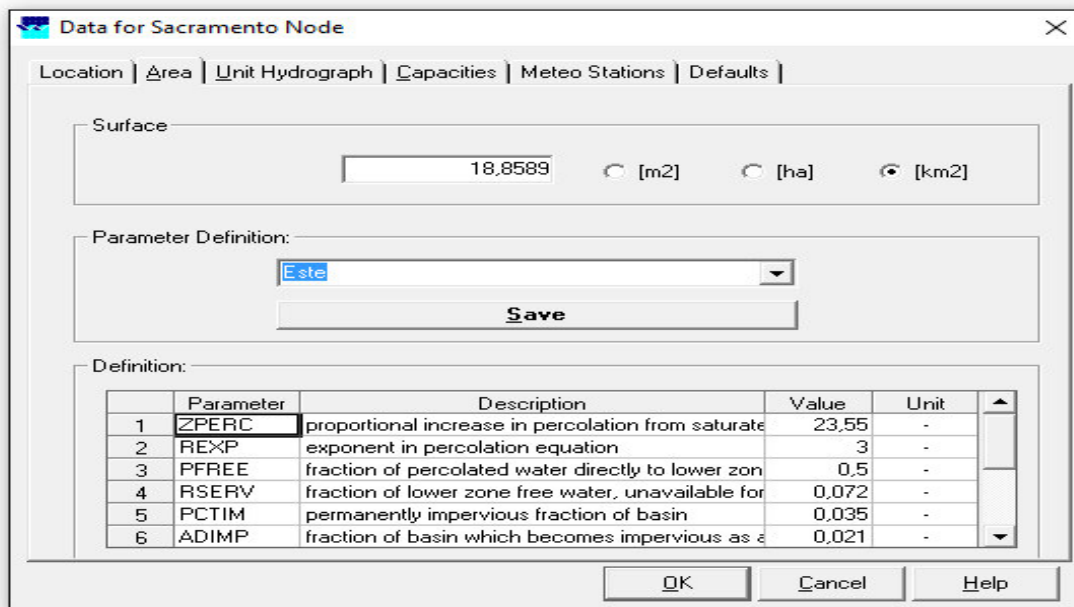


Figura 14_Adicionar resultados RRL no nó de Sacramento, Sobek

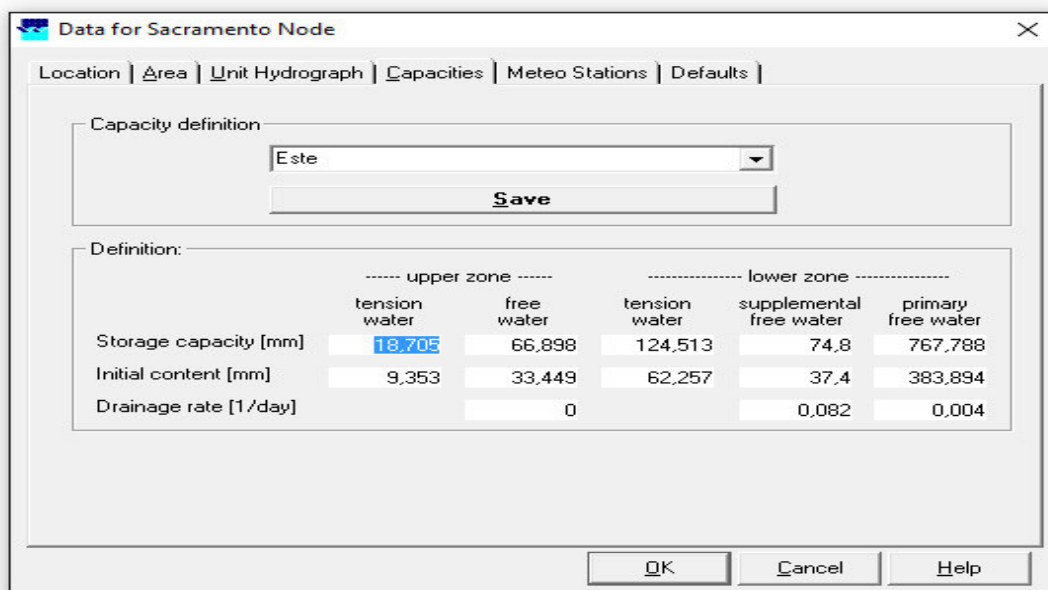


Figura 15_Agregar resultados RRL no nó de Sacramento, Sobek

O Sobek permite ainda fazer um ‘Side View’ de cada trecho da bacia do rio Ave para analisar o traçado que foi modelado. No menu principal em ‘schematisation’ pode-se seleccionar o ponto inicial que se pretende fazer ‘Side View’ e com o *shift* pressionado seleccionar o ponto final seleccionando assim todo trecho. Posteriormente com o botão direito do rato vamos escolher a opção ‘Side View’. Nas Figuras 16 e 17 podemos observar o “Side View” de cada um dos rios estudados, o Rio Este e o Rio Selho, respetivamente.

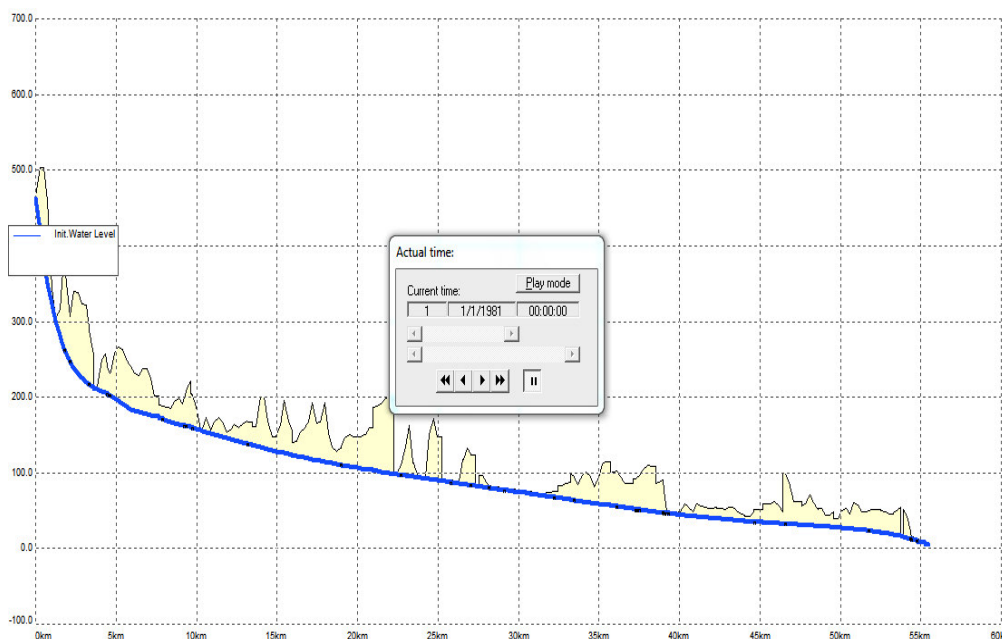


Figura 16_Vista de perfil do Rio Este, Sobek

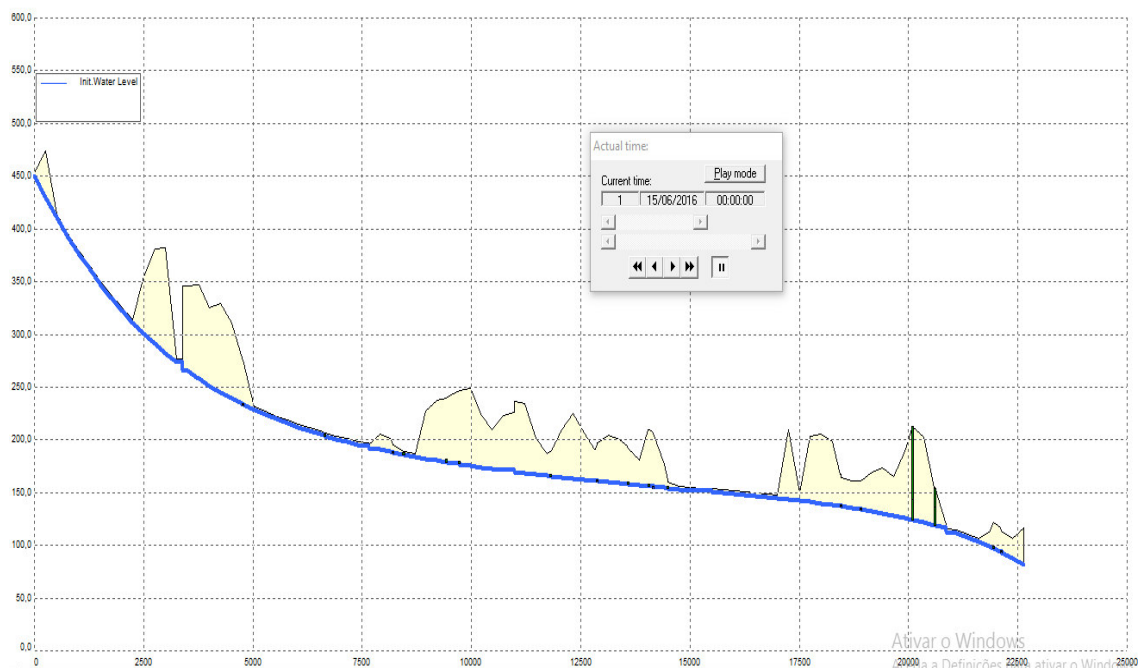


Figura 17_Vista de perfil do Rio Selho, Sobek

3.4.2 Rainfall Runoff Library – Modelo Sacramento

O software RRL foi desenvolvido na Austrália, pelo Catchment Research Center for Catchment Hydrology, em 2002. O modelo Rainfall Runoff permite calcular o escoamento instantâneo total, utilizando como dados de entrada a precipitação média na bacia e a evapotranspiração potencial (Pinho & Vieira, 2006).

São de esperar erros na previsão dos caudais devido a, previsões de precipitação incorretas, erros na estimativa da chuva média sobre a bacia, erros na formulação no modelo e erros nas estimativas de evaporação (Neto et al., 2007).

A implementação do modelo é feita através da divisão da captação em segmentos interligados por um canal. Nos segmentos a precipitação é transformada em escoamento, e dentro de cada segmento é considerada homogénea a precipitação e as características da bacia (Figura 18).

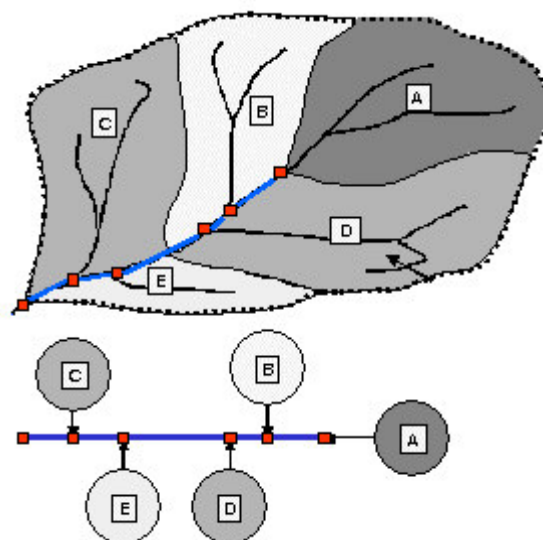


Figura 18_Exemplo de implementação do modelo (WL, 2005)

O módulo de hidrologia do software SOBEK denominado de Rainfall Runnoff inclui o modelo de Sacramento. O modelo de Sacramento divide o solo em duas camadas principais, sendo que na camada superficial ocorrem os processos de evaporação, percolação e escoamento superficial e na camada interior ocorrem os processos de transpiração, recarga do aquífero e escoamento de base.

O princípio de funcionamento do modelo pode ser resumido da seguinte forma, a água é armazenada numa porção de solo como água sob tensão superficial, até que a sua capacidade de armazenamento seja atingida, a partir desse momento, toda a água adicionada ao sistema será armazenada como água livre. A variação do volume de água sob tensão superficial ocorre através de evaporação ou transpiração, enquanto a água livre também sofre decaimento devido à percolação da camada superior para a camada inferior.

O caudal instantâneo corresponde ao somatório dos seguintes escoamentos:

- Escoamento direto, proveniente da precipitação que cai sobre a superfície impermeabilizada da bacia;
- Escoamento superficial, proveniente da chuva após a saturação do solo;
- Escoamento sub-superficial em função do grau de saturação parcial da subzona de água livre da camada superior;
- Escoamento de base primário e suplementar, proveniente da subzona de água livre primária e suplementar da camada inferior.

O modelo é composto por uma série de reservatórios com o intuito de simular as capacidades de armazenamento do solo. Os diferentes tipos de reservatórios existentes são reservatório de água,

- sob tensão superficial da camada superior que representa o volume de água que pode ser adicionado ao solo antes que qualquer elemento de água se encontre livre;
- livre da camada superior que representa o volume de água que se escoar no solo, dando origem ao escoamento sub-superficial;
- sob tensão superficial da camada inferior que se refere ao volume de água necessário para satisfazer as necessidades de humidade do solo que fica retida por atracção molecular;
- livre da camada inferior - volume de água que preenche os vazios do solo na camada inferior e é responsável pela geração do fluxo de base.

À medida que se adiciona água proveniente dos eventos de precipitação estes reservatórios são preenchidos, simulando a infiltração da água no terreno, e numa primeira parte a água é totalmente absorvida até que seja atingido o ponto de saturação estando a água sob tensão superficial, quando a quantidade máxima de água sob tensão superficial num solo é atingida, todas as moléculas de água que lhe sejam adicionadas ficarão livres. O esvaziamento ocorre por percolação, evaporação ou drenagem lateral e no modelo é possível dividir a área da bacia em regiões permeáveis e impermeáveis.

A área da bacia hidrográfica é dissociada em duas frações: a permeável e a impermeável. No modelo de Sacramento a parcela correspondente à área impermeável da bacia não é constante, podendo sofrer alterações consoante as condições de humidade da bacia. Esta fração tem como objetivo simular a área impermeável adicional gerada pelo preenchimento de pequenos reservatórios e percursos temporários de fluxo de água lentos, que fazem com que as características de impermeabilidade sofram variações à medida que a superfície do solo se torna húmida. Existem três áreas definidas no modelo, sendo elas:

- permeável: áreas que produzem escoamento superficial apenas quando a intensidade de chuva é superior à capacidade de infiltração do solo;
- permanentemente impermeável: áreas cobertas por rios ou lagos que produzem escoamento direto independente da intensidade da chuva;
- ocasionalmente impermeável: fração da bacia que se torna impermeável quando a capacidade de capilaridade for atingida.

Resumidamente o modelo de Sacramento é constituído por duas componentes, água livre e água sobre tensão superficial, camada inferior e superior e respetivos tipos de escoamentos (Figura 19).

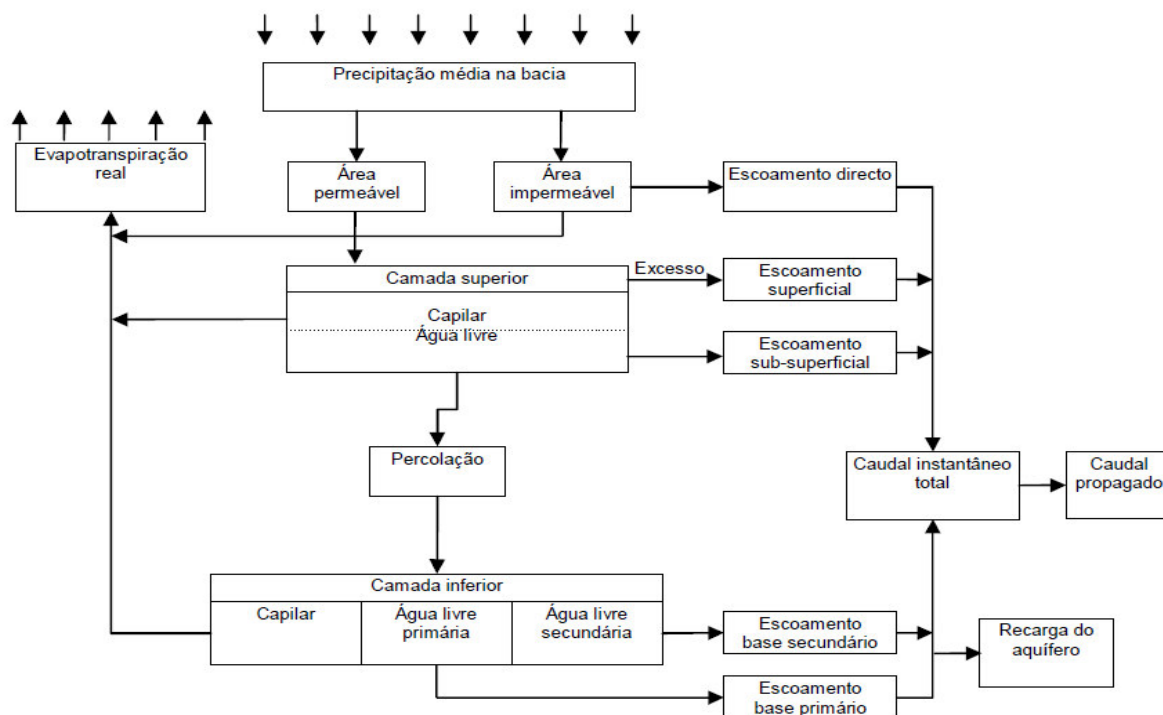


Figura 19_Esquema de funcionamento do modelo hidrológico de Sacramento (Pinho & Vieira,2006)

O *software* RRL contém cinco modelos precipitação-escoamento, oito algoritmos de otimização global para calibração automática, dez tipos de funções objetivo, baseadas em diferentes métricas de avaliação de desempenho dos modelos, três tipos de transformação de dados para comparação entre dados observados e dados simulados e uma interface gráfica de visualização de resultados. (Podger, 2004).

Um modelo hidrológico é calibrado escolhendo um dos modelos precipitação-escoamento e combinando os algoritmos de otimização com as funções objetivo. (Podger, 2004)

Os cinco modelos precipitação-escoamento disponibilizados são:

- AWBM
- Sacramento
- Simhyd
- SMAR
- TANK

O programa RRL é de simples utilização no processo de calibração. Os modelos hidrológicos das bacias do rio Este e do rio Selho foram calibrados para as sub-bacias onde se situam as estações hidrométricas: em Ponte Junqueira e em Ponte Brandão, respetivamente. São os únicos locais onde existem registos históricos de caudais.

Os dados de originais todas as séries de precipitação, evaporação e caudais retirados do SNIRH não são legíveis diretamente pelo *software* RRL. É necessário proceder a uma alteração do formato dos ficheiros. Utilizou-se a aplicação Notepad ++ para a transformação em ficheiros .silo5, formato admissível no programa.

Atualmente, estas estações, como já foi referido, encontram-se inativas, pelo que a calibração foi efetuada para períodos históricos em que as três séries de dados necessários estavam disponíveis. O período escolhido para o evento no rio Este, ocorreu entre 6 de Agosto de 1997 e 8 de Junho de 1998; para o evento no rio Selho, ocorreu entre 6 de Agosto de 1989 e 8 de Junho de 1990. Foi utilizado um intervalo de simulação de 24 horas quer para os cálculos quer para os resultados em ambas as bacias.

Uma vez inseridas as séries de dados hidrológicos necessárias (precipitação, caudais e evapotranspiração), será necessário inserir a área de cada bacia a calibrar no *software* RRL. A bacia do Este tem o valor de $228,8 \text{ Km}^2$ e a bacia do Selho tem o valor de $67,9 \text{ Km}^2$. Na Figura 20 apresenta-se janelão formulário do software RRL no qual deverá ser inserido o valor da área da bacia a calibrar.

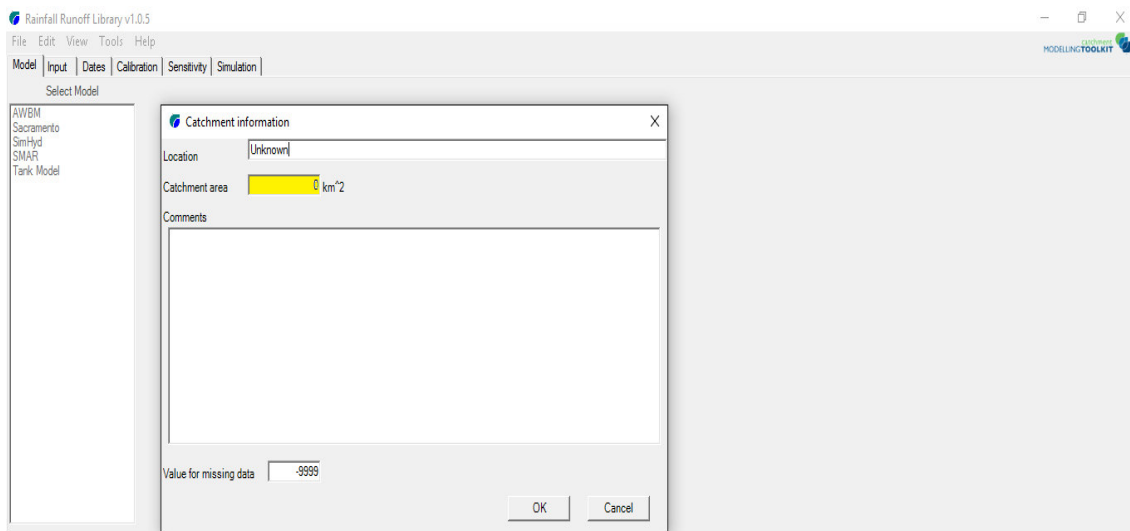


Figura 20_Inserção da área da bacia a calibrar, RRL

Depois de inserida a área deve-se escolher o modelo hidrológico (dentro dos cinco anteriormente identificados), sendo que se selecionou o modelo de Sacramento como já foi referido anteriormente (Figura 21).

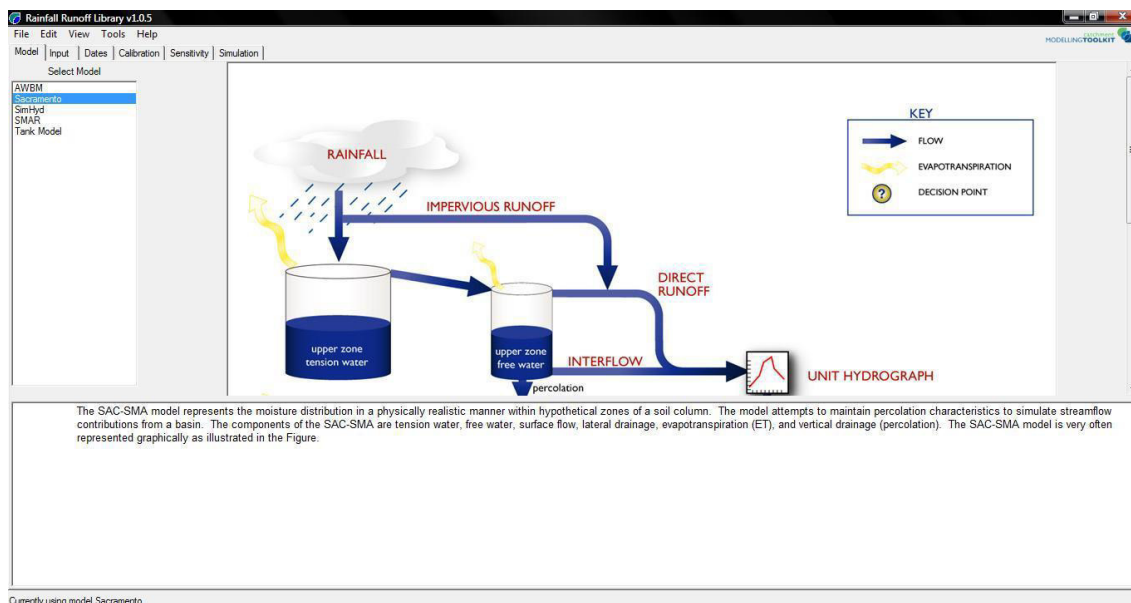


Figura 21_Software RRL: formulário de seleção do modelo hidrológico.

A inserção no RRL das séries de precipitação, caudais e evaporação é realizada através de uma interface específica do programa, após o necessário processamento dos dados retirados do SNIRH (Figura 22). Todas as séries devem estar num formato reconhecido pelo software, como o formato .silo5 utilizado, obtido da ferramenta Notepad++. O processo é muito simples, onde apenas é necessário arrastar o ficheiro para cima dos respetivos gráficos, sendo que é necessário definir as unidades das variáveis utilizadas em cada série.

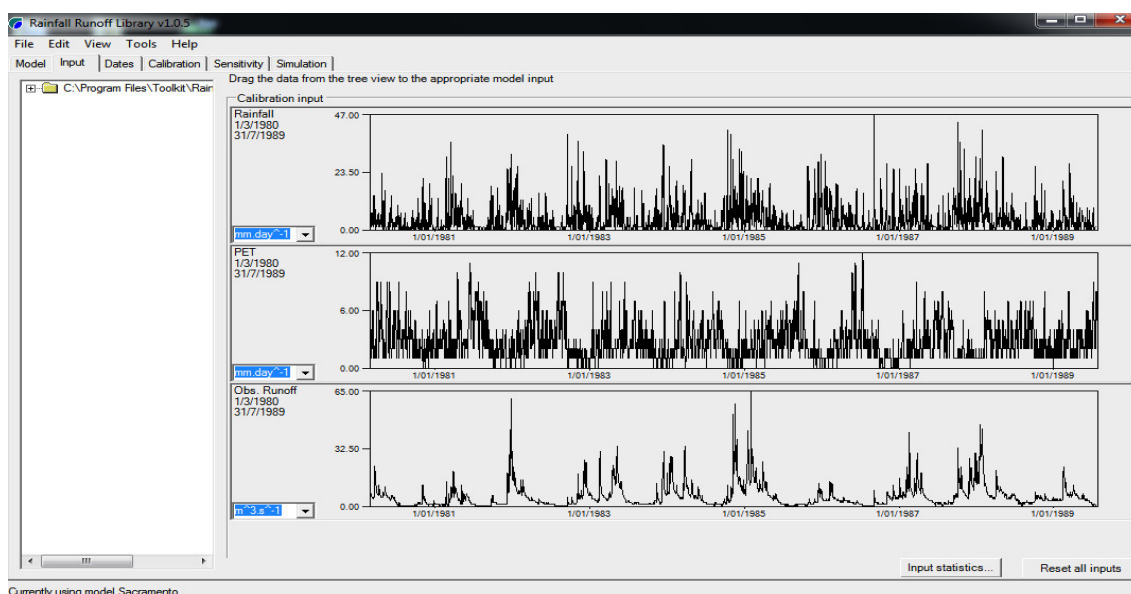


Figura 22_Séries de Precipitação, Evaporação e Caudal, RRL

O utilizador tem a possibilidade de seleccionar entre 18 opções distintas, combinando funções de erro (objetivo) e métodos de otimização. (Figura 23) A escolha da função objetivo e do

algoritmo de otimização é uma etapa fundamental para que o modelo tenha um bom desempenho.

A otimização traduz-se na procura do valor de uma variável ou de múltiplas variáveis que propicie o melhor resultado para uma função dependente dessas variáveis, representando o objetivo desejado, a denominada função objetivo (Celeste & Chaves, 2014). O objetivo da função objetivo é aproximar os valores de caudal calculados e observados, minimizando ao máximo a diferença entre eles.

Os oito algoritmos de otimização global para a calibração incluídos no *software* são:

- Uniform random sampling
- Pattern search
- Multi start pattern search
- Rosenbrock search
- Rosenbrock multi-start search
- Genetic algorithm
- Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)
- AWBM custom optimizer

E por fim as funções objetivo disponíveis são:

- Critério Nash-Sutcliffe
- Soma dos quadrados dos erros
- Raiz quadrada da média dos erros quadrados
- Média da raiz quadrada das diferenças
- Valor absoluto do somatório das diferenças entre valores observados e valores simulados
- Soma das raízes quadradas das diferenças
- Soma do quadrado das diferenças da raiz quadrada
- Soma das diferenças entre logaritmos dos valores observados e simulados

Existem ainda três opções disponíveis na calibração, baseadas em duas funções objetivo adicionais:

- Percentagem de diferença entre escoamento observador e escoamento simulado
- Curva duração escoamento
- Base flow method 2

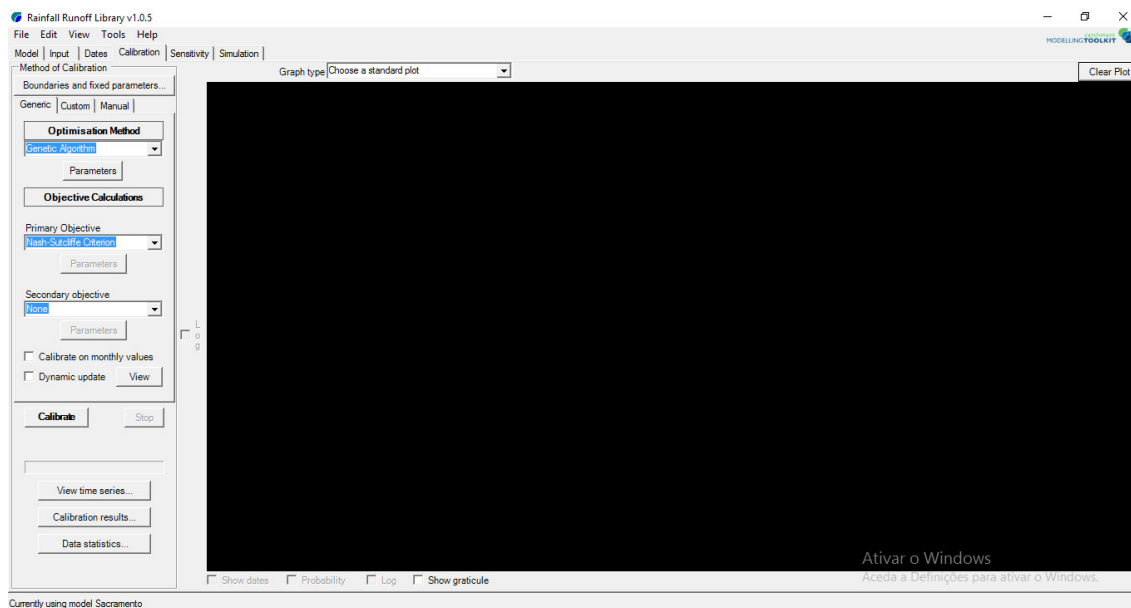


Figura 23_Escolha do algoritmo de otimização e respetiva função objetivo, RRL

Como resultados, o RRL fornece a série de caudais simulados, os valores dos parâmetros encontrados, os coeficientes de correlação e eficiência, os gráficos de dispersão dos caudais diários e mensais e os gráficos de comparação entre os valores de caudais observados e simulados.

Finalizado o processo de calibração com a ferramenta RRL retiram-se os valores dos parâmetros da calibração, para sua utilização no modelo hidrológico construído com o programa Sobek. O modelo de Sacramento utiliza um total de 16 parâmetros para simular o balanço de água (Tabela 2).

Destes:

- 5 definem o volume dos reservatórios de armazenamento da água no solo;
- 3 relacionam-se com taxas de descargas laterais;
- 3 com a água de percolação dos reservatórios superiores para os inferiores;
- 2 permitem calcular o escoamento direto
- 3 relacionam-se com as perdas no sistema

Tabela 2_Parâmetros de Sacramento (Podger, 2004)

UZTWM	Mm	Capacidade máxima de armazenamento superior de água de tensão superficial
UZFWM	Mm	Capacidade máxima do armazenamento superior de água livre
UZK	Dia-1	Coefficiente de depleção lateral na zona superior de água livre
ZPERC		Taxa de percolação mínima e máxima
REXP		Parâmetro de forma da curva de percolação
LZTWM	Mm	Capacidade máxima do armazenamento inferior de água de tensão superficial
LZFSM	Mm	Capacidade máxima do armazenamento inferior suplementar de água livre
LZFPM	Mm	Capacidade máxima do armazenamento inferior primário de água livre
LZSK	Dia-1	Coefficiente de depleção lateral da zona inferior suplementar de água livre
LZPK	Dia-1	Coefficiente de depleção lateral da zona inferior primária de água livre
PFREE		Fração da água percolada da zona superior que vai direta para a zona de água livre inferior
PCTIM		Fração de área constantemente impermeável na bacia
ADIMP		Fração máxima de uma área impermeável adicional devido a saturação
SARVA		Fração de área coberta por mata ciliar na bacia
SIDE		Taxa de percolação das camadas inferiores de água livre
RSERV		Fração da água livre da zona inferior que não é transferível para a zona de água de tensão superficial
SSOUT	m ³ /s/km ²	O volume do fluxo que pode ser transportado por um material poroso no leito do rio.

3.4.3 HEC-RAS

O programa River Analysis System (RAS) foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) of the U.S. Army Corps of Engineers e é frequentemente denominado de HEC-RAS. Este software utiliza um sistema integrado, desenvolvido para uso iterativo num ambiente de multitarefas. O sistema é constituído por uma interface gráfica (GUI), por componentes de análise hidráulica, pela capacidade de armazenamento e gestão de dados, e por gráficos e relatórios de tarefas.

O HEC-RAS é utilizado para cálculos unidimensionais de escoamento superficiais permanentes e não permanentes, cálculo do transporte sedimentar e análise de qualidade.

Os modelos de cálculo utilizados são baseados na equação de energia unidimensional. As perdas de energia por atrito são avaliadas através da equação de Manning e perdas devidas a contração/expansão utilizando-se um coeficiente multiplicado pela variação da altura cinética. A equação da quantidade de movimento é utilizada em situações onde o perfil da superfície da água é rapidamente variado. Estas situações incluem cálculos de escoamento em regime misto (ou seja, os ressaltos hidráulicos), hidráulica de pontes, e perfis de avaliação em confluências de rios.

Os efeitos provocados por obras de engenharia como pontes, túneis, barragens, descarregadores podem ser considerados nos cálculos. O sistema de escoamento contínuo é projetado para aplicação na gestão de zonas aluvionares e no estudo contra inundações para avaliar as áreas inundadas (USACE, 2010).

3.4.4 MIKE

O programa MIKE, foi desenvolvido pelo Danish Hydraulic Institute (DHI) e é um pacote de software que permite simular a problemas de cheias, gestão e distribuição da água, qualidade da água e transporte de sedimentos em estuários, rios, sistemas de irrigação, canais e outras massas de água. Baseado no MIKE Zero, e com a inclusão da interface gráfica no Windows o MIKE 11 foi desenvolvido para gestão e operação de problemas simples e complexos de rios e canais.

Possui um módulo hidrodinâmico (HD), que é o núcleo do sistema de modelação do MIKE 11 e constitui a base para a maioria dos módulos, incluindo previsão de inundações, advecção-dispersão, qualidade da água, módulo do transporte sedimentar e um simulador hidrológico.

O módulo MIKE 11 HD resolve as equações de Saint-Venant (equação da continuidade e equação da quantidade de movimento) (DHI Water & Environment, 2003).

3.5 Plataforma Delft-FEWS

Atualmente existem inúmeros modelos hidrológicos e hidrodinâmicos utilizados na previsão operacional de cheias e inundações. Devido aos avanços na previsão meteorológica, estes modelos transformam-se em requisitos obrigatórios para sistemas de previsão em tempo real, onde a sua utilização altera constantemente devido ao aumento da disponibilidade de dados em tempo real de redes terrestres, de radar e sistemas de localização por satélite. Isto exige uma abordagem flexível na criação de sistemas de apoio à decisão em tempo real sustentáveis que podem se adaptar a novas necessidades, tanto em sistemas complexos como rudimentares, e

ser adaptado a inúmeras aplicações, incluindo a previsão de inundações, previsão qualidade da água, gestão de águas subterrâneas, controle em tempo real ou simplesmente usado como um repositório de dados. Para entender o comportamento destes fenómenos, é necessário observar numa escala regional, onde a única forma de observar o tempo é por meio de deteção remota, principalmente por satélites.

O futuro dos sistemas de previsões cheias e inundações em Portugal e em todo o mundo passará por aqui mesmo, pela criação de um sistema operacional conectado a uma eficiente fonte de dados externos. A Deltares, uma de várias empresas na vanguarda da investigação aplicadas ao domínio da água, criou o Delft-FEWS. É o mais recente sistema de previsões, que fornece um conjunto de módulos de importação passíveis de serem utilizados sequencialmente com o objetivo de criar um sistema funcional de controlo de recursos hídricos, onde permitem a importação de dados de fontes externas, como dados meteorológicos online ou hidrológicos, tanto monitorizados como previstos, bem como modelos hidrológicos e hidráulicos.

É uma ferramenta valiosa no que concerne a tomadas de decisões ambientais estratégicas, pois atua em tempo real. Esta interface é relativamente simples e tem sido aplicada na ligação de inúmeros modelos, a maioria destes usados em centros de previsão operacionais. Um benefício adicional da abordagem aberta é que os procedimentos e modelos de previsão existentes, muitas vezes podem ser integrados em diversos domínios pela sua flexibilidade, onde se consegue adaptar os processos, dependendo da evolução das necessidades, bem como as mudanças das capacidades dos modelos e os dados atmosféricos. A validação e interpolação destes, normalmente é automatizada, mas a configuração por parte do utilizador também é possível onde se torna possível alterações a modelos subjacentes, fornecendo assim os dados de entrada e os respetivos parâmetros.

A natureza modular e altamente configurável do Delft-FEWS permite criar um ambiente autónomo para que ele seja usado efetivamente para armazenamento de dados e tarefas de recuperação, ou num ambiente de cliente-servidor totalmente automatizado na criação de sistemas de previsão simples em sistemas altamente complexos, utilizando uma ampla gama de técnicas de modelação (Deltares, 2010).

O Delft-FEWS não contém recursos de modelação hidrológica inerentes dentro da sua base de código, incorpora uma ampla biblioteca de manipulação de dados em geral e permite que uma grande variedade de modelos de previsão externos possam ser integrados no sistema. O objetivo do sistema não é fornecer capacidades de previsão, sob a forma de algoritmos. Consiste numa plataforma aberta para administrar o tratamento de dados e o processo de previsão através da qual sistemas de previsão operacionais podem ser construídos, permitindo

uma elevada flexibilidade na integração de modelos e dados. Estes modelos podem então ser ligados com os dados a partir de redes operacionais aplicadas à previsão meteorológica (Deltares, 2010).

O Delft-FEWS inclui uma base de dados, e ferramentas acesso a dados, bem como diversas componentes para importar, manipular, visualizar e exportar dados. A importação de dados externos inclui níveis de água observados, precipitações, conjuntos de previsões meteorológicas normalmente produzidos por agências de previsão meteorológica. Os dados são importados em diversos formatos, tais como CSV, XML, GRIB e ASCII. A validação e interpolação destes, é normalmente automatizada, mas a configuração por parte do utilizador também é possível (Deltares, 2010).

Num Sistema de Apoio à Decisão para Gestão de cheias e inundações numa bacia hidrográfica, a chave para o conceito de sistema aberto são as interfaces que permitem a integração de modelos externos e algoritmos. O Delft-FEWS contém um módulo de importação de dados onde é possível a gestão de dados em inúmeros formatos distintos através de uma ferramenta JAVA desenvolvida para formato de dados (Pinho & Vieira, 2006).

Os aplicativos do sistema incluem: controlo de qualidade dos dados de precipitação importados em tempo real, agregação dos dados em intervalos horários, interpolação dos dados utilizando polígonos de Thiessen, obtenção de valores de precipitação através de imagens de radar, obtenção de dados através do grid numérico, correção do hidrograma gerado pelo modelo hidrológico através do algoritmo de correção de erro (ARMA), entre outros (Pinho & Vieira, 2006).

Os elementos do sistema encontram-se interligados por uma base de dados central que obriga a que, tanto a obtenção como o armazenamento dos dados, sejam efetuados por um módulo de acesso. Toda a gestão e operação dos vários módulos é feita através de uma interface WEB, o que permite que o sistema seja independente de uma implementação física de uma base de dados (Pinto et al., 2013).

3.5.1 Fontes de dados incluídas na plataforma Delft-FEWS dos rios Este e Selho

1. SNIRH

O Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) foi criado pelo Instituto da Água (INAG), organismo central de jurisdição sobre todo o território nacional, em meados de 1995 e publicitado para o exterior no Dia Nacional da Água (1 de Outubro).

A partir de 1997 passou-se a disponibilizar, via Internet, páginas estáticas e dinâmicas com acesso direto à base de dados do SNIRH. Este sistema é constituído por três módulos: aquisição; armazenamento e simulação; disponibilização (situação atual e previsões).

O sistema de monitorização é suportado por uma rede de estações automáticas e convencionais equipadas com teletransmissão, pertencentes às redes meteorológica, hidrométrica e de qualidade de água, e por uma ferramenta informática para arquivamento e transmissão da informação que disponibiliza informação atualizada das características hidrológicas dos rios e albufeiras do país (alturas de água, caudais e volumes armazenados) e dados meteorológicos importantes através de dados medidos nas estações pluviométricas e hidrométricas.

A informação hidrométrica e meteorológica é imprescindível aquando da definição dos dados de entrada do modelo, como os caudais nos modelos hidrodinâmicos e precipitação/evaporação nos modelos hidrológicos, na determinação das condições de fronteira, os níveis de água e caudais, e igualmente importante na fase de verificação e calibração do modelo, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com valores reais.

2. Dados de Radar

Na sequência de progressos tecnológicos, induzidos pela Segunda Grande Guerra Mundial, surgiu o Radar (RAdio Detection And Ranging), um instrumento de teledeteção usado em Meteorologia. Desde logo assumiu uma enorme importância, começando por ser utilizada em diversas áreas de aplicação, destacando-se na previsão a curto e médio prazo, de episódios de precipitação intensa, potencialmente causadores de cheias rápidas e inundações.

O radar meteorológico é um dispositivo de deteção remota, isto é, dispõe da capacidade de detetar e localizar objetos à distância, capaz de localizar precipitações, calcular o seu movimento, estimar a sua composição e até prever a sua evolução a curto prazo. O seu funcionamento baseia-se na emissão de pulsos eletromagnéticos numa determinada direção recebidos por uma antena parabólica.

No seu trajeto, as ondas eletromagnéticas podem interagir com as partículas das nuvens (gotículas, gotas de chuva ou granizo), que difundem em todas as direções a onda incidente, onde parte da radiação difundida recebida pela antena é amplificada e processada. Os dados recebidos fornecem informações sobre a distância a que se encontra a partícula, as suas propriedades (granulometria das gotas de chuva, a sua velocidade média e turbulência), bem como quanto à repartição espaço temporal destes parâmetros.

Através de muitos anos de estudos, reconheceu-se que a previsão de tempo severo requer o conhecimento da estrutura vertical da atmosfera, para isso utilizam-se atualmente, os radares

meteorológicos de dupla polarização, associados à emissão de impulsos de polarização horizontal e polarização vertical. De forma simplista pode dizer-se que os sistemas de polarização dupla medem as dimensões horizontal e vertical das partículas. Fornecem muito mais informação do que os sistemas convencionais horizontais, pelo fato de que as gotas de água em sua queda para o chão, têm o eixo horizontal maior que o vertical, e ainda informação sobre o vento. Uma informação de enorme relevância para a previsão e vigilância meteorológicas que permitem conhecer campos como, por exemplo, o da intensidade de precipitação, o da precipitação acumulada para um certo período, o da altitude das nuvens e ainda identificar zonas de convecção (essencialmente nuvens de trovoadas).

A utilização, de forma integrada, das imagens de radar e de técnicas estatísticas de interpolação espacial dos dados fornecidos pelas redes pluviométricas convencionais, afigura-se, neste domínio, como a metodologia que tem produzido resultados mais satisfatórios (SAUVAGEOT, 1983; ROUSSEL, 1995).

As imagens de radar meteorológico apresentam algumas vantagens relativamente aos dados fornecidos pelas redes de estações pluviométricas. A mais importante assenta na continuidade espacial das observações, facto que permite, por exemplo, a individualização de células convectivas responsáveis por precipitações intensas que, muitas vezes, não se detetam ou são incorretamente avaliadas através dos registos pontuais dos udógrafos (SAUVAGEOT, 1983). Outra das vantagens é a possibilidade de monitorizar a precipitação, em tempo real, numa área relativamente extensa e não apenas num ou vários pontos de uma rede, por mais densa que seja.

A conjugação das imagens de radar com os dados registados numa rede densa de udógrafos permite a minimização dos erros na estimação da precipitação e da sua repartição no espaço. Deste modo, associa-se a qualidade pontual das medições dos udógrafos com a continuidade espacial das imagens de radar” (ANDRIEU e JACQUET, 1987, p. 449), obtendo-se um conhecimento mais correto da variabilidade da chuva no tempo e no espaço.

3. Weather Research and Forecasting

O desenvolvimento do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) iniciou-se no fim da década de 90, criado através de uma parceria de colaboração principalmente entre o Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (NCAR), a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a agência meteorológica da Força Aérea (AFWA), o Laboratório de Pesquisa Naval (NRL), a Universidade de Oklahoma (OU) e a Federal Aviation Administration (FAA).

O WRF é um modelo de previsão numérica atmosférico de última geração, concebido para necessidades de pesquisa e previsão operacional. O modelo apresenta uma vasta gama de aplicações meteorológicas, incluindo diferentes fenómenos atmosféricos envolvendo diferentes escalas espaciais (dezenas de metros a milhares de quilómetros). Permite a produção de simulações atmosféricas em função tanto de dados reais (observações, análises) como de condições idealizadas atmosféricas.

Embora sejam ferramentas extremamente úteis na previsão das condições atmosféricas, o modelo apresenta erros intrínsecos. Estes erros têm varias causas, tais como a imperfeição do método numérico que aproxima as equações diferenciais por equações de diferenças finitas, a dificuldade em representar os termos não-lineares das equações do modelo e os erros dos dados observados usados na definição da condição inicial.

O modelo de maior resolução disponível é o de 3 km, que requer enormes recursos informáticos. Existe uma plataforma flexível e computacionalmente eficiente, onde em condições normais, o modelo é atualizado 4 vezes por dia e produz uma previsão para 78 horas, em períodos de uma hora. As previsões incluem a velocidade, direção e sentido do vento, temperatura, nebulosidade e precipitação.

Atualmente existe uma enorme evolução na comunidade mundial de utilizadores (mais de 23.000 registados em mais de 150 países), e workshops/tutoriais são realizadas a cada ano no NCAR, proporcionando assim avanços na física, na previsão numérica e na assimilação de dados resultantes de contributos de toda a comunidade de investigação.

4. Global Forecasting System

O Global Forecasting System (GFS) é um modelo de previsão numérica das condições atmosféricas criado e usado pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dos EUA. Este modelo recorre ao cálculo computacional para produzir uma estimativa do estado futuro da atmosfera utilizando os designados “modelos de previsão numérica do tempo”. Com base num modelo de previsão obtém-se então a “previsão” a partir do conhecimento do estado atmosférico inicial, isto é, da “análise”. fornecemos resultados incluem previsões para diferentes variáveis atmosféricas, tais como a temperatura, a pressão atmosférica, o vento e a precipitação.

Os modelos baseiam-se num conjunto de equações que traduzem leis da física para descrever o comportamento hidrodinâmico da atmosfera. São atualizados quatro vezes por dia com previsões a atingirem os 16 dias (384 horas), sendo a sua resolução espacial e temporal menor ao longo do tempo. As previsões dos GFS não oferecem muita viabilidade após os 7 dias, com

uma maioria de institutos e agências de meteorologia nacional dispensarem os resultados para além de 10 dias (principalmente pela inexistência de outros modelos a 16 dias para comparação de previsões).

A resolução do modelo varia horizontalmente, onde a superfície da Terra é dividida numa grelha de 35 ou 70 quilómetros por célula, verticalmente, ele divide a atmosfera em 64 camadas e temporalmente, produz uma previsão para cada 3 horas para as primeiras 180 horas, em seguida, com uma resolução de 12 horas.

No seu trabalho diário, o meteorologista interpreta os resultados obtidos, confrontando-os com outras fontes de informação meteorológica para elaborar a previsão do estado do tempo. Porém a qualidade da informação numérica é condicionada pelas incertezas inerentes ao conhecimento do estado da atmosfera num dado instante e a utilização de observações irregularmente distribuídas sobre o globo são fatores de erro introduzidos na análise.

O modelo GFS é o único modelo de cobertura global cujas previsões estão disponíveis gratuitamente e sob domínio público através da Internet. Além do modelo principal e de modelos de previsão estatística, o modelo GFS também serve como uma base para 20 modelos de previsão oferecidos com a mesma frequência que o GFS e as mesmas escalas espaciais para que eles possam gerar os seus próprios produtos derivados da previsão, como se encontra disponível nas empresas de meteorologia mundiais como Wunderground, AccuWeather, The Weather Channel ou MeteoGroup.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA EM ESTUDO

4.1 Bacia Hidrográfica do Rio Ave

A Bacia Hidrográfica do rio Ave é constituída por uma densa rede de linhas de água delimitada a norte pela bacia do Cávado, a leste pela bacia do Douro, e a sul pelas bacias do Leça e Douro. A bacia apresenta uma área total de 1469 Km², sendo que 247 Km² e 340 Km² correspondem às áreas das bacias dos seus principais afluentes, Rio Este e Vizela, respetivamente (Martins,2013).

O Rio Ave nasce na serra da Cabreira, concelho de Vieira do Minho, a 1200m de altitude, percorrendo 94 Km no sentido nascente-poente até à foz no Oceano Atlântico junto à cidade de Vila do Conde. Esta massa de água engloba, total ou parcialmente, as áreas de jurisdição de 16 concelhos. Os concelhos de Guimarães e Vila Nova de Famalicão ficam totalmente integrados na bacia hidrográfica do rio Ave, enquanto Braga, Barcelos, Vizela, Celorico de Basto, Fafe, Póvoa do Lanhoso e Vieira do Minho, todos do distrito de Braga e ainda parte dos concelhos de Felgueiras, Lousada, Maia, Paços de Ferreira, Póvoa do Varzim, Santo Tirso e Vila do Conde do distrito do Porto, ficam parcialmente integrados na bacia como representado na Figura 24 (Costa,2009).

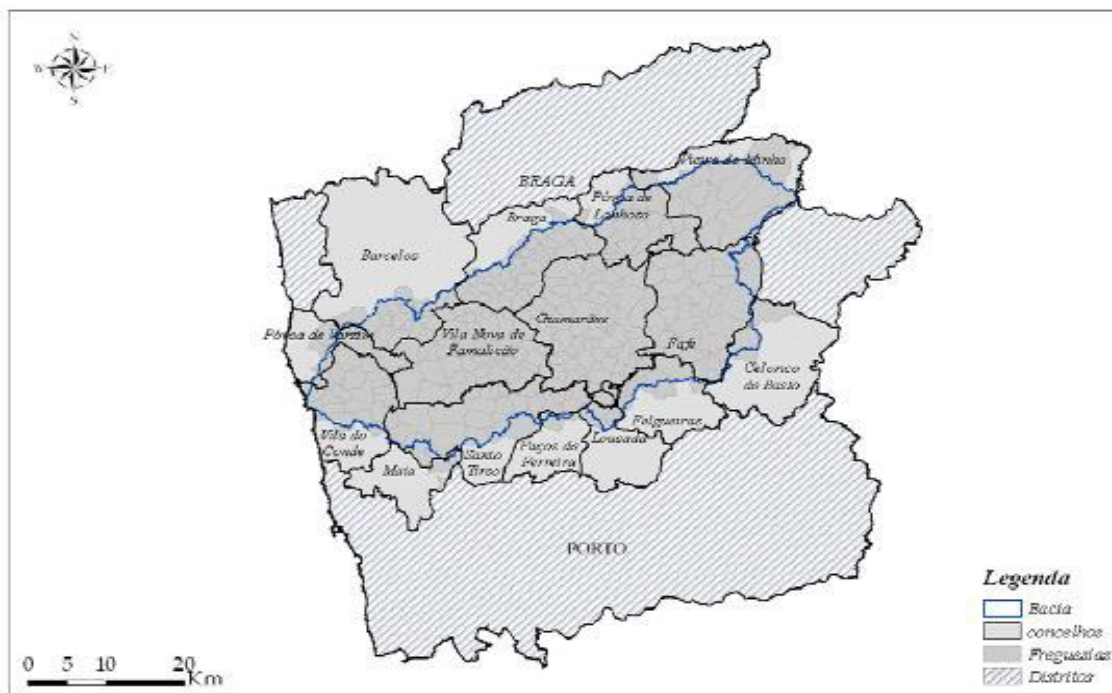


Figura 24_Delimitação da bacia hidrográfica do Rio Ave (Costa, 2009)

Segundo a Lei da Água (Lei nº 58/2005) que estabelece as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas, está definido que o Rio Ave, juntamente com os rios Cávado e Leça, pertence a Região Hidrográfica 2.

As massas de água presentes nas zonas de cabeceira dos rios Ave e Vizela apresentam um estado final de “Bom” (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012). A restante bacia hidrográfica apresenta uma degradação acentuada da qualidade da água, destacando-se a ribeira do Selho e o Rio Trofa com um estado ecológico “mau”, concorrendo para o resultado o facto de se desenvolverem em vales muito industrializados e com densidades populacionais elevadas, encontrando-se próximo de grandes centros urbanos como Guimarães e Trofa. O Rio Ave apresenta um estado ecológico “mediocre” à semelhança do Rio Este e Rio Pelhe. Destacam-se ainda o Rio Pele, a Ribeira da Póvoa e o Rio Pequeno com a mesma classificação (Agência Portuguesa do Ambiente, 2012).

O cenário hidrográfico do Vale do Ave é constituído por uma densa malha de linhas de água (que aumenta a probabilidade de cheias) com regime permanente, ou seja, que tem caudal durante todo o ano, o que se traduz por uma enorme disponibilidade de recursos superficiais (Velo, 2014).

É uma região caracterizada por boas capacidades de recarga natural provenientes dos cursos de água ou por infiltração da água da chuva, no caso de aquíferos multicamada a recarga acontece a partir da drenagem de camadas adjacentes. A recarga por infiltração da água da chuva refere-se à quantidade de água que se infiltra abaixo do nível do solo, após processos de evapotranspiração e de escoamento direto e que vai ter um percurso subterrâneo, podendo em condições de não exploração contribuir para o escoamento dos cursos de água (escoamento base).

A paisagem ribeirinha do Rio Ave é ainda extremamente valorizada pelo grande número de pontes romanas e medievais que o atravessa, pela frequência de belas casas antigas de lavoura, bem como pela enorme ocorrência de azenhas e açudes (Velo, 2014).

Em relação ao clima a região é caracterizada por verões muito quentes e um pouco húmidos e invernos frios e chuvosos. A intensa precipitação que se faz sentir nos períodos húmidos, juntamente com as características orográficas do terreno, a constituição do solo das bacias e a sua permeabilidade, faz com que esta zona seja propícia a cheias.

O Rio Ave é um curso de água de pequena longevidade, deste modo a sensibilidade do geosistema pode-se considerar mais alta na medida que esta é mais facilmente alterável. A diversidade florística é comparativamente menor relativamente aos complexos hidrográficos do Lima e do Cávado (Martins, 2013).

Com a finalidade de se acompanhar a evolução no sentido de se atingir um bom estado ecológico, a bacia hidrográfica do Rio Ave dispõe de um conjunto de estações de monitorização. A nível superficial a bacia hidrográfica do Rio Ave é constituída por uma rede meteorológica que serve para monitorizar o ramo aéreo do ciclo hidrológico (precipitação, temperatura, humidade do ar, direção e velocidade do vento, insolação, radiação solar, evaporação e evapotranspiração) e é constituída por 59 estações, das quais cinco são climatológicas e as restantes são udométricas. Existe ainda uma rede hidrométrica utilizada para monitorizar o nível hidrométrico, a partir do qual são recolhidos dados de escoamento (Caudal, Nível, Velocidade, etc.). e é possível prever de forma mais eficaz o comportamento dos rios permitindo assim uma maior eficiência na minimização dos impactos negativos provocados por cheias. A nível subterrâneo são monitorizados os níveis freáticos, para posterior classificação do estado quantitativo e da condutividade e concentrações de poluentes para determinação do estado químico. É através da rede meteorológica e hidrométrica que se prevê as características dos escoamentos que são utilizados para lançar os alertas de cheias atempadamente, podendo assim minimizar os impactos das cheias (Veloso, 2014).

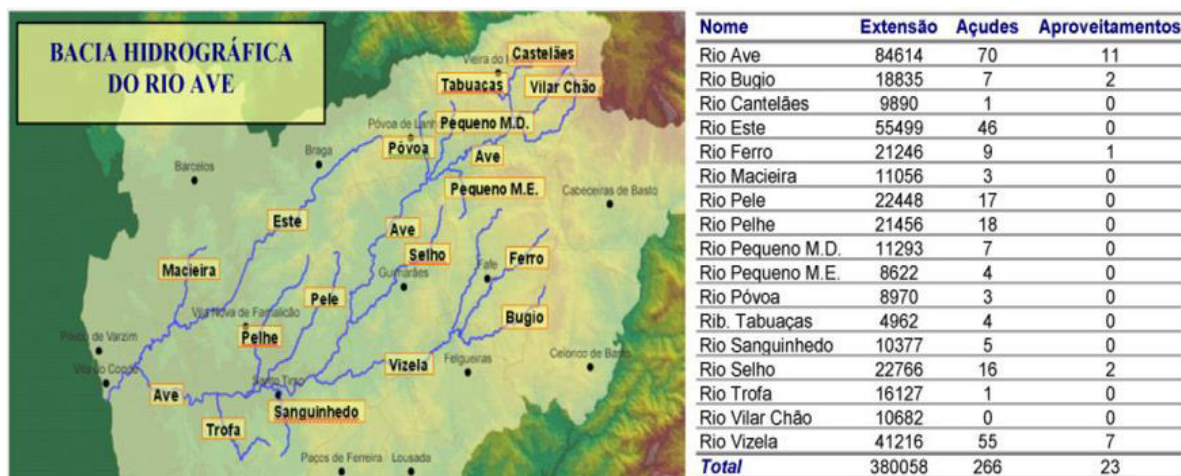


Figura 25_Caracterização do Rio Ave e seus Afluentes (Veloso,2014)

4.2 Bacia Hidrográfica do Rio Este

Um dos rios considerados nesta dissertação é o Rio Este, com nascente em São Mamede de Este (Serra do Carvalho), na Cidade de Braga. O Rio Este é intercetado pelo Rio Macieira (extensão de 11056 metros) e posteriormente desagua na margem direita do Rio Ave 4 Km acima de Vila do Conde, em Madorra-Touguinha.

A sub-bacia hidrográfica do Rio Este está incorporada na Bacia Hidrográfica do Rio Ave que tem uma área de 1469 km² dos quais 247 Km² pertencem à Bacia Hidrográfica do Rio Este.

O Rio Este tem de escoamento anual total na foz 152 hm³ e a sua extensão é de 55499 metros, passando por: Braga; Nine; Minhotães; e entre as freguesias de Rates, Balazar, Rio Mau, Junqueira e Touguinhó.

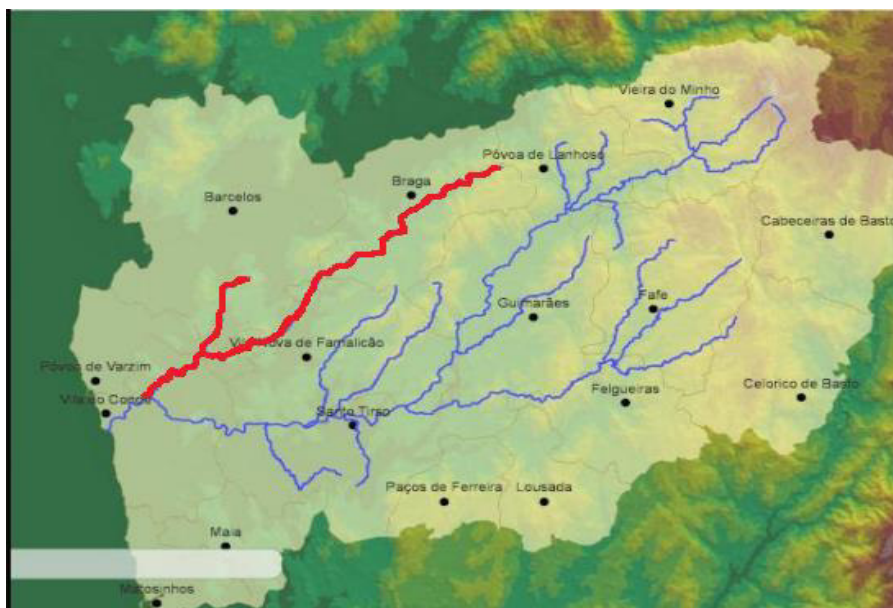


Figura 26_Rio Este

A Estação de Ponte Junqueira era a única que permitia a monitorização hidrométrica do Rio Este a partir do SNIRH, sendo que a estação já foi desativada.

O Rio Este apresenta um estado Ecológico “Medíocre” devido: presença de resíduos produzidos pela população e indústrias sendo esta a principal causa da poluição, e à escassa manutenção/reabilitação efetuada ao longo dos anos. O Rio Este foi recentemente sujeito a obras de reabilitação para melhorar as condições de escoamento e precaver as recorrentes cheias que ocorrem em zonas urbanas da Cidade de Braga, assim como melhorar a qualidade das águas nessa mesma zona.

4.3 Bacia Hidrográfica do Rio Selho

A sub-bacia hidrográfica do Rio Selho, com a nascente a 580 metros de altitude em Senhora do Monte (Gonça), no concelho de Guimarães, a cerca de 3,25Km de S. Torcato. Tem um comprimento de aproximadamente 20Km e localiza-se na margem esquerda do Rio Ave.

A sub-bacia hidrográfica do Rio Selho está incorporada na Bacia Hidrográfica do Rio Ave que tem uma área de 1469 km² dos quais 67,652 Km² pertencem à Bacia Hidrográfica do Rio Selho. A sua extensão é de 20908 metros, passando quase na sua totalidade pelo concelho de Guimarães.

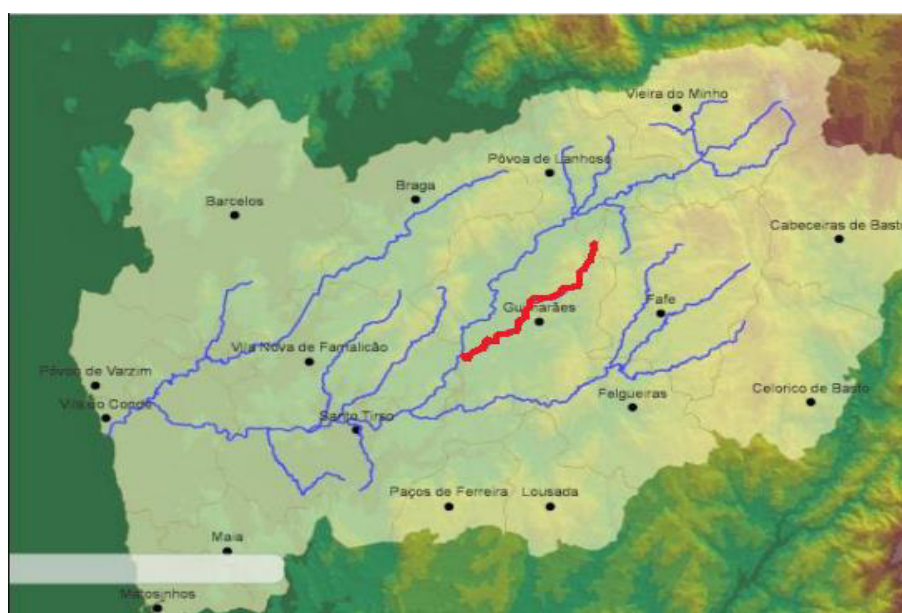


Figura 27_Rio Selho

O rio Selho apresenta-se como um curso de água importante para este estudo, no sentido em que mostrou ser ao longo dos tempos, bastante problemático em termos de acontecimentos relacionados com inundações e cheias, sempre que se verifica um excesso de pluviosidade, dependente de vários fatores físicos e climáticos. Para as cheias que se verificam contribuem as características orográficas do terreno, a constituição geológica do solo das bacias e sua impermeabilidade.

A Estação de Ponte Brandão era a única que permitia a monitorização hidrométrica do Rio Selho a partir do SNIRH, no entanto esta já foi desativada.

Este possui um pequeno afluente, o Ribeiro de Couros, que em parte do seu curso atravessa o centro da cidade de Guimarães e que, em situações de elevada precipitação, se revela vulnerável em termos de inundações.

5. MODELO HIDROLÓGICO E HIDRODINÂMICO

5.1 Modelo Hidrológico

5.1.1 Dados de base para calibração

Para obter a série de precipitação e evaporação para a calibração do modelo recorreu-se ao método de Thiessen que foi aplicado a todas as sub-bacias, que contêm as estações meteorológicas, com dados associados entre si, pertencentes à bacia do correspondente rio, tanto o Este como o Selho. Para além destas, utilizaram-se estações localizadas fora da sub-bacia, pois estas apesar de não estarem diretamente ligadas ao escoamento da precipitação na bacia, apresentam-se mais próximas da estação hidrométrica em análise do que algumas estações meteorológicas da própria bacia.

Foi então elaborado para a bacia do rio Este o respetivo polígono de Thiessen (Figura 28) e de seguida o cálculo da contribuição, em percentagem, de cada estação meteorológica para obter a série de precipitação utilizada na calibração do modelo hidrológico do rio Este (Tabela 3).



Figura 28_Método de Thiessen para a bacia hidrográfica do Rio Este

Tabela 3_Percentagens da área correspondente a cada estação meteorológica utilizada na calibração da bacia hidrográfica do rio Este.

Sub-bacia	Estações meteorológicas	Contribuição (%)	Série de Precipitação/Evaporação
Este	Escudeiros	25,6	0,256 * Série Escudeiros
Cávado	Faria	16,5	0,165 * Série Faria
Ave	Parada	10,7	0,107 * Série Parada
Este	Viatodos	30,5	0,305 * Série Viatodos
Este	Vilaça	16,7	0,167 * Série Vilaça

Foi elaborado também para a bacia do rio Selho o respetivo polígono de Thiessen (Figura 29) e de seguida, tal como para a bacia do rio Este, o cálculo da contribuição, em percentagem, de cada estação meteorológica para obter a série de precipitação utilizada na calibração do modelo hidrológico do rio Este (Tabela 4).



Figura 29_Método de Thiessen para a bacia hidrográfica do Rio Selho

Tabela 4_Percentagens da área correspondente a cada estação meteorológica utilizada na calibração da bacia hidrográfica do Rio Selho

Sub-bacia	Estações meteorológicas	Contribuição (%)	Série de Precipitação/Evaporação
Vizela	Fafe	37	0,37 * Série Fafe
Vizela	Lordelo	24	0,24 * Série Lordelo
Selho	Fontela	39	0,39 * Série Fontela

5.1.2 Resultados da calibração do modelo RRL

Os resultados dos parâmetros para calibração do modelo foram obtidos através da variação de todos os métodos para duas funções objetivos, ‘*Nash-Sutcliffe Criterion*’ e ‘Raiz quadrada da média dos erros quadrados (*RMSE*)’. Assim, após várias simulações envolvendo os diferentes métodos e cada uma das funções objetivo, foram escolhidas as combinações com os maiores valores de cada função objetivo. De seguida, calculou-se a média dos dois valores e inseriu-se os parâmetros para calibração do modelo da respetiva bacia hidrográfica.

Rio Este - 1º Objetivo

Para a bacia do Rio Este, o maior valor obtido com a função objetivo ‘*Nash-Sutcliffe Criterion*’ resultou do método ‘*Rosenbrock Single Start*’. O resultado do RRL foi de 0,991, como se pode verificar na Figura 30, onde se apresenta o gráfico dos valores calculados ‘versus’ valores observados.

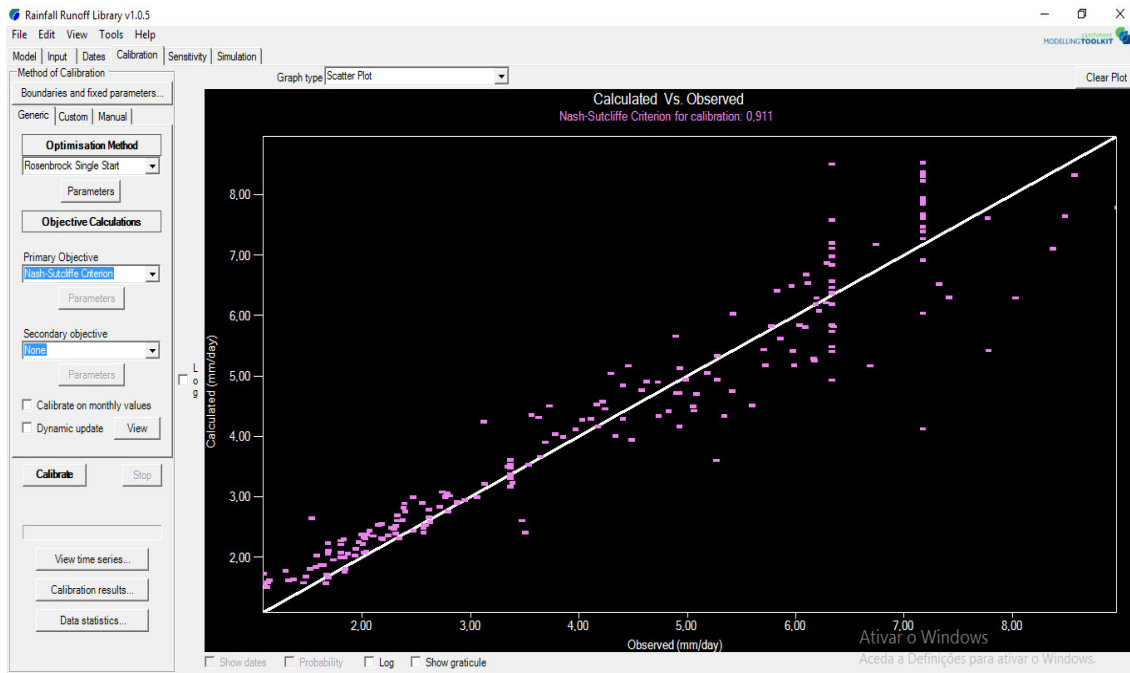


Figura 30_ Valores calculados ‘vs’ valores observados, Rio Este – combinação 1

Rio Este - 2º Objetivo

Para a bacia do Rio Este, o maior valor obtido com a função objetivo ‘RMSE’ resultou do método ‘Pattern Search Single Start’. O resultado do RRL foi de 0,864, como se pode verificar na Figura 31, onde se apresenta o gráfico dos valores calculados ‘versus’ valores observados.

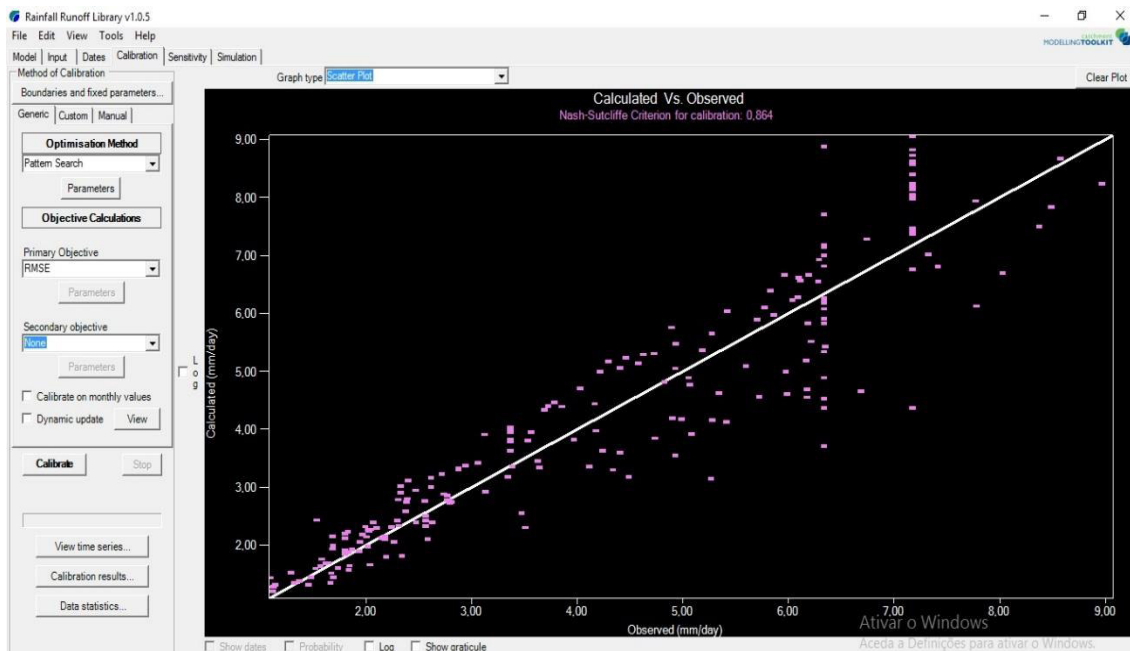


Figura 31_ Valores calculados ‘vs’ valores observados, Rio Este – combinação 2

Rio Este - Resultados

Na Tabela 5 apresentam-se os valores médios dos parâmetros de Sacramento obtidos na calibração com o software Rainfall Runoff Library.

Tabela 5_ Resultados dos parâmetros de Sacramento no software RRL

Método	Rosenbrock Single Start	Pattern Search Single Start	Média
Objetivo	Nash-Sutcliffe Criterion	RMSE	
Adimp	0,010319623	0,032165882	0,021243
Lzfp	697,184125	726,4540025	711,8191
Lzfs	166,083482	205,2572173	185,6703
Lzpk	0,007786939	0,00630867	0,007048
Lzsk	0,099869418	0,066516111	0,083193
Lzwm	108,6859565	12,76825744	60,72711
Pctim	0,047502602	0,022726144	0,035114
Pfree	0,5	0,5	0,5
Rexp	3	3	3
Rserv	0,144627327	0	0,072314
Sarva	0,093741126	0,15410002	0,123921
Side	0	0	0
Ssout	0	0	0
Uzfw	80	80	80
Uzk	0	0	0
Uzwm	19,03374264	32,00923765	25,52149
Zperc	10,6112692	36,4895749	23,55042

Rio Selho – 1º Objetivo

Para a bacia do Rio Selho, o maior valor obtido com a função objetivo ‘Nash-Sutcliffe Criterion’ resultou do método ‘Rosenbrock Single Start’. O resultado do RRL foi de 0,900, como se pode verificar na Figura 32, onde se apresenta o gráfico dos valores calculados ‘versus’ valores observados.

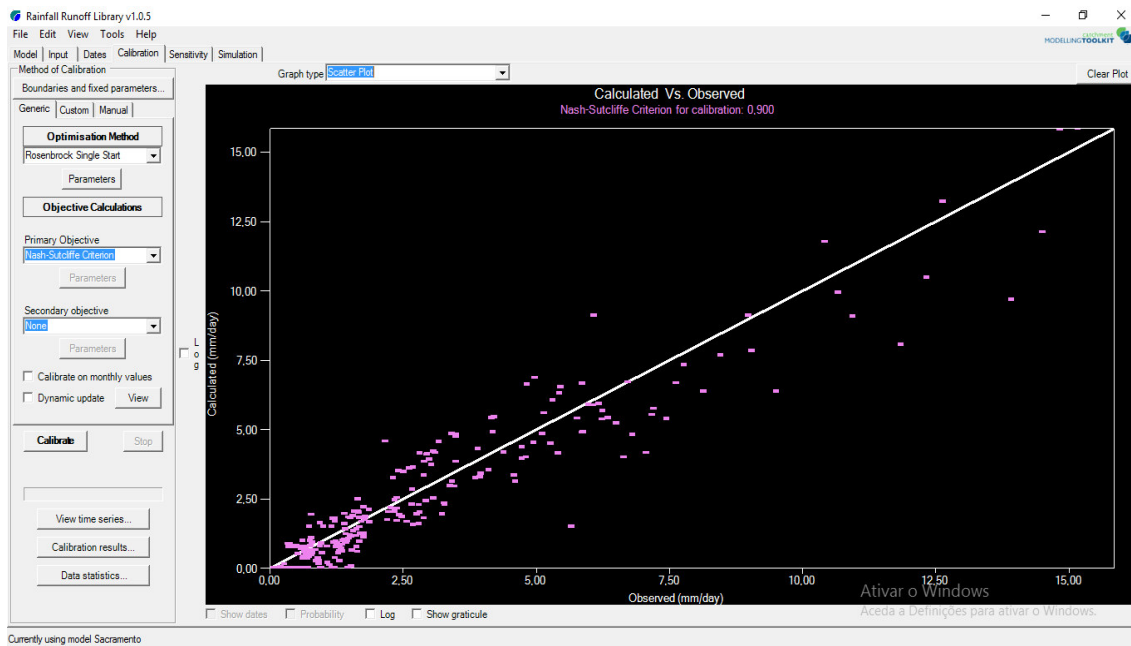


Figura 32_ Valores calculados ‘vs’ valores observados, Rio Selho – combinação 1

Rio Selho - 2º Objetivo

Para a bacia do Rio Selho, o maior valor obtido com a função objetivo ‘RMSE’ resultou do método ‘Pattern Search Single Start’. O resultado do RRL foi de 0,898, como se pode verificar na Figura 33, onde se apresenta o gráfico dos valores calculados ‘versus’ valores observados.

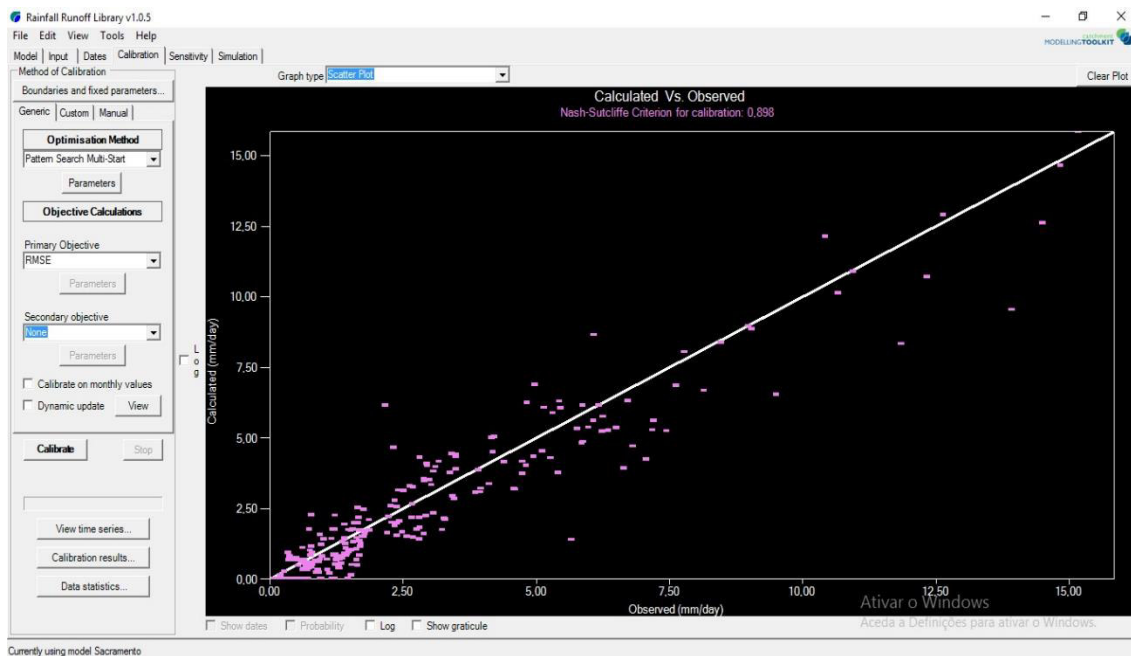


Figura 33_ Valores calculados ‘vs’ valores observados, Rio Selho- combinação 2

Rio Selho - Resultados

Na Tabela 6 apresentam-se os valores médios dos parâmetros de Sacramento, para ambos objetivos, obtidos na calibração com o software Rainfall Runoff Library.

Tabela 6_ Resultados dos parâmetros de Sacramento no software RRL

Método	Rosenbrock Single Start	Pattern Search Single Start	Média
Objetivo	Nash-Sutcliffe Criterion	RMSE	
Adimp	0,025729644	0,013619168	0,019674
Lzfpn	708,6389235	421,3173827	564,9782
Lzfsn	34,35697029	66,20023137	50,2786
Lzpk	0,022157427	0,022993221	0,022575
Lzsk	0	0	0
Lzwm	131,6901176	145,4863479	138,5882
Pctim	0,076287134	0,099110625	0,087699
Pfree	0	0,039545909	0,019773
Rexp	2,95189018	1,942888333	2,447389
Rserv	0,144627327	0,036656373	0,090642
Sarva	0,2	0,202248312	0,201124
Side	0	0,008059081	0,00403
Ssout	0	0	0
Uzfw	18,46351474	31,59472786	25,02912
Uzk	0,609424942	0,272350924	0,440888
Uzwm	145,5728875	114,2697435	129,9213
Zperc	23,61147558	48,97178696	36,29163

5.2 Modelo Hidrodinâmico

No âmbito deste trabalho, foi utilizado um modelo hidrodinâmico desenvolvido no Laboratório de Hidroinformática da Universidade do Minho, apresentando-se seguidamente algumas das suas características principais.

De uma forma resumida, a construção de um modelo hidrodinâmico passa por um levantamento de informação topológica relativa aos eixos das linhas de água, utilizando um modelo digital de elevação do terreno, para que seja possível efetuar a sua importação para o *software* Sobek. A partir deste momento define-se a base para o estabelecimento da rede de trechos e nós do modelo unidimensional e de seguida as estruturas hidráulicas (pontes, açudes e barragens) existentes ao longo da bacia, bem como as secções transversais relevantes.

Para definição das características e da localização das várias estruturas, poderá ser utilizado o *Google Earth* ou Ortofotomapas, para que se possa visualizar as linhas de água e processar informação através de um dos *softwares* mais utilizados para este efeito, o ArcGIS, o QGIS e/ou o Autocad. Esta informação é importada para o *software* Sobek onde é adicionado de seguida a localização e tipo das estruturas, correspondendo cada uma delas a nós no modelo. É necessário acrescentar nós de fronteira no início e no final da rede unidimensional para que seja possível definir as respetivas condições de entrada podendo estas ser caudais ou níveis de água.

Através de um levantamento topográfico e com a ajuda do AutoCad/ArcGis são definidas as diferentes secções transversais. Para melhores simulações em situações de cheias pode-se prolongar os perfis com a ajuda do modelo de elevação digital, de maneira a englobar também as margens.

Na Figura 34 encontra-se representado o modelo hidrodinâmico da bacia hidrográfica do Ave construído no programa Sobek.

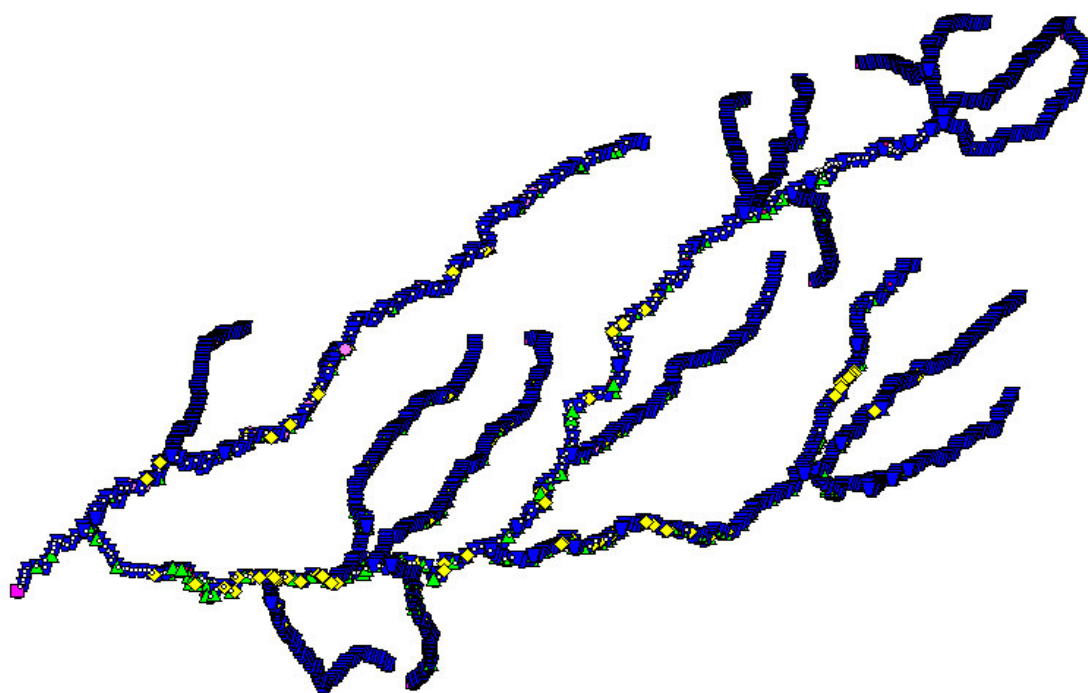


Figura 34_Modelo hidrodinâmico da bacia do Ave efetuado no Sobek

A partir do modelo completo da Bacia do rio Ave é possível obter versões mais simples incluindo apenas algumas das sub-bacias. Esta simplificação do modelo hidrodinâmico permite tempos de simulação mais curtos no *software* Sobek, o que favorece a simulação em plataformas de previsão.

Partindo da versão do modelo hidrodinâmico procedeu-se à construção da componente correspondente ao modelo hidrológico o que passa por acrescentar nós de sacramento ao modelo hidrodinâmico existente permitindo a simulação do caudal escoado nas linhas de água a partir dos eventos de precipitação. Numa primeira fase foi realizado o processamento do terreno de modo a obter-se um conjunto de sub-bacias, com resolução adequada à simulação da hidrologia das bacias dos rios Este e Selho. Nas Figuras 35 e 36 encontra-se representado o modelo hidrodinâmico/hidrológico da bacia hidrográfica do Este e Selho, respetivamente, modelados no programa Sobek.

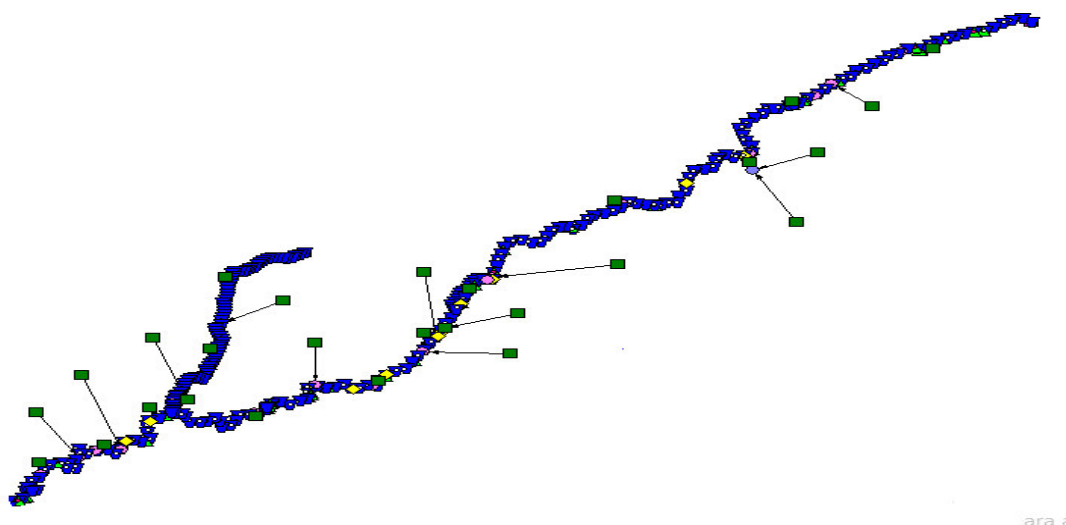


Figura 35_Modelo hidrodinâmico da Bacia do Este, Sobek

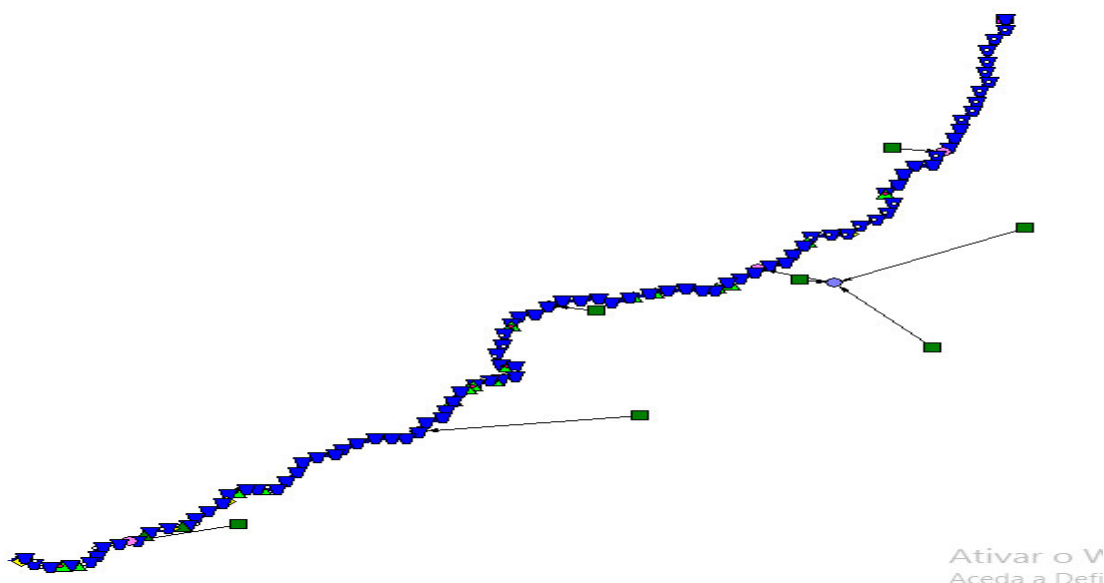


Figura 36_Modelo hidrodinâmico da Bacia do Selho, Sobek

5.2.1 Resultados de simulações hidrológicas com o programa Sobek

Foi realizada uma simulação, utilizando os parâmetros de calibração obtidos com o programa RRL, para um período de tempo compreendido entre 9 de Dezembro de 1995 e 8 de Dezembro de 2000. Este período de simulação foi selecionado por existirem dados de precipitação e caudais para a estação hidrométrica de Ponte Junqueira, no rio Este. Na Figura 37 apresenta-se o gráfico dos resultados da simulação onde se compara o caudal medido com o caudal simulado.

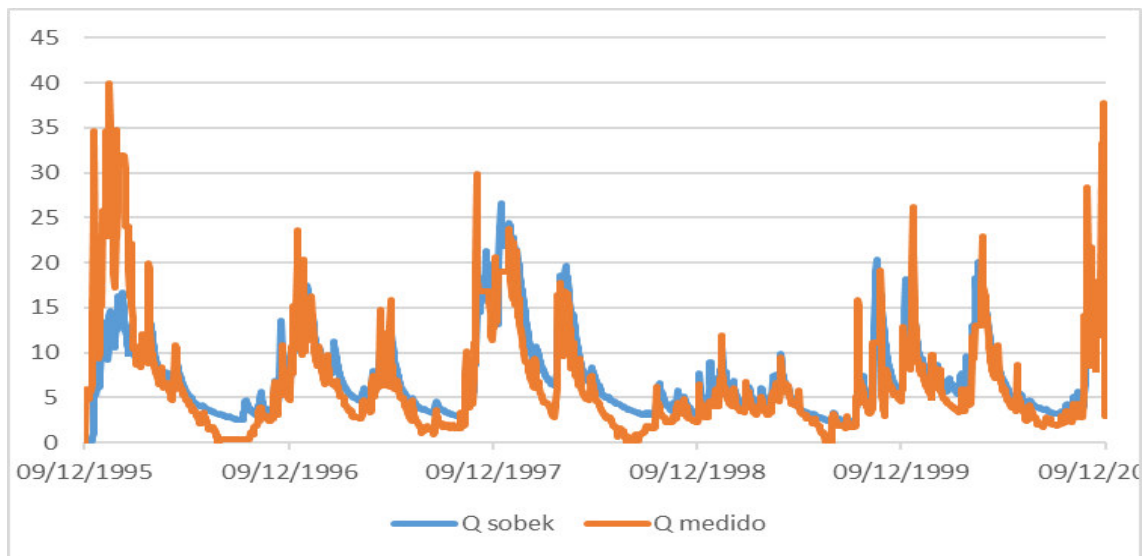


Figura 37_ Gráfico dos resultados da simulação 9 Dezembro de 1995 a 8 Dezembro 2000

Analisando os resultados obtidos na simulação é possível verificar-se que existe uma boa correspondência entre o caudal medido na estação e o caudal simulado no *software* Sobek, tirando alguns picos de caudal que poderão ser justificados, entre outros fatores, por erros nos registos de precipitação.

Em períodos de tempo em que não existe precipitação muitos dos registos da estação hidrométrica têm o valor 0, o que poderá justificar as diferenças nos caudais mínimos, pois o caudal nunca poder ser nulo devido ao escoamento base do rio. Na Tabela 7 temos a diferença entre a média de caudal real e a média de caudal simulado para o período simulado.

Tabela 7_Diferenças entre caudal real e caudal simulado, Ponte Junqueira

9 de Dezembro de 1995 a 9 de Dezembro de 2000	
Média do Caudal na Estação (m ³ /s)	6,57
Média do Caudal Simulado (m ³ /s)	7,38
Diferença entre os Caudais (m ³ /s)	0,81

Os gráficos de Regressão Linear apresentam no eixo axial os valores correspondentes ao caudal medido e no eixo das ordenadas os valores correspondentes ao caudal simulado. Na Figura 38 temos os resultados da regressão linear para o mesmo período. Não foram os ideais, uma vez que apresenta o valor de R^2 igual a 0,626. Os resultados melhoram consoante a inclinação da linha de tendência, ou seja, quanto mais próximo da unidade estiver o R^2 melhor serão os resultados obtidos.

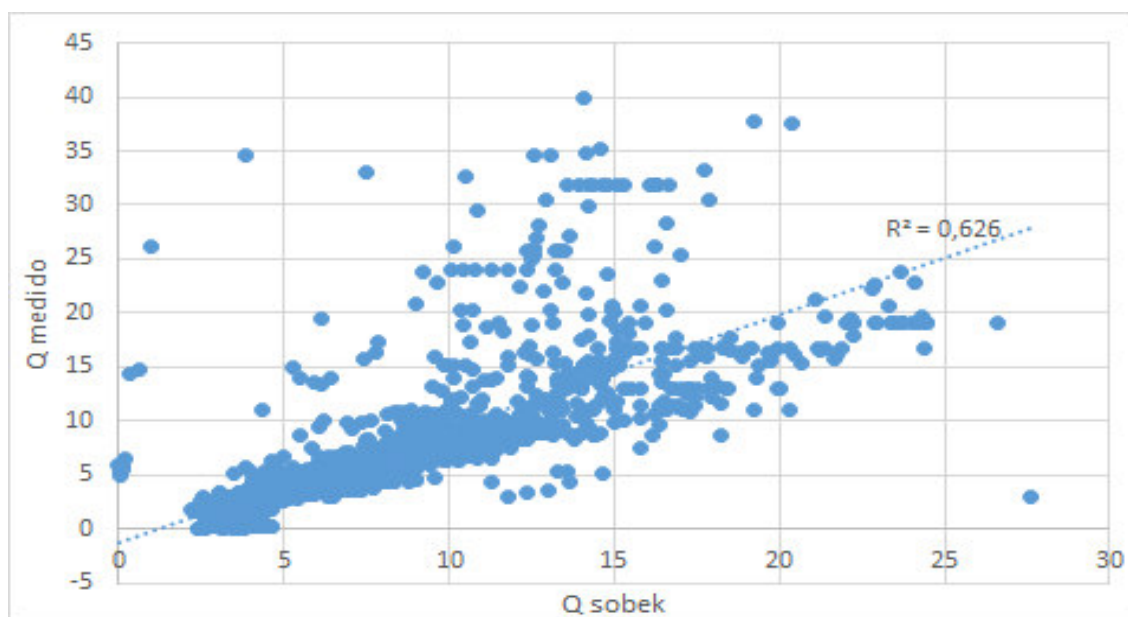


Figura 38_Gráfico dos resultados da regressão linear 9 de Dezembro de 1995 a 8 de Dezembro de 2000

Procurou-se ainda avaliar o desempenho do modelo para períodos mais curtos, próximos daqueles que poderão ser utilizados na plataforma de previsão, onde existe uma melhor correlação entre precipitação medida e caudal simulado. A partir da observação simultânea de valores de precipitação e caudal, procedeu-se à seleção desses períodos. (Figura 39)

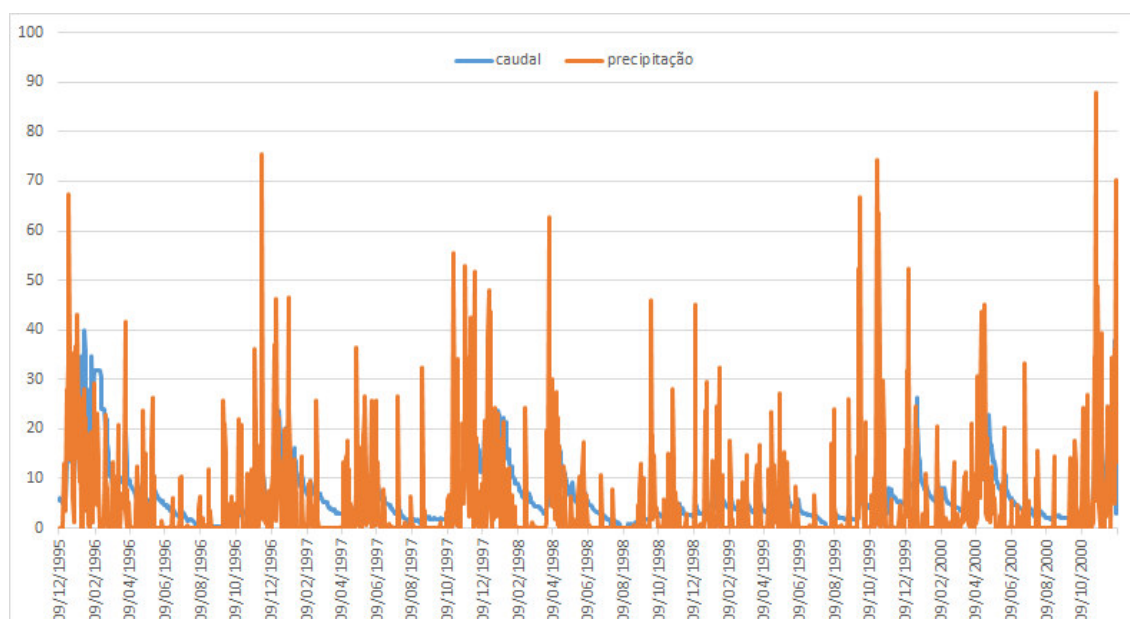


Figura 39_Gráfico caudal-precipitação 9 de Dezembro de 1995 até 8 de Dezembro de 2000
 Selecionou-se então o período entre 6 Agosto de 1997 a 8 de Junho de 1998. Apresenta-se de seguida de uma forma mais pormenorizada o período escolhido na Figura 40.

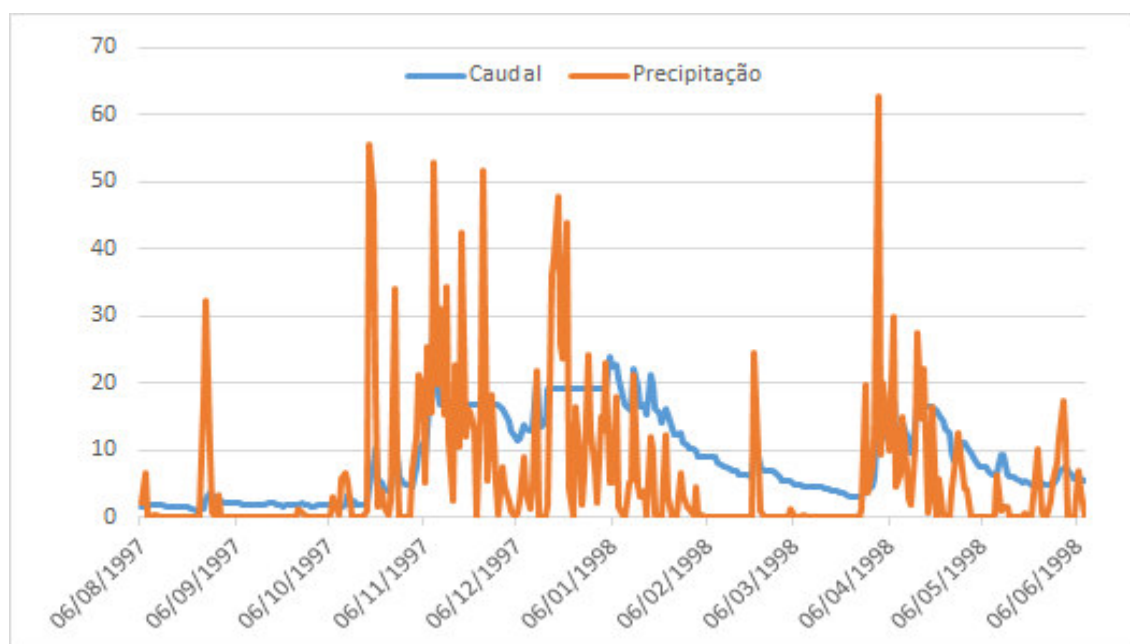


Figura 40_Gráfico caudal-precipitação de 6 Agosto de 1997 a 8 de Junho de 1998

Pela observação do gráfico, verifica-se um aumento de caudal consoante um período elevado de precipitação, o que comprova a qualidade do período escolhido. Assim, com base nesta série de dados, procedeu-se a nova calibração no programa RRL e os valores dos parâmetros obtidos foram considerados no programa Sobek. Apresenta-se de seguida na Figura 41, a comparação dos valores entre os caudais reais e medidos, no Sobek, agora no período entre 6 de Agosto de 1997 a 8 de Junho de 1998.

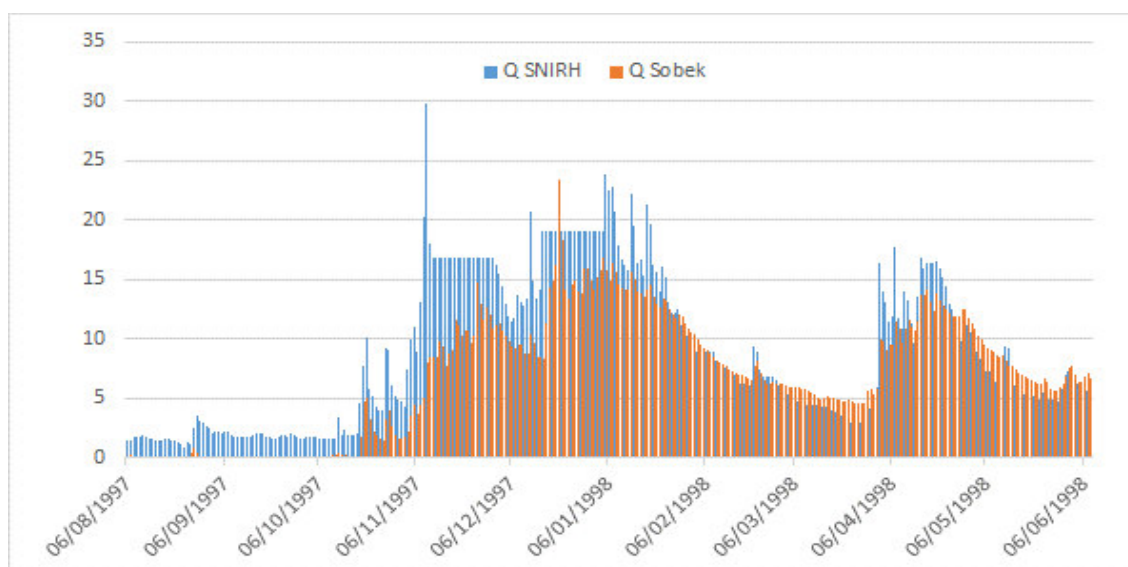


Figura 41_Gráfico dos resultados da simulação de 6 Agosto de 1997 a 8 de Junho de 1998

Observamos que num período inicial os caudais simulados são quase nulos e ao longo de todo gráfico apesar da forma de ambos ser muito semelhante. O caudal simulado no Sobek apresenta menores valores, o que pode acontecer devido ao erro de definição dos valores dos parâmetros iniciais da simulação. Na Figura 42 apresenta-se os resultados da regressão linear para a simulação deste mesmo período. Verifica-se que os resultados conseguidos são melhores do que para o intervalo de tempo completo (5 anos). O valor de R^2 é de 0,7776 e a diferença entre as médias de caudal na estação e caudal simulado é de $1,89 \text{ m}^3/\text{s}$. Apesar do valor modesto do R^2 , assumiu-se este valor de calibração para inclusão do modelo na plataforma Delft-FEWS.

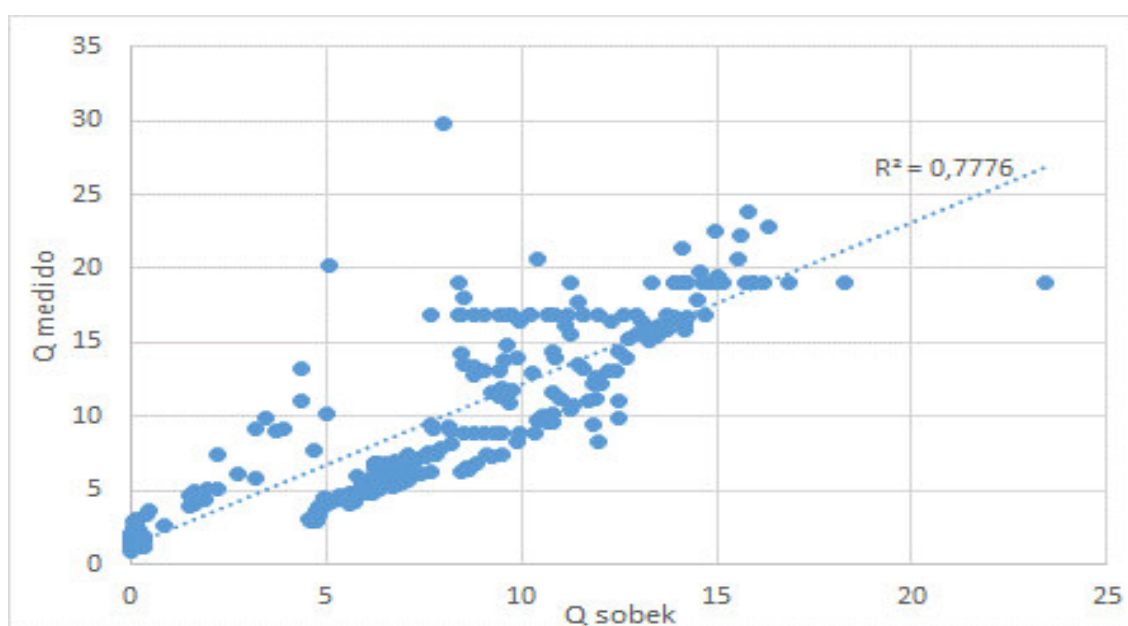


Figura 42_Gráfico dos resultados da regressão linear de 6 Agosto de 1997 a 8 de Junho de 1998

Foi realizada uma simulação para um período de tempo compreendido entre 1 de Outubro de 1985 e 30 de Setembro de 1990, precisamente 5 anos, para a estação hidrométrica de Ponte Brandão, no rio Selho. Na Figura 43 temos o gráfico dos resultados da simulação onde se compara o caudal medido com o caudal simulado.

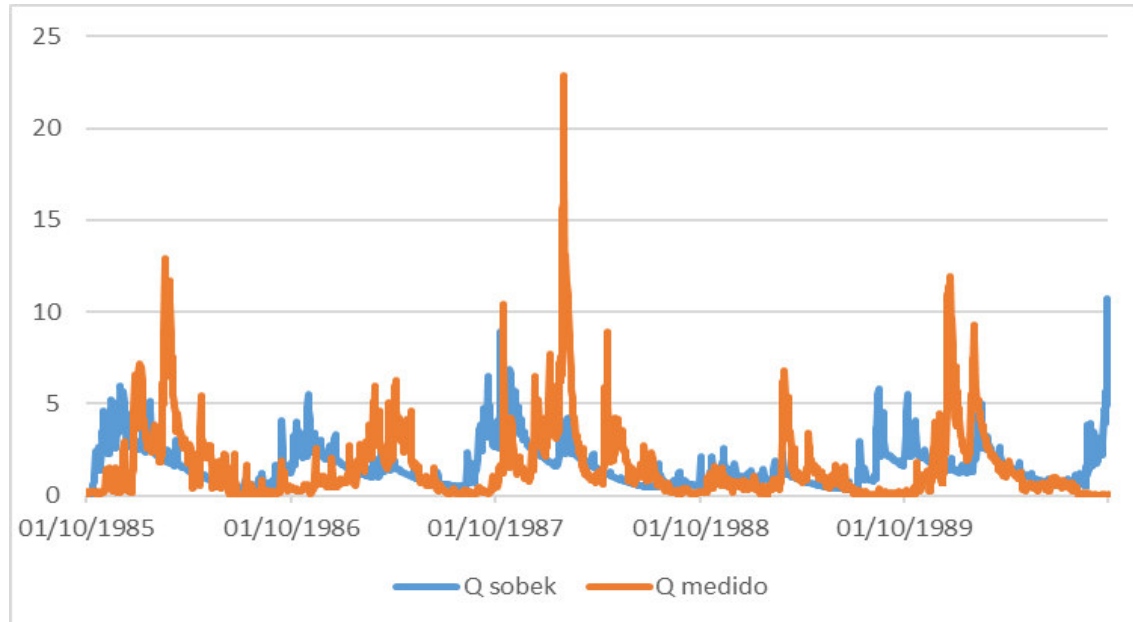


Figura 43_Gráfico dos resultados da simulação 1 de Outubro de 1985 a 30 de Setembro de 1990

Analisando agora os resultados obtidos na simulação para a bacia do rio Selho é possível verificar-se que existe uma boa correspondência entre o caudal medido na estação e o caudal simulado no *software* Sobek. Na Tabela 8 temos a diferença entre a média de caudal real e a média de caudal simulado para o período simulado.

Tabela 8_Diferenças entre caudal real e caudal simulado, Ponte Brandão

<i>1 de Outubro de 1985 a 30 de Setembro de 1990</i>	
Média do Caudal na Estação (m^3/s)	1,53
Média do Caudal Simulado (m^3/s)	1,63
Diferença entre os Caudais	0,1

Na Figura 44 temos os resultados da regressão linear para a bacia do rio Selho para o período seleccionado. Os resultados não foram os ideais, uma vez que apresenta o valor de R^2 igual a 0,0373.

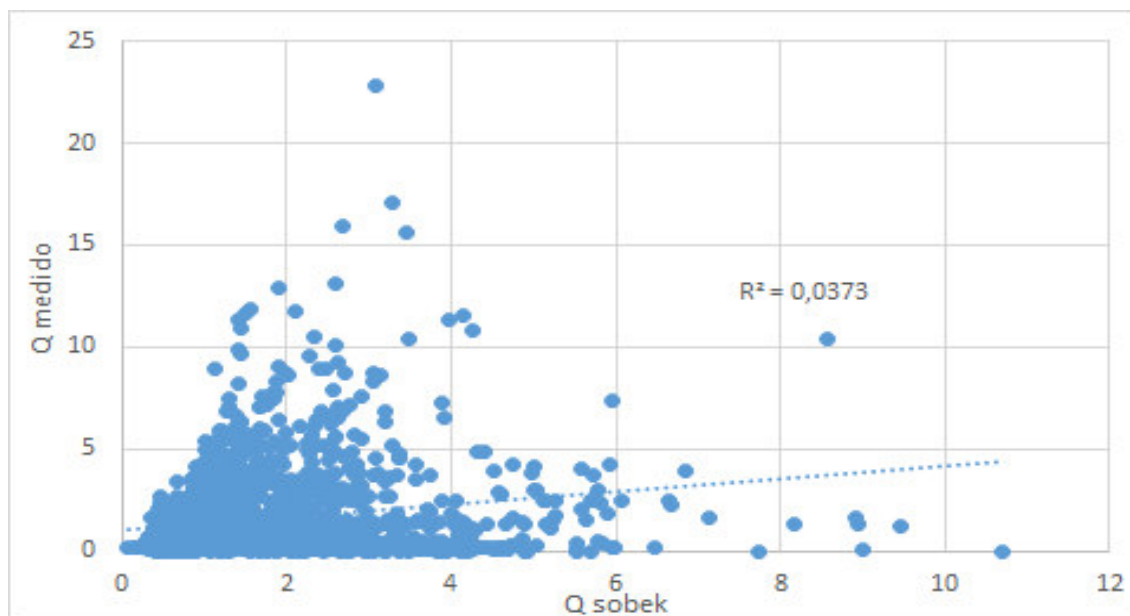


Figura 44_ Gráfico dos resultados da regressão linear 1 de Outubro de 1985 e 30 de Setembro de 1990

Para uma melhoria do resultado, realizou-se novamente um gráfico caudal-precipitação, com base nesta série de dados procedeu-se a nova calibração no programa RRL e os valores dos parâmetros obtidos foram considerados no programa Sobek. Apresenta-se de seguida na Figura 45, a comparação dos valores entre os caudais reais e medidos, no Sobek, agora no período entre 6 de Agosto de 1989 a 8 de Junho de 1990.

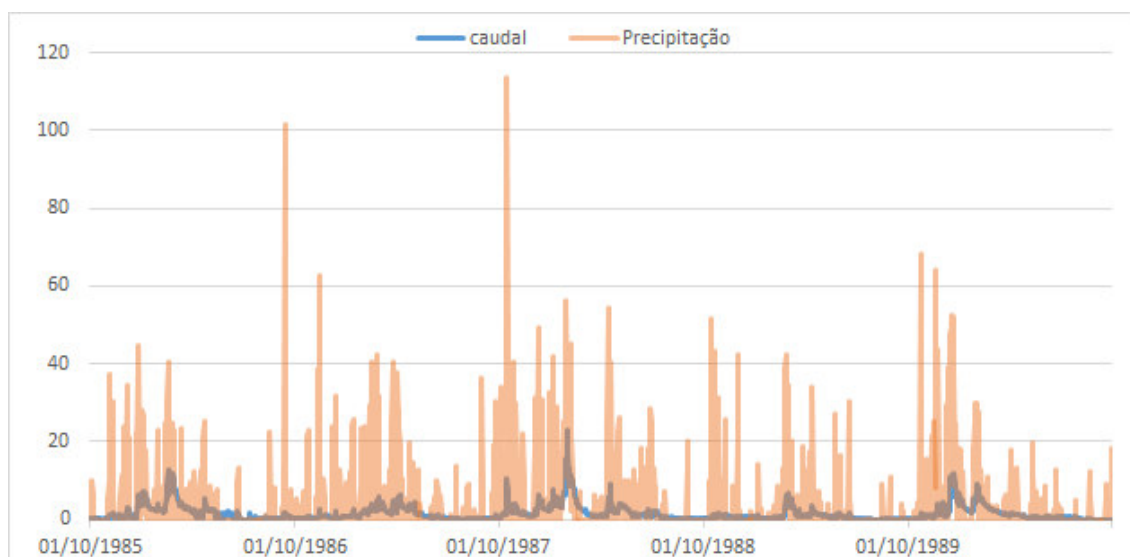


Figura 45_ Gráfico caudal-precipitação de 1 de Outubro de 1985 e 30 de Setembro de 1990

Escolheu-se então o período entre 6 Agosto de 1989 a 8 de Junho de 1990, que representa a meu ver o melhor resultado. Apresenta-se de seguida de uma forma mais pormenorizada o período escolhido na Figura 46.

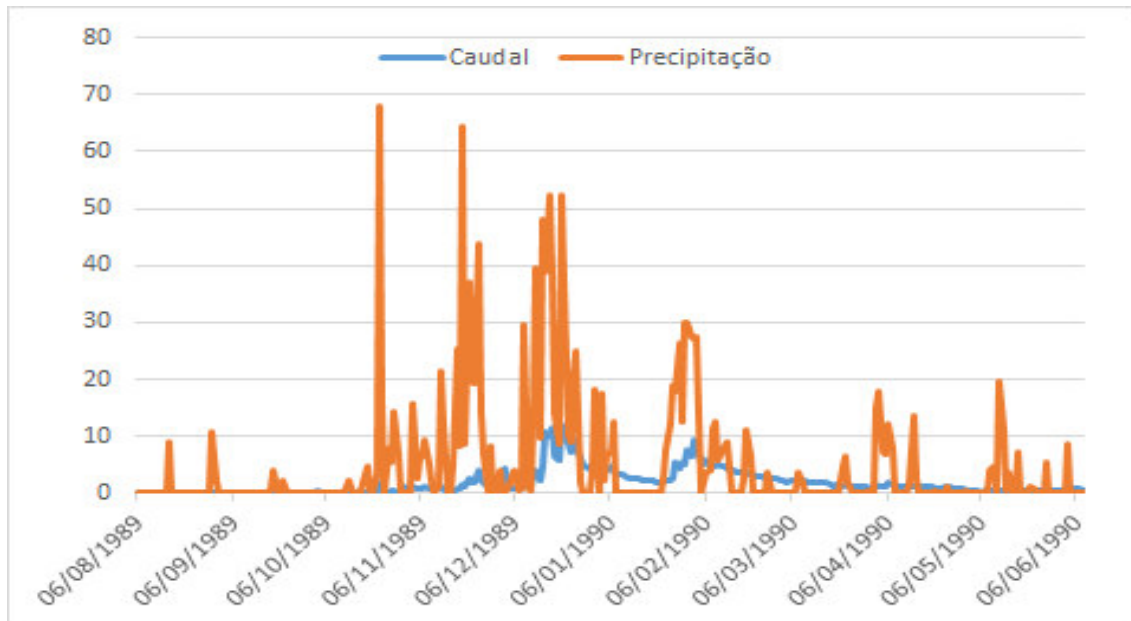


Figura 46_Gráfico caudal-precipitação de 6 Agosto de 1989 a 8 de Junho de 1990

De seguida procedeu-se a nova calibração no Sobek para o novo período escolhido.(Figura 47)

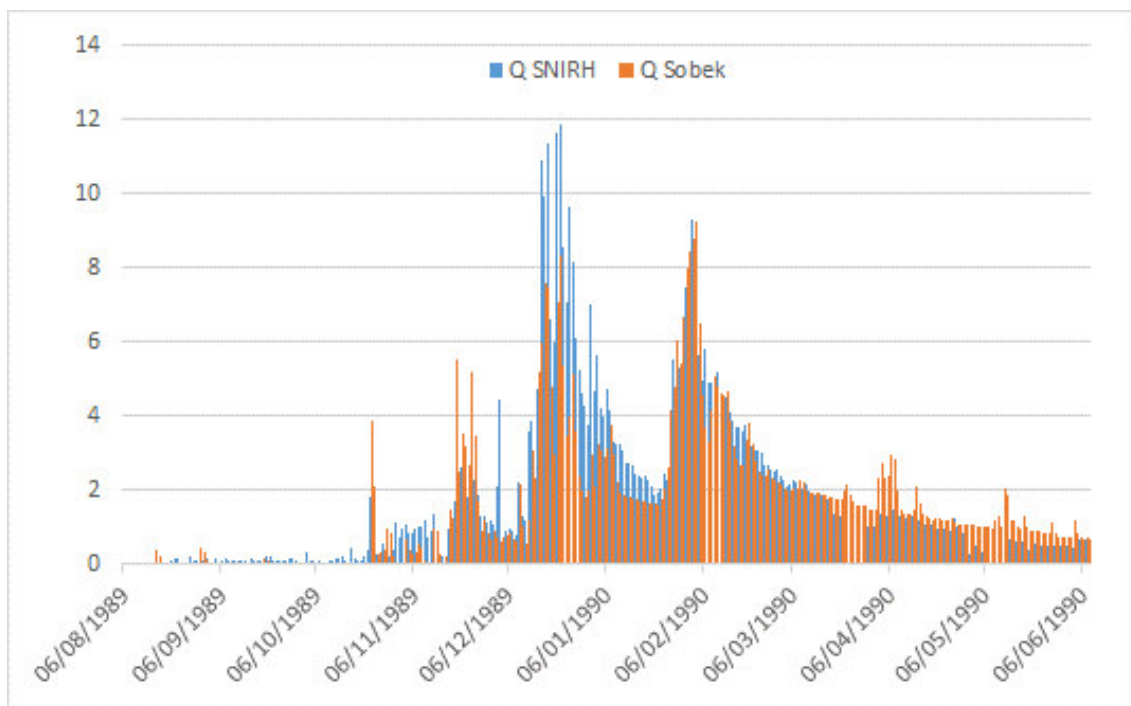


Figura 47_Gráfico dos resultados da simulação 6 Agosto de 1989 a 8 de Junho de 1990

Pela observação do gráfico observamos que os valores no geral são muito semelhantes à exceção de alguns picos, que é normal na calibração serem mais acentuados na calibração que na realidade. Na Figura 48 temos os resultados da regressão linear para a simulação deste mesmo período, onde os resultados conseguidos são melhores do que para o intervalo de tempo

total. O valor de R^2 é de 0,7831 e a diferença entre as médias de caudal na estação e caudal simulado é de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$.

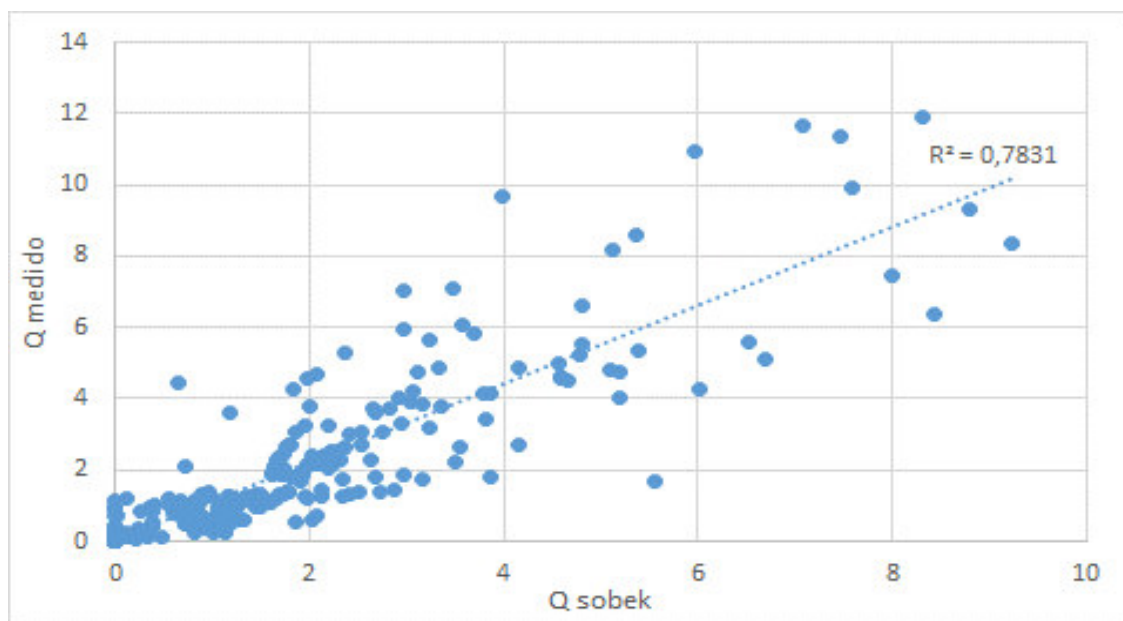


Figura 48_Gráfico dos resultados da regressão linear de 6 Agosto de 1989 a 8 Junho de 1990

6. PLATAFORMA DELFT-FEWS – RIOS ESTE E SELHO

Forecasting é o processo de gerar previsões do futuro com base em eventos do passado, com apresentação de dados e análise de tendências para uma variável, neste caso a precipitação. Neste trabalho, utilizaram-se dados históricos e uma fonte de dados externa para o registo de precipitações. Para obtenção de dados históricos utilizou-se a plataforma SNIRH através das estações de monitorização instaladas no nosso país. A fonte de dados externa corresponde a dados de Radar, fornecidos pelo servidor THREDDS (Thematic Realtime Environmental Distributed Data Service), operado pela MeteoGalicia.

A previsão de eventos de precipitação é caracterizada por um elevado grau de incerteza. Para atenuar e avaliar essa incerteza, embora de modo qualitativo, recorreu-se aos dados de precipitação de dois modelos atmosféricos distintos. Geralmente é considerada uma boa prática considerar um maior número de modelos de modo a permitir a comparação entre os diferentes resultados obtidos. Em qualquer caso, os dados devem estar atualizados para que a previsão seja tão precisa quanto possível.

Para previsões atmosféricas recorreu-se ao modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting), tal como os dados de Radar, foram retirados do servidor THREDDS da MeteoGalicia, e ainda ao modelo GFS (Global Forecasting System) fornecido por um servidor da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

6.1 Funcionamento da plataforma Delft-Fews dos rios Este e Selho

A componente de previsão da plataforma foi contruída com base nos dados históricos das estações do SNIRH, no modelo construído no programa Sobek, e nos dados de previsão WRF e GFS que foram configurados na plataforma Delft-FEWS. Na plataforma, a interface inicial corresponde a um mapa com as diversas estações de monitorização de cada sub-bacia existente no SNIRH (Figura 49). Aqui as estações estão referenciadas como gauges, e as respetivas sub-bacias como basins.

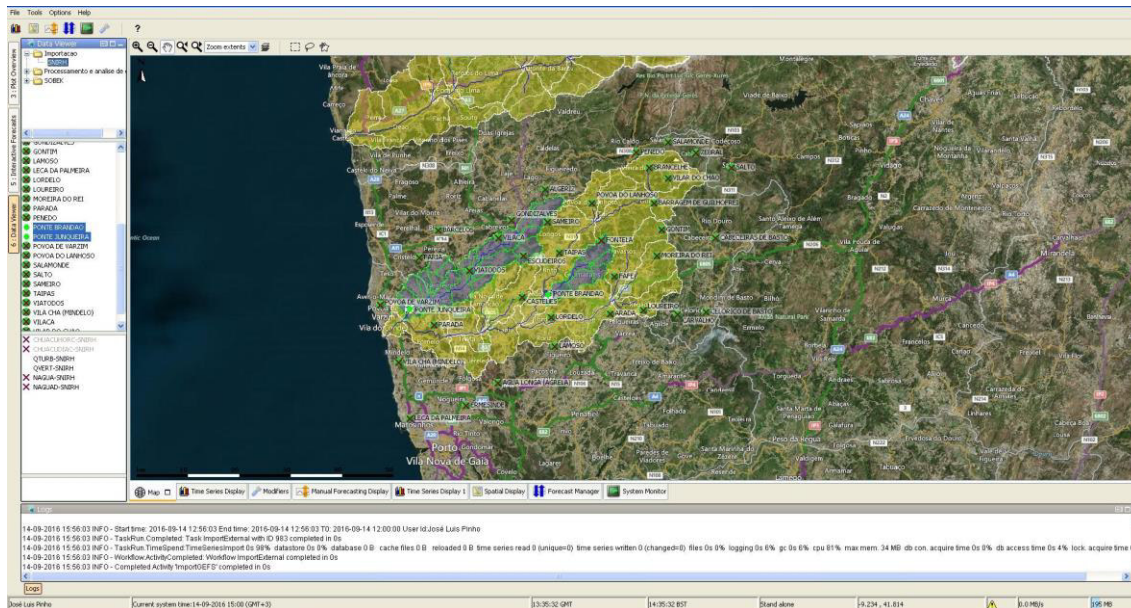


Figura 49_ Interface principal da plataforma Delft-FEWS

Neste trabalho e na fase de desenvolvimento atual da plataforma, optou-se por utilizá-la em modo manual, ou seja, os procedimentos são desencadeados pelo utilizador. Assim, neste modo de funcionamento, antes de se iniciar qualquer previsão é necessário seguir uma sequência de passos que permitam executar os procedimentos necessários para a realização das previsões. A interface utiliza uma série de janelas para diversas funcionalidades de importação de dados, processamento e análise de dados e para apresentação de resultados. É relativamente simples de utilizar, apenas é necessário aceder à janela “Manual Forecasting” para aceder aos procedimentos disponíveis e que foram previamente configurados. Aqui somos capazes de realizar a importação de todos os dados para interface, tanto dos dados existentes no computador como o acesso direto às diversas fontes web, e de seguida proceder à análise dos dados importados de observação e de previsão. Após este processo, utiliza-se a janela de visualização de resultados “Time Series”.

6.1.1 Importação dos Dados

Como referido anteriormente, todos os dados importados para o Delft-FEWS advêm de sistemas de previsão/observação. São importados registos de precipitação do radar da Galiza e do satélite TRMM e previsões de dois modelos, o WRF também da Galiza e do GFS da NOAA. De acordo com um conjunto de regras definidas, é necessário importar todos os dados das fontes de registos de precipitações, como os dados históricos, as observações de Radar e do sistema TRMM, e de seguida as fontes de previsões dos modelos GFS e WRF para a interface.

Estas tarefas são realizadas num único procedimento que foi configurado para o efeito e que foi designado de *Import external*. (Figura 50)

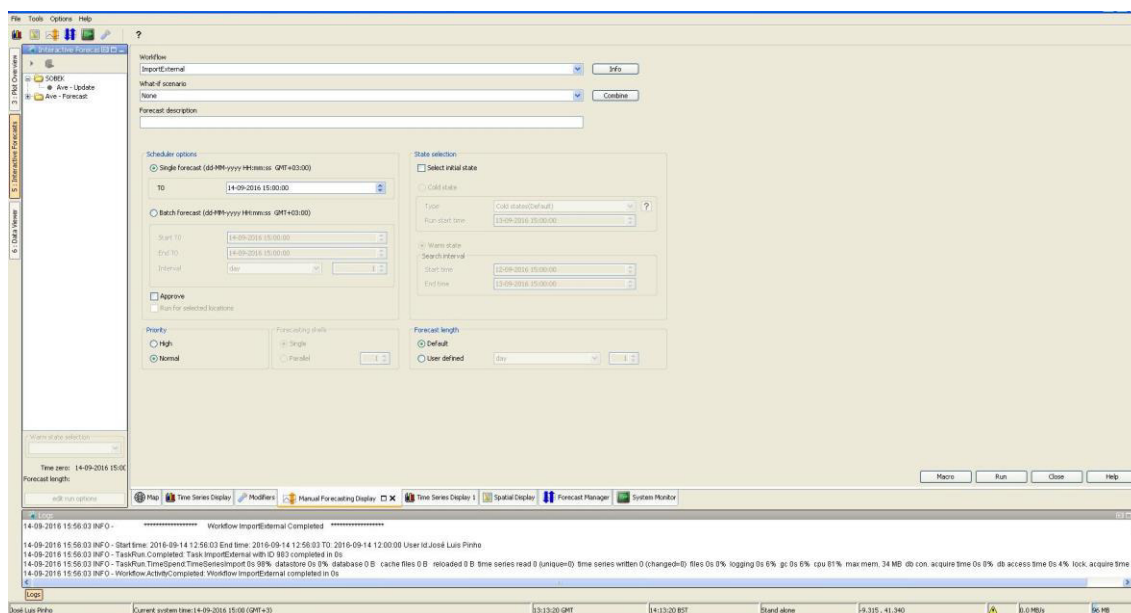


Figura 50_Import External, Delft- FEWS

Após a importação procede-se à execução do modelo para um período de dez dias anteriores à data da previsão. Deste modo consegue-se obter um estado inicial para a previsão que resulta da assimilação de todos os dados registados nos últimos dez dias. Esta execução do modelo é configurada num procedimento que foi designado de *Update* (Figura 51).

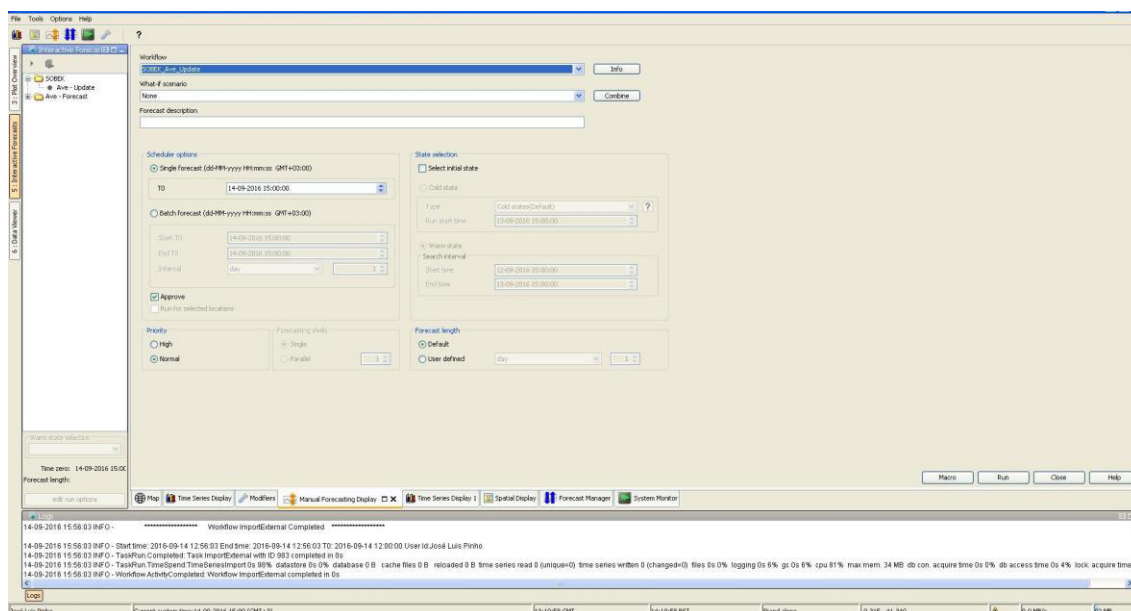


Figura 51_Update, Delft- FEWS

Após a realização do passo de Update procede-se à execução dos passos de previsão. São executados sequencialmente os procedimentos que foram configurados para cada conjunto de

dados de previsão disponíveis. Neste caso foram considerados dois: o Forecasting-GFS (Figura 52) e o Forecasting-WRF (Figura 53).

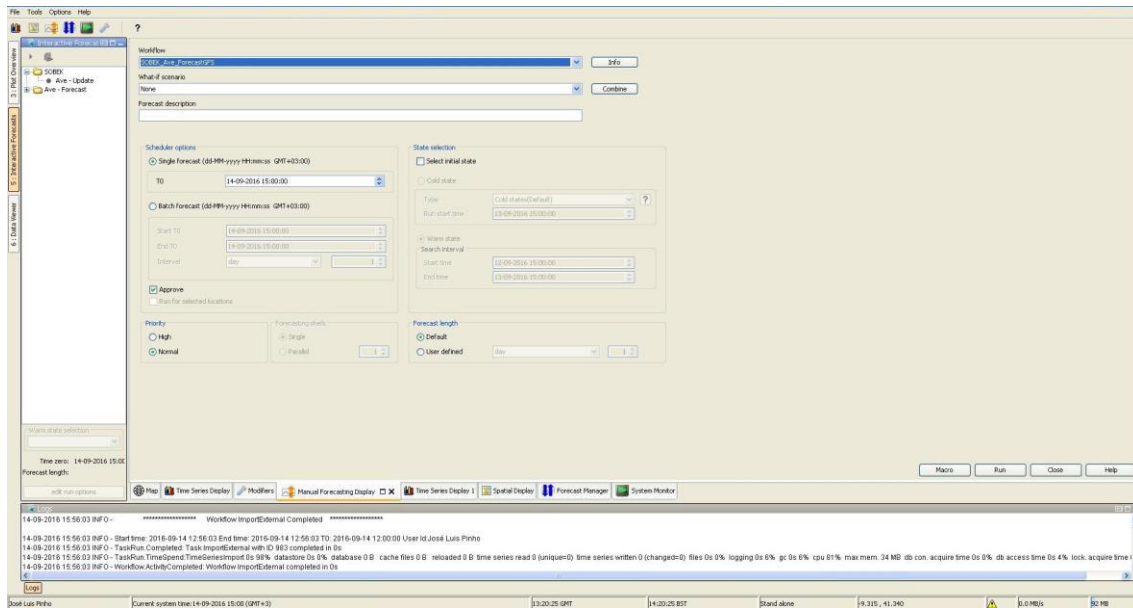


Figura 52_Forecasting GFS, Delft-FEWS

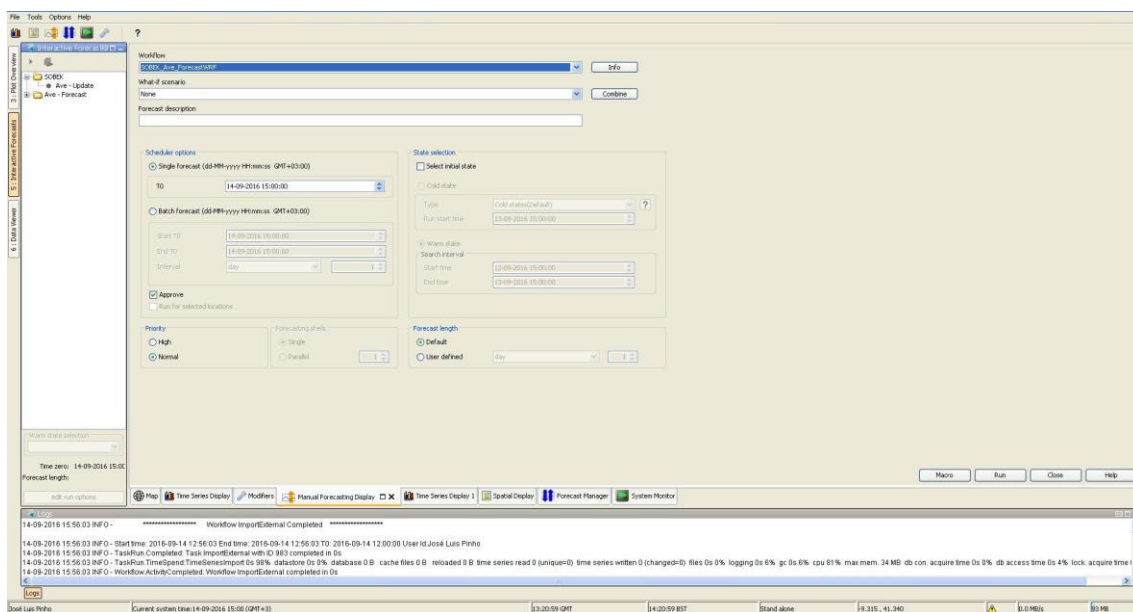


Figura 53_Forecasting WRF, Delft - FEWS

6.1.2 Processamento dos dados de precipitação

O Delft-FEWS é responsável pelo processamento dos dados de precipitação, incluídos nos basins para o modelo Delft e nos nós de sacramento para o modelo Sobek, procedendo à

interpolação dos dados das estações ou das grelhas de precipitação dos modelos de precipitação para as respetivas sub-bacias consideradas no modelo (Figura 54).

Uma outra funcionalidade configurada foi a transformação dos dados de refletividade do Radar em dados de precipitação.

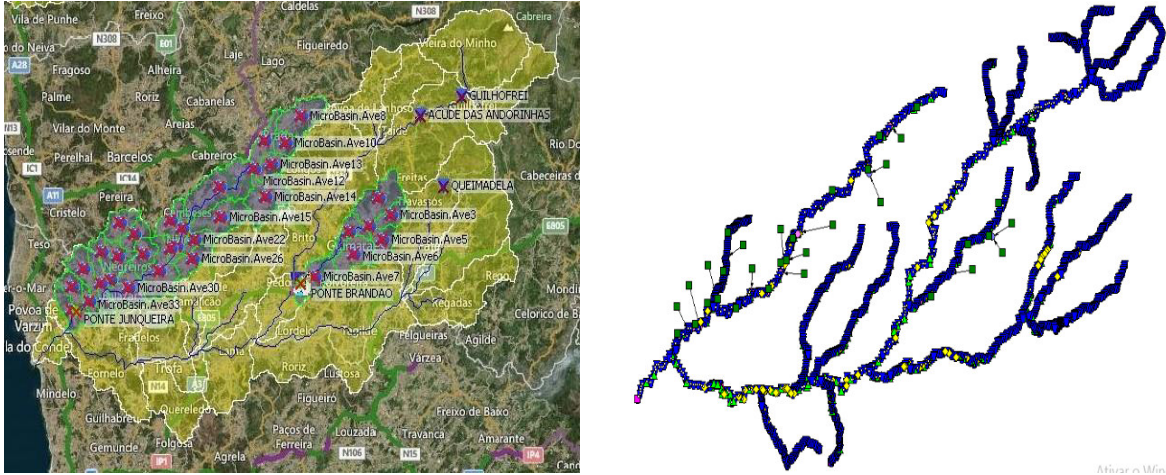


Figura 54_Visualização dos basins/nós de Sacramento nos respetivos modelos (Delft/Sobek)

6.1.3 Apresentação de resultados

Os resultados da previsão são obtidos na forma de gráficos e tabelas. Eventualmente, podem ser emitidos alertas para visualização geográfica de dados relevantes. Na Figura 55 apresenta-se a janela de visualização de resultados no Time Series.

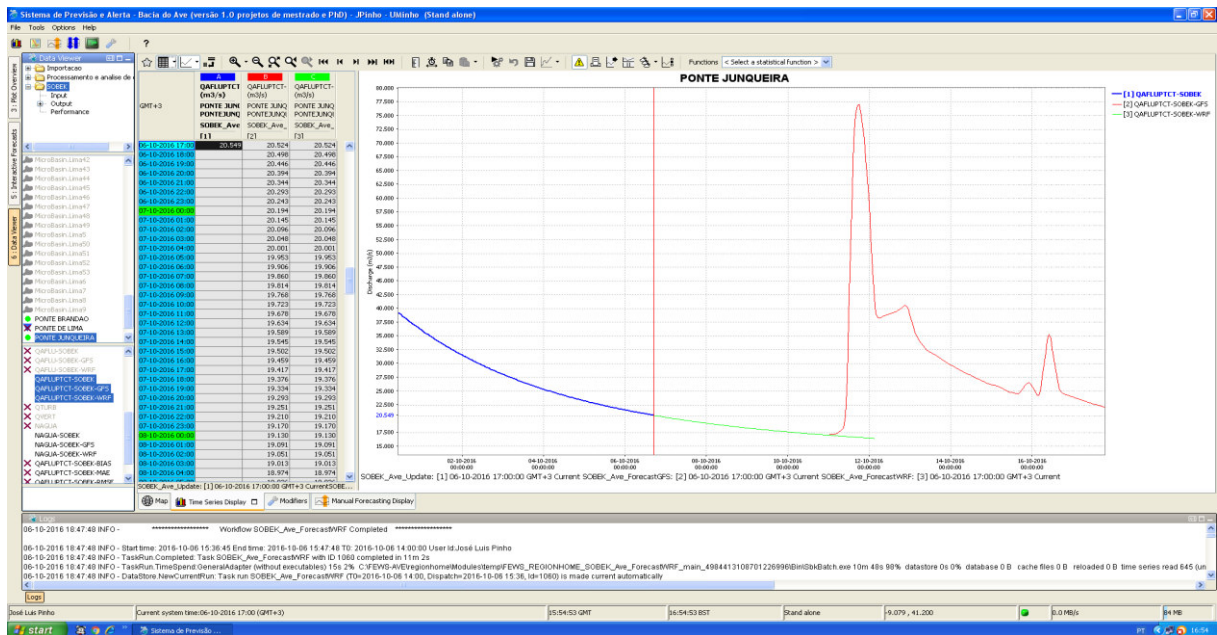


Figura 55_Time Series, Delft-FEWS

O Delft-Fews permite a visualização de dados espaciais e de séries temporais. Para os dados de observação e previsão, os resultados são apresentados no visualizador de dados espaciais de imagens de satélite, designado como “spacial display”. Para visualização dos resultados em localizações predefinidas, utiliza um visualizador de dados temporais sob a forma de gráfico, identificado no programa como “time series display”.

No spacial display podemos observar todo o tipo de dados recebidos de fontes externas. É apresentada a bacia em questão com os resultados devidamente legendados para sua interpretação. É possível ainda criar vídeos dos dados recebidos para visualizar a evolução da precipitação ao longo do tempo ou de outras variáveis georreferenciadas.

Na Figura 56 apresenta-se uma imagem com um registo de Radar que inclui as bacias dos rios Este e Selho, processadas na plataforma Delft-FEWS.

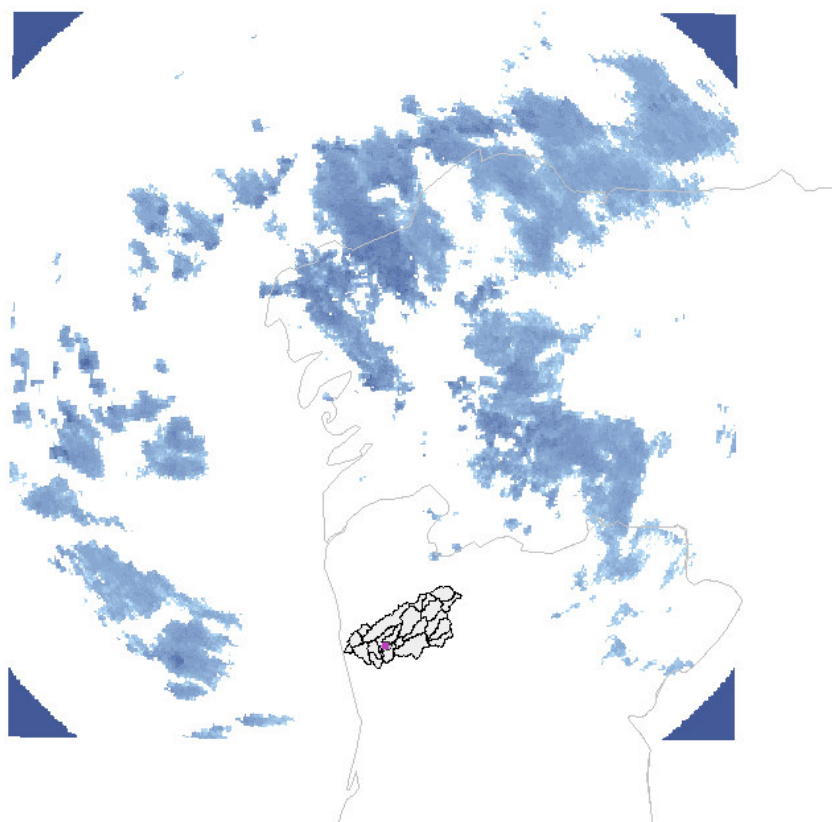


Figura 56_Dados de Radar Meteogalicia, Delft-FEWS

Nas figuras seguintes apresentam-se imagens com previsões do modelo atmosférico WRF, que incluem as bacias dos rios Este e Selho, processadas na plataforma Delft-FEWS.

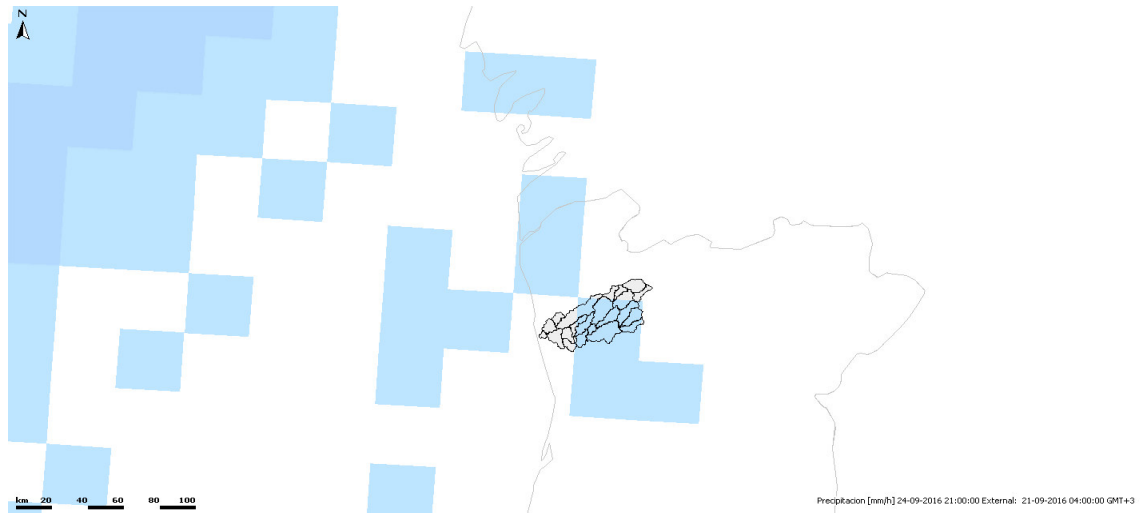


Figura 57_Precipitação no modelo WRF, Delft-FEWS

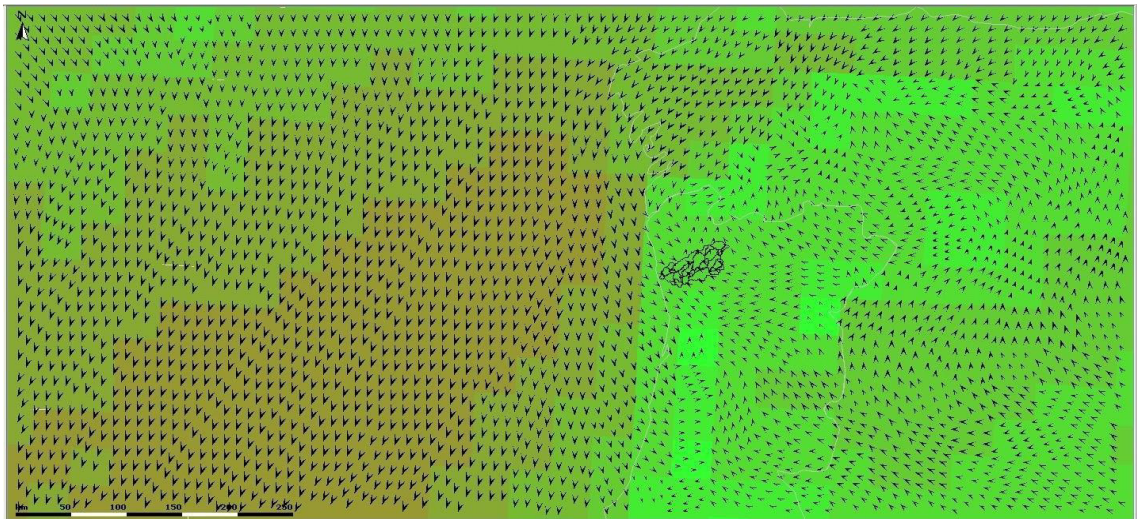


Figura 58_Vento no modelo WRF, Delft-FEWS

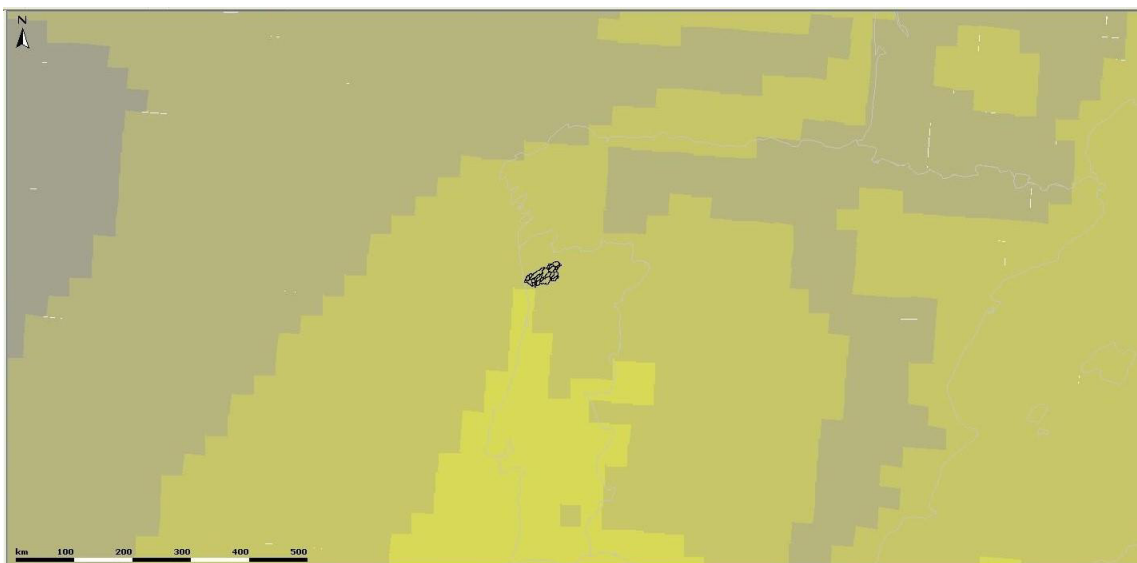


Figura 59_Pressão no modelo WRF, Delft-FEWS

Nas figuras seguintes apresentam-se imagens com previsões do modelo GFS, que incluem as bacias dos rios Este e Selho, processadas também na plataforma Delft-FEWS.

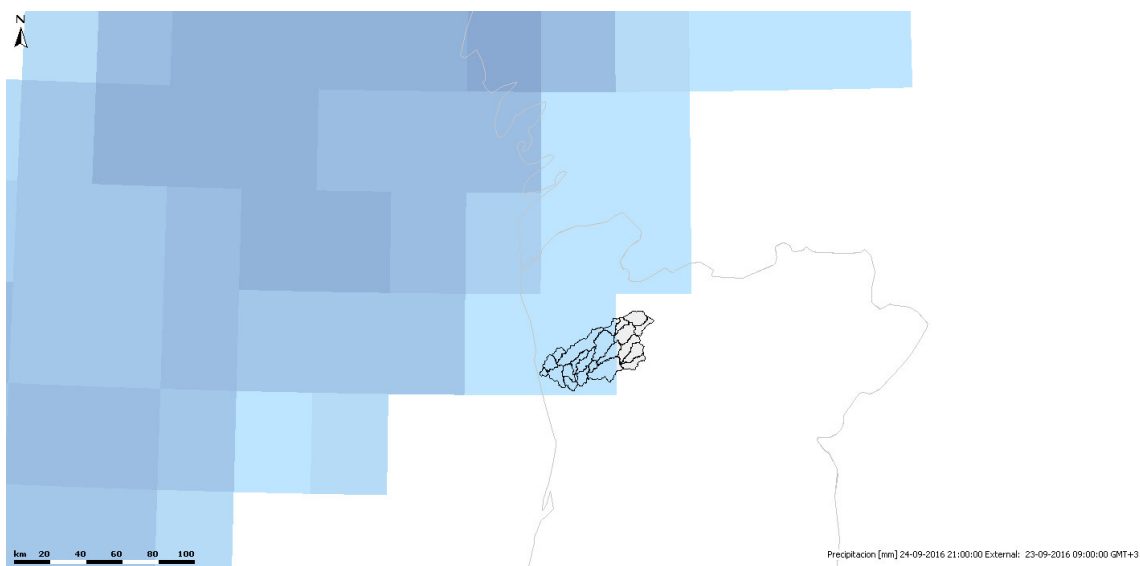


Figura 60_Precipitação no modelo GFS, Delft-FEWS

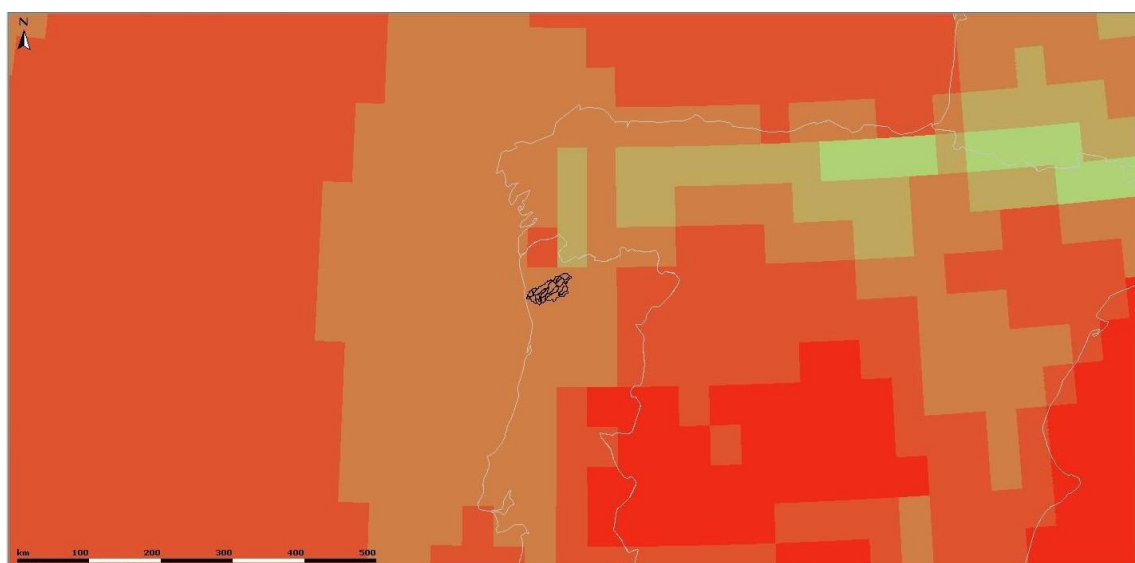


Figura 61_Temperatura no modelo GFS, Delft-FEWS

O *time series display* apresenta diferentes eixos em função dos resultados pedidos (níveis hidrométricos, caudais, intensidade de precipitação etc.), mas para o estudo apenas nos interessou os caudais escoados nas estações hidrométricas pelo que a escolha recai num gráfico caudal-tempo.

Na interface de gráficos é possível representar qualquer combinação de locais e variáveis. Nas Figuras 62 e 63 apresentam-se exemplos de visualização de resultados sob a forma de gráficos.

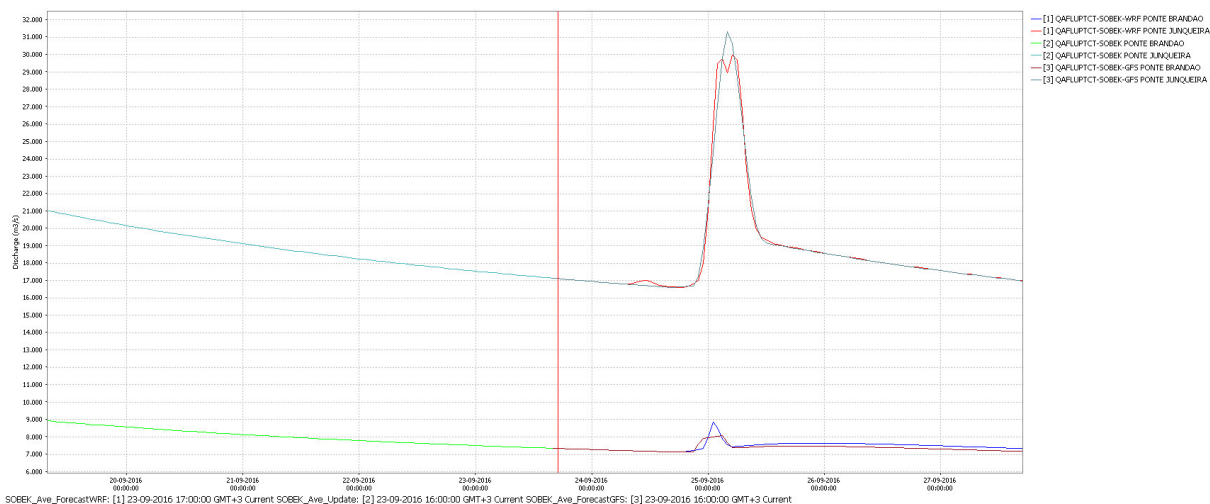


Figura 62_Time Series, Delft-FEWS

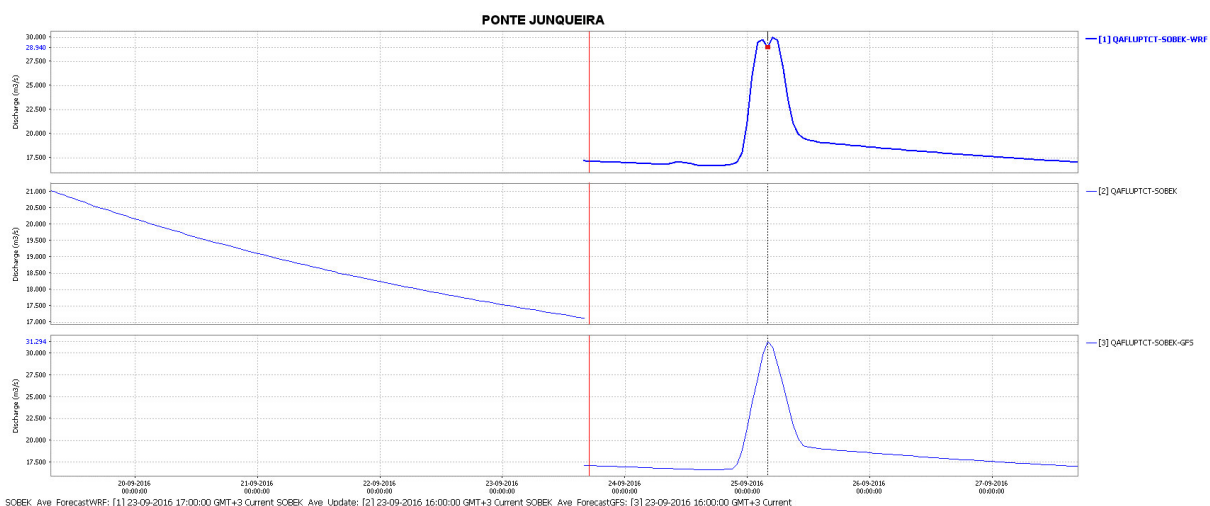


Figura 63_Time Series, Delft-FEWS

É possível configurar conjuntos de gráficos que ficam acessíveis através da janela “Plot Overview”, que neste caso foram definidos com as localizações das estações de Ponte de Junqueira e Ponte de Brandão e os respetivos valores dos caudais.

6.2 Resultados ilustrativos das previsões no Delft-FEWS dos rios Este e Selho

6.2.1 1º Evento de Precipitação – 25 de Dezembro 2016

Os resultados foram obtidos para um evento de precipitação ocorrido na madrugada do dia 25 de Setembro de 2016. Foram registadas duas previsões (WRF e GFS) para comparação da qualidade da previsão ao longo do tempo

Os resultados serão apresentados nas duas estações de monitorização escolhidas, Ponte Brandão e Ponte Junqueira, respetivamente para o rio Selho e rio Este.

1. Previsão a 21 de Setembro 1ª Resolução do Sistema

A primeira previsão ocorreu no dia 21 de Setembro, ou seja, 4 dias antes do evento de precipitação. O GFS e o WRF apresentam diferentes capacidades para previsão de eventos de precipitação, para o GFS a capacidade de previsão é para 10 dias após o início da previsão, enquanto que para o WRF é de apenas 4 dias. Assim, a quantidade de dados disponíveis não é a melhor pela existência de previsão de apenas um modelo, o GFS. Na primeira previsão os resultados não são muito fiáveis, tanto pela inexistência de dados de precipitação num dos modelos atmosféricos como pela limitação no horizonte de previsão. Como já foi mencionado anteriormente, a incerteza na previsão aumenta com o horizonte de previsão. Nas Figuras 64 e 65 apresentam-se os gráficos de resultados para Ponte Junqueira e Ponte Brandão, respetivamente.

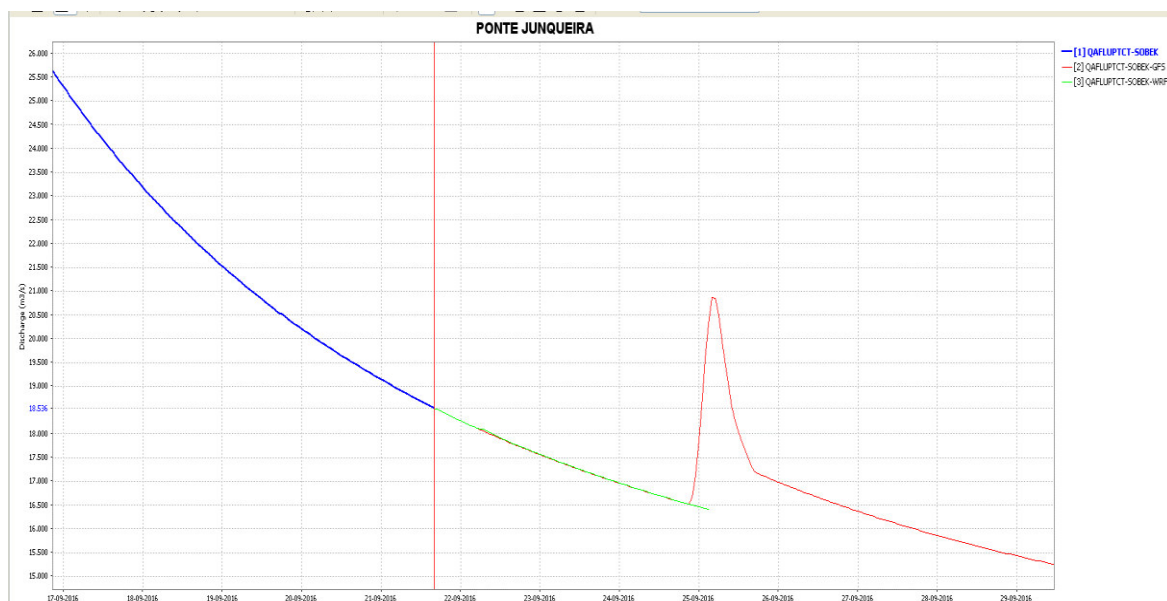


Figura 64_ Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 21 de Setembro



Figura 65_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 21 de Setembro

Podemos observar em ambos os gráficos o pico de precipitação da previsão realizada com dados GFS a vermelho. Também é visível que até ao dia do evento não ocorreu qualquer precipitação pelo que a curva de ambos os modelos continua descendente. A curva verde representa os resultados do caudal obtidos com dados de previsão do modelo WRF.

A previsão do modelo GFS aponta para um caudal máximo a rondar os $21 \text{ m}^3/\text{s}$, para Ponte Junqueira, e $7,35 \text{ m}^3/\text{s}$, para Ponte Brandão.

2. Previsão a 23 de Setembro 2ª Resolução do Sistema

A segunda previsão ocorreu no dia 23 de Setembro, ou seja, 2 dias antes do evento de precipitação e após 2 dias da 1ª previsão. Aqui a qualidade dos dados apresenta uma melhoria bastante significativa, com o evento a ser previsto pelos dois modelos atmosféricos, e a diminuição da incerteza revelada pela aproximação dos resultados obtidos pelos dois modelos. Nas Figuras 66 e 67 apresentam-se os gráficos de resultados para Ponte Junqueira e Ponte Brandão, respetivamente.

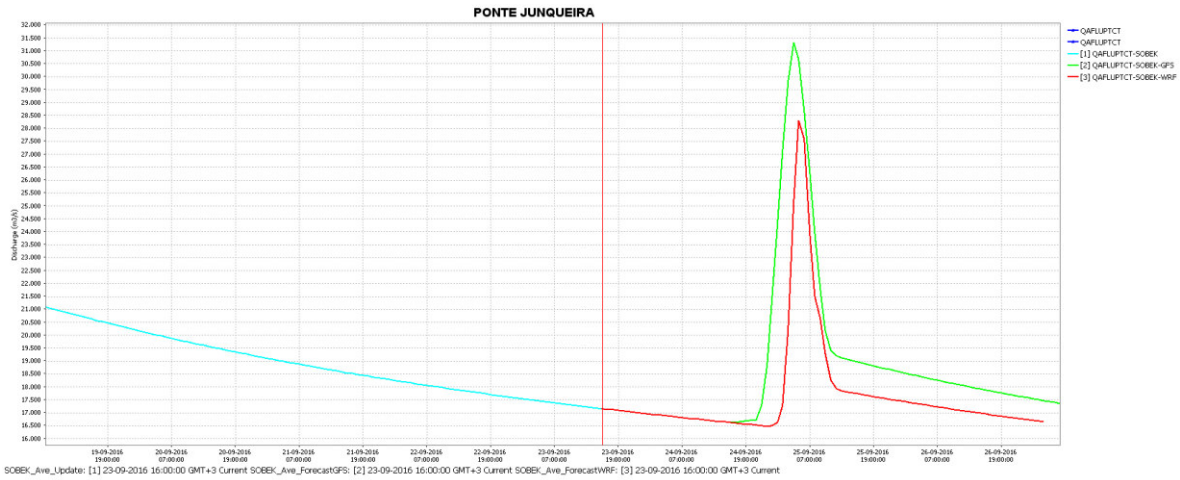


Figura 66_Delft-FEWS - Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 23 de Setembro

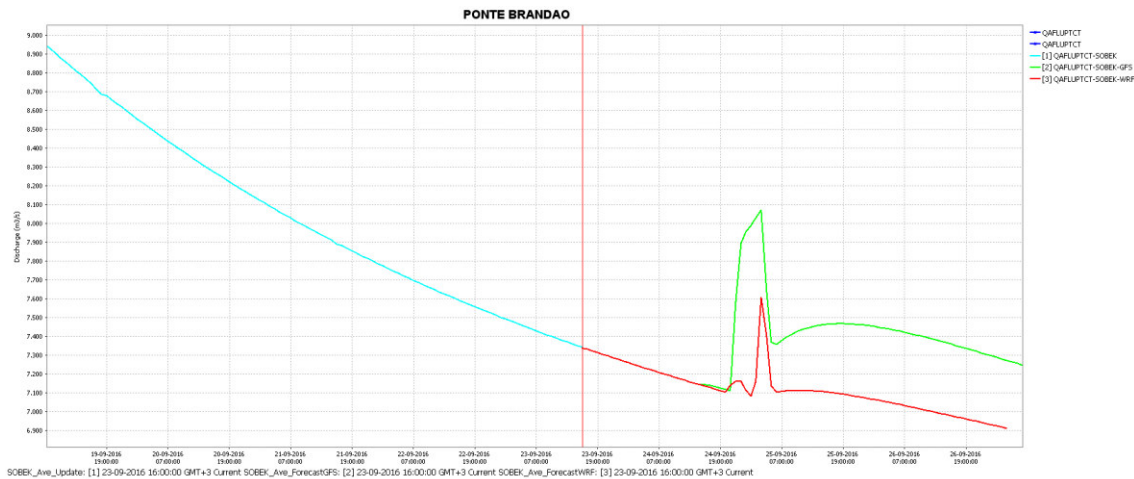


Figura 67_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 23 de Setembro

Em ambos os casos o modelo GFS apresenta valores superiores ao modelo WRF. Isto não quer dizer que corresponda valores superiores ao real, podem até ser menores, indica apenas que a resolução do modelo GFS aponte para valores superiores comparativamente ao modelo WRF para este caso.

Os valores apresentados para Ponte Junqueira apontam para um caudal máximo a rondar os $31,25 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo GFS e $28,25 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo WRF, entre as 4h e a 4h15 do dia 24 de Setembro, para ambos os modelo. Para Ponte Brandão o caudal máximo simulado foi $8,05 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo GFS e $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo WRF, ambos para as 2 h 45min do mesmo dia.

6.2.2 2º Evento de Precipitação – 11 de Outubro 2016

1. Previsão a 6 de Outubro 1ª Resolução do Sistema

A primeira previsão ocorreu no dia 6 de Outubro, ou seja, 5 dias antes do evento de precipitação. Tal como aconteceu no evento anterior, esta resolução do sistema é a que apresenta piores resultados, pela existência de apenas um modelo, o GFS. Assim a fiabilidade e a qualidade dos dados não é a melhor falta do termo de comparação de dados entre os modelos WRF e o GFS, evoluindo conforme a aproximação do evento. Nas Figuras 68 e 69 apresentam-se os gráficos de resultados para Ponte Junqueira e Ponte Brandão, respetivamente.

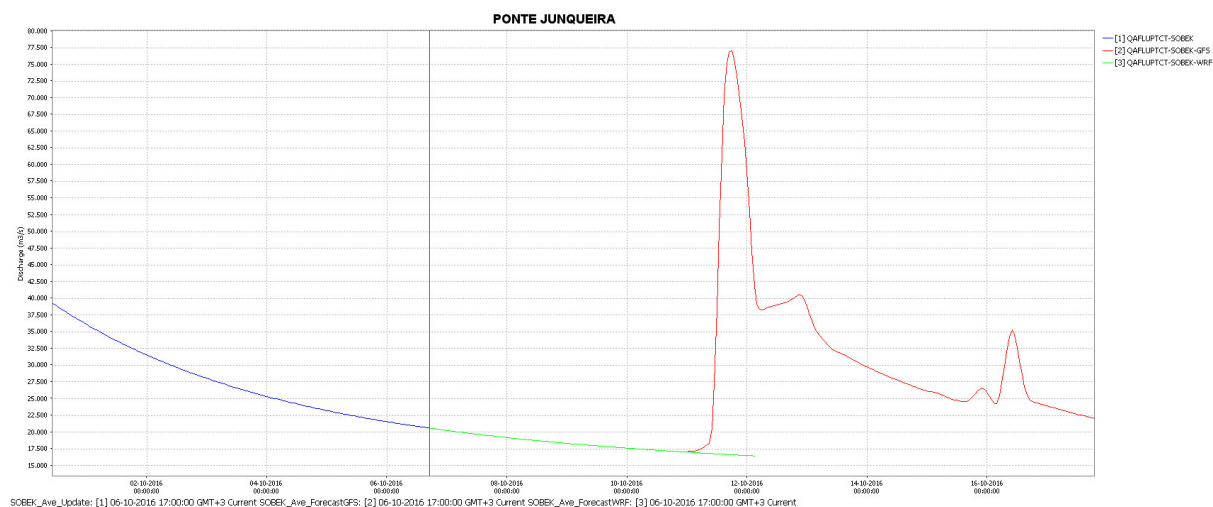


Figura 68_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 6 de Outubro

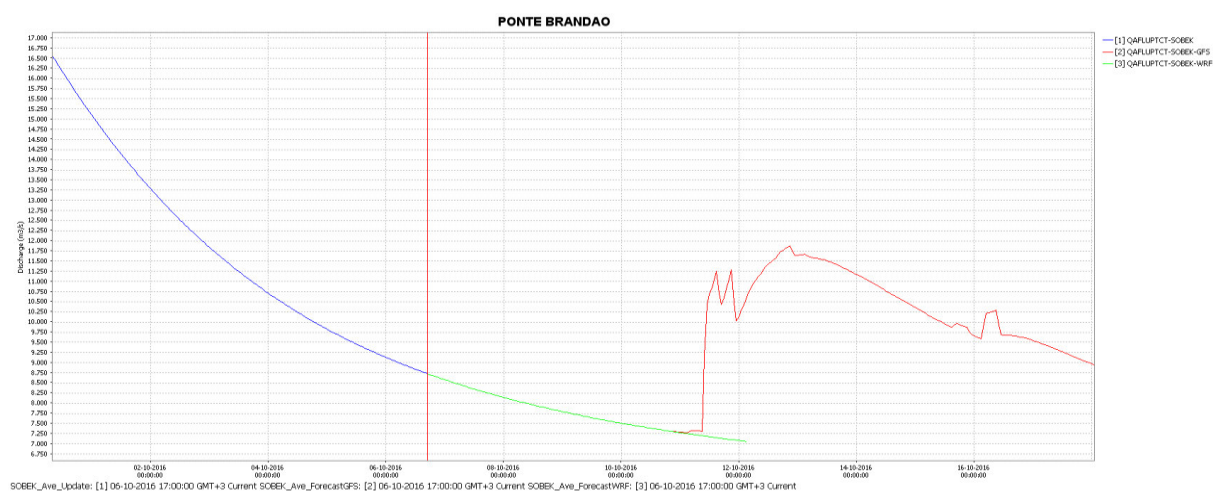


Figura 69_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 6 de Outubro

Podemos observar através de ambos os gráficos o pico de precipitação realizada com dados GFS a partir da segunda metade do dia 11 de Outubro, representado no gráfico a vermelho.

Podemos observar através dos dois gráficos que o evento de precipitação é diferente nas duas estações, em Ponte Brandão o evento é mais suave e duradouro ao contrário do que acontece em Ponte Junqueira, onde ocorre um evento rápido e intenso de precipitação. Também é visível que até ao dia do evento não ocorreu qualquer acontecimento de precipitação pelo que a linha de ambos os modelos continua descendente. A curva verde representa os resultados do caudal obtidos com dados de previsão do modelo WRF.

A previsão do modelo GFS aponta para um caudal máximo a rondar os $77,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para as 17h10 min no dia 11 de Outubro em Ponte Junqueira e $11,8 \text{ m}^3/\text{s}$ para as 22h 18 mins do dia 12 de Outubro em Ponte Brandão.

2. Previsão a 8 de Outubro 2ª Resolução do Sistema

A segunda previsão ocorreu no dia 8 de Outubro, ou seja, 2 dias antes do evento de precipitação e após 2 dias da 1ª previsão. Aqui a qualidade dos dados apresenta uma melhoria bastante significativa, no entanto, continua a existir apenas a previsão de um modelo atmosférico, o GFS. No modelo WRF apenas se encontra na parte final uma elevação de caudal mínimo. Nas Figuras 70 e 71 apresentam-se os gráficos de resultados para Ponte Junqueira e Ponte Brandão, respetivamente.

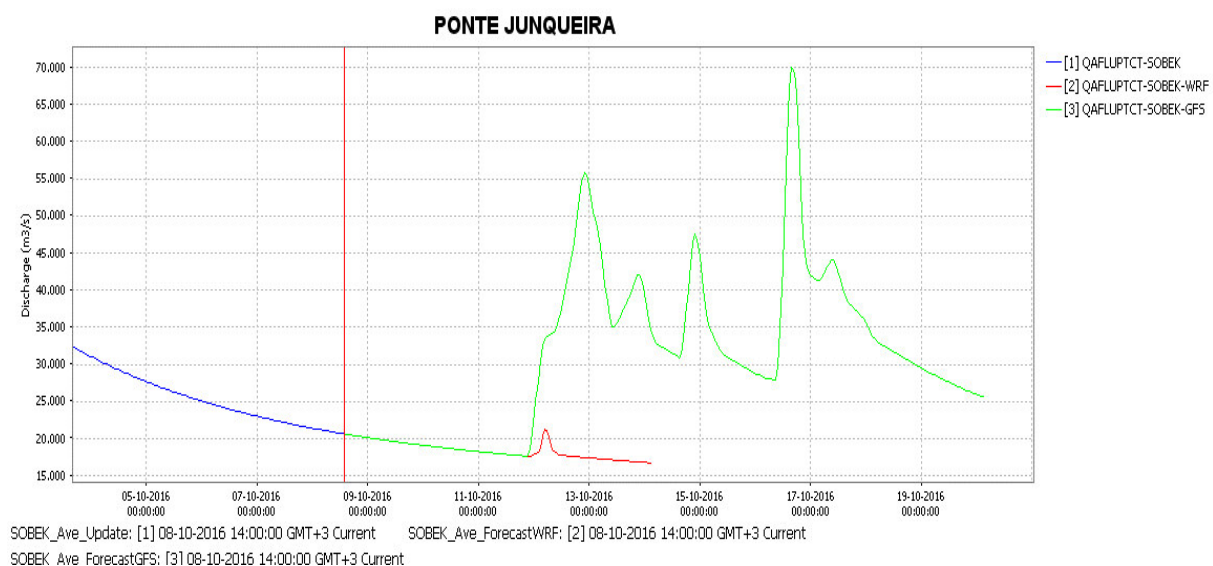


Figura 70_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 8 de Outubro

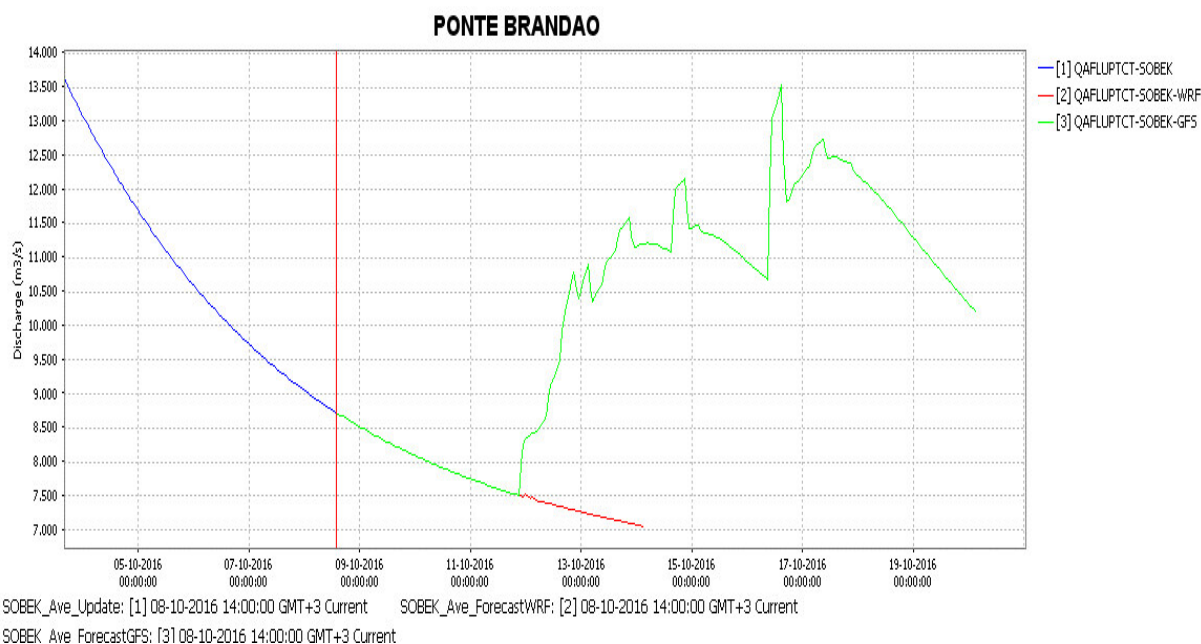


Figura 71_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 8 de Outubro

Podemos observar no modelo WRF a diferença de resultados nas duas estações, diferente nas duas estações, em Ponte Brandão o evento é mais suave e duradouro ao contrário do que acontece em Ponte Junqueira, onde ocorre um evento rápido e intenso de precipitação.

Os valores apresentados no Time Series em Ponte Junqueira apontam para uma descarga máxima a rondar os $70 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo GFS. Para Ponte Brandão a descarga máxima calculada foi $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$ no modelo GFS.

3. Previsão a 10 de Outubro 3ª Resolução do Sistema

A última previsão ocorreu no dia 10 de Outubro, após 2 dias da anterior previsão e 1 dia apenas antes do evento de precipitação. A partir da observação dos gráficos verifica-se uma variação de caudais ao longo dos dias, isto devido à variação de precipitação e à sua propagação ao longo da bacia hidrográfica, que se prolonga por vários dias. Aqui é apresentado as previsões dos dois modelos, como a evolução da qualidade dos dados depende da aproximação ao evento de precipitação, é possível obter uma qualidade de dados muito grande que permite aproximar a eficácia da previsão dos 100%. Nas Figuras 72 e 73 apresenta-se os gráficos de resultados para Ponte Junqueira e Ponte Brandão, respetivamente.

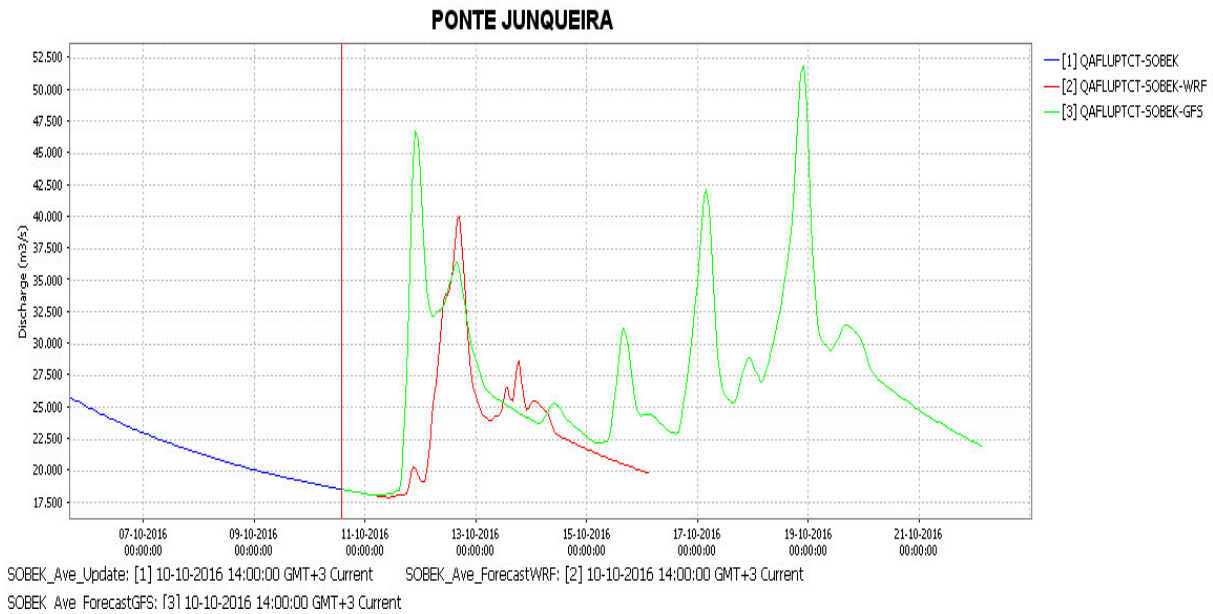


Figura 72_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Junqueira na previsão de 10 de Outubro

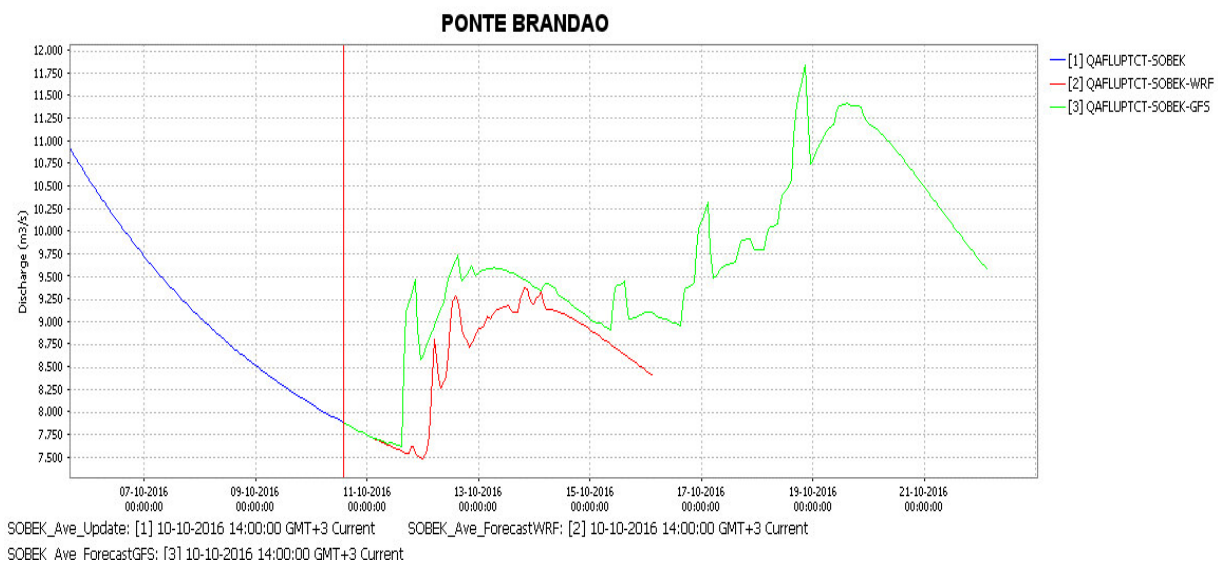


Figura 73_Delft-FEWS – Resultados em Ponte de Brandão na previsão de 10 de Outubro

Esta última previsão é o alvo de maior estudo pela enorme quantidade de dados existentes em ambos os modelos o que permite existir um termo de comparação entre eles e obter um melhor resultado para a previsão.

Em Ponte Junqueira as previsões dos dois modelos são um pouco diferentes à exceção de uma pequena parte, na segunda metade do dia 12 de Outubro. A previsão no modelo GFS tem o pico de caudal para a segunda metade do dia 11 de Outubro, por volta das 22h, com um caudal a rondar os $47,5 \text{ m}^3/\text{s}$, já no modelo WRF o seu pico de caudal ocorre na segunda metade do dia 12, por volta das 16h30min, a rondar os $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na estação de Ponte Brandão, em contrário a Ponte Junqueira, em ambos os modelos apresentam valores muito semelhantes o que permite uma avaliação muito boa para esta estação quanto à elevação do caudal. A previsão no modelo GFS tem o pico de caudal por volta das 14h do dia 12 com um caudal a rondar os $9,75 \text{ m}^3/\text{s}$, já no modelo WRF o seu pico de caudal ocorre por volta da mesma altura que a previsão do modelo GFS, a rondar os $9,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo principal o desenvolvimento de uma plataforma de previsão e alerta de cheias e inundações que possibilita a manipulação e a ligação de diferentes dados hidrometeorológicos. O sistema desenvolvido foi implementado na plataforma Delft-Fews, criada pela Deltares, tendo sido configurados dois sistemas de previsão baseados em resultados de modelos atmosféricos, o GFS e WRF. Atendendo à inexistência de registos de precipitações atuais no SNIRH foram considerados dados de Radar disponibilizados pela Meteogalicia. O modelo hidrológico foi calibrado com base em dados históricos.

Para o desenvolvimento da plataforma foi necessária a utilização de um conjunto de ferramentas computacionais de modelação hidrológica e hidrodinâmica e manipular resultados de previsões de modelos atmosféricos. Foi necessário realizar um estudo de diversas ferramentas que viriam a ser utilizadas durante a configuração da plataforma Delft-FEWS: Autocad; Rainfall Runoff Library RRL e o *software* Sobek.

Procedeu-se a uma análise e caracterização das bacias dos rios Este e Selho. Os dados históricos das estações meteorológicas foram utilizados na obtenção da precipitação e evaporação ponderadas, através do método de Thiessen, em cada uma das bacias hidrográficas.

O *software* RRL foi utilizado para se proceder à calibração do modelo através de combinações de vários métodos de otimização, com diferentes funções de erro. Os valores das funções de erro conseguidos na calibração da bacia do Este foi de 0,911 na 1ª combinação, através do método de otimização Rosenbrock Single Start com a função objetivo Nash-Sutcliffe Criterion, e na 2ª combinação 0,853 através do método Pattern Search Single Start com a função objetivo RMSE. Na calibração da bacia do Selho, para a 1ª combinação foi obtido o valor de 0,900 com o método Rosenbrock Single Start e a função objetivo Nash-Sutcliffe Criterion e na 2ª combinação o valor de 0,898 obtido pelo método Pattern Search Multi Start com a função objetivo RMSE. O software dispõe os valores dos respetivos parâmetros de Sacramento a introduzir no *software* Sobek.

Os valores obtidos foram introduzidos no modelo hidrológico construído no programa Sobek. Este modelo foi construído a partir de um modelo hidrodinâmico existente.

O modelo foi integrado na plataforma Delft-FEWS para realização de previsões nos rios Este e Selho, servindo de apoio a um sistema de alerta com o intuito de prever cheias e inundações nestas bacias.

O Delft-FEWS importa diretamente os dados de precipitação e as respetivas previsões que são disponibilizados na plataforma a partir de rotinas que procedem à interpolação dos dados de precipitação para o modelo Sobek.

Foram apresentados resultados ilustrativos de simulações de dois eventos distintos. Em ambas as previsões, o evento ocorrido não originou cheia tanto na bacia do Este como na bacia do Selho pela visualização dos gráficos que apresentaram baixo valor de caudais para ambas as bacias. Contudo, os valores a dois dias da ocorrência dos eventos, obtidos com os dois modelos de previsão são bastante próximos.

7.2 Recomendações para Desenvolvimentos Futuros

Para trabalhos futuros propõe-se uma análise estatística de várias simulações nos mesmos locais do rio, após a realização de um detalhado trabalho de campo para um largo período de dias, podendo assim analisar os resultados e otimizar o desempenho do modelo hidrodinâmico/hidrológico Sobek da Bacia do Ave, avaliando a qualidade dos dados medidos comparativamente aos recolhidos no terreno.

Introduzir novos dados de satélite baseados em algoritmos de registos de precipitação para aumentar o número de projetos de comparação aos dados históricos de superfície e de Radar, ou até integração deles mesmos, aumentando o grau de certeza das condições iniciais para a previsão. Um exemplo é o TRMM, possui um radar com capaz de monitorizar a precipitação e a sua variação na região tropical onde os dados convencionais são escassos.

Promover um melhoramento na qualidade das previsões introduzindo mais serviços de previsão meteorológica como por exemplo do centro europeu, e ainda adicionar previsões em condições de incerteza ("ensemble forecast"), como o GEFS (Global Ensemble Forecast System), que ajuda a definir a incerteza da previsão e estender a previsão do tempo bastante mais no futuro. Aplicar o procedimento desta dissertação a várias bacias hidrográficas portuguesas e a outras sub-bacias do Ave de modo a avaliar a eficiência do mesmo, pela elevada ocorrência de eventos de cheia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente. (2012). Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça, Anexo II.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2012). Planos de Gestão da Região Hidrográfica do Cávado, Ave e Leça, Anexo III.
- CARDOSO, A. H. (1998). Apontamentos de Hidráulica e Reabilitação Fluvial. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- CELESTE, Alcigeimes & CHAVES, Vanessa Silva. (2014). *Avaliação de Algoritmos de Otimização e Funções Objetivo para Calibração Automática Do Modelo Chuva-Vazão*.
- Comissão Europeia. (2007). *Diretiva 2007/60/CE do parlamento europeu e do conselho de 23 de outubro de 2007 relativa à avaliação e gestão dos riscos de inundações*.
- COSTA, Francisco. (2009). *A indústria têxtil na bacia hidrográfica do rio Ave Uma perspetiva segundo as fábricas de fição e tecidos, numa relação historicamente sustentada pelo domínio público hídrico*.
- Deltares. (2010). Delf-fews description-Schrem.
- Deltares. (2011). Sobek 1D/2D modelling suite for integral water solutions.
- DHI Water & Environment (2003). *MIKE11 a Modelling System for Rivers and channels Short Introduction Tutorial*.
- FARIA, Rita & PEDROSA, António. (2005). *Aplicação SIG na elaboração de cartografia temática de base na bacia hidrográfica do Rio Uíma – Santa Maria da Feira*.
- FERRAZ, Fernando, MILDE, Luiz & MORTATTI, Jefferson. (1999). *Modelos Hidrológicos Acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um Estudo de Caso*. Revista de ciência & tecnologia • v.14 – pp. 45-56.
- FRAGOSO, Marcelo. (1996). *As utilizações das imagens de radar meteorológico em climatologia*.
- IPMA. (2016). Área educativa - Radares Meteorológicos. Obtido de: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=radar01.xml>.
- LENCASTRE, Armando & FRANCO, Frederico Melo. (1984). Lições de hidrologia. Universidade Nova de Lisboa.
- LACERDA, M. A. et al. 1997. *APRH - Simpósio sobre aproveitamentos hidroelétricos*.
- LUCAS, Oriovaldo et al. (2010). *Calibração do modelo hidrodinâmico MIKE 11 para a sub-bacia hidrográfica do rio Piauitinga, Sergipe, Brasil*.

- MAIA, Rodrigo & RIBEIRO, A. Álvares. (1998). *As cheias e a gestão de bacias hidrográficas*.
- MARTINS, Pedro. (2012). Tese de Mestrado: *Sistemas de Previsão e Alerta de Cheias e Inundações*
- MEDEIROS, Ana. (2014). Tese Mestrado: *Desenvolvimento de um modelo hidrológico para inclusão num sistema de previsão e alerta de cheias na bacia hidrográfica do rio Cávado*
- MELO, Heber. (2010). Tese Mestrado: *Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: Uma avaliação metodológica*
- NETO, Ricardo Krauskopf, GUETTER, Alexandre Kolodynskie. & MINE, Miriam Rita Moro. (2007). *Modelo Hidrológico com Atualização de Estado Parte I: Modelagem Hidrológica*
- OLIVEIRA, Alex. (2006). *Implementação do modelo atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico topmodel para a bacia de União da Vitória*
- PEREIRA, Margarida & VENTURA, José Eduardo. (2004). Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. *As áreas inundáveis em meio urbano A abordagem dos instrumentos de planeamento territorial*
- PINHO, José Luís & VIEIRA, José Manuel. (2015). *Apontamentos de Gestão da Água*, Universidade do Minho
- PINHO, José Luís & VIEIRA, José Manuel (2006). *Aspetos da aplicação do Delft Hydraulics “SOBEK” no desenvolvimento de um sistema de gestão operacional da água em Alqueva*
- PINHO, José Luís, VIEIRA, José Manuel, & ARAÚJO, José. (2001). *Plataforma Web de suporte ao sistema de modelação da rede hidrográfica da bacia do Rio Ave*
- PODGER, Geoff. (2004). *Rainfall Runoff Library User Guide*.
- QUEIROZ, Antônio. (2008). Tese Mestrado: *Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar*.
- RENNÒ, Camilo. (2003). *Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas*
- ROCHA, João. (1998). *O risco das inundações e a sua gestão*. Uma visão nacional e uma visão europeia.
- SANTOS, S. et al. (2006). *Os Sistemas de Informação Geográfica na Modelação Hidrológica*
- SANTOS, Alexandre Rosa dos et al. (2014). *ArcGIS 10.2.2 Passo a Passo Elaborando Meu Primeiro Mapeamento* VOLUME 1.
- SARAIVA, Maria da Graça Neto. (1999). Tese Mestrado: *O Rio como paisagem – Gestão de corredores fluviais no quadro do ordenamento do território*

TIMBADIYA, Prafulkumar. (2011). *Calibration of HEC-RAS Model on Prediction of Flood for Lower Tapi River, India*

USACE. (2010). HEC-RAS Reference Manual

U.S. Department of Commerce, NOAA. (2007). Evaluation of different Hydraulics models in support of national weather service operations

VIEIRA, Luís Manuel Vazquez & Pinho, José Luís Silva. (2014). *Calibração e validação de um modelo hidrológico para a bacia do rio Lima.*

WERNER, Micha, *et al.* (2013) Environmental Modelling & Software. *The Delft-FEWS flow forecasting system*

ANEXO I – DADOS HIDROMÉTRICOS E HIDROLÓGICOS RIO ESTE

Data	Caudal (m^3/s)	Precipitação (mm/dia)	Evaporação (mm/dia)
06/08/1997	1,39	2,2296148	2,15
07/08/1997	1,52	6,470447	1,65
08/08/1997	1,74	0,129271	2,2
09/08/1997	1,8	0,107847	2,45
10/08/1997	1,79	0,2174601	3,1
11/08/1997	1,86	0,4395214	2,55
12/08/1997	1,77	0	2,75
13/08/1997	1,67	0	2,6
14/08/1997	1,56	0	3,1
15/08/1997	1,51	0	2,4
16/08/1997	1,48	0	2,3
17/08/1997	1,44	0	2,05
18/08/1997	1,61	0	2,4
19/08/1997	1,63	0	2,85
20/08/1997	1,46	0	1,75
21/08/1997	1,48	0	2,85
22/08/1997	1,29	0	3
23/08/1997	1,22	0	3,45
24/08/1997	0,88	0	2,35
25/08/1997	1,25	0	1,6
26/08/1997	1,14	17,2161972	2,95
27/08/1997	2,56	32,2472342	2,45
28/08/1997	3,57	9,4785807	1,45
29/08/1997	3,05	0,5352864	2,6
30/08/1997	2,89	0	2,75
31/08/1997	2,71	3,4215221	3,25
01/09/1997	2,45	0	2,7
02/09/1997	2,1	0	4,1
03/09/1997	2,13	0	3,6
04/09/1997	2,22	0	3,4
05/09/1997	2,11	0	2,65
06/09/1997	2,17	0	1,8
07/09/1997	2,19	0	4,5
08/09/1997	1,88	0	5,1
09/09/1997	1,79	0	4,65
10/09/1997	1,79	0	3,45
11/09/1997	1,79	0	1,65
12/09/1997	1,79	0	1,75
13/09/1997	1,79	0	2,15
14/09/1997	1,79	0	2

15/09/1997	1,89	0	3,25
16/09/1997	2,05	0	3,8
17/09/1997	2,05	0	2,6
18/09/1997	1,98	0	3
19/09/1997	1,81	0	2,75
20/09/1997	1,8	0	2,4
21/09/1997	1,65	0	2,6
22/09/1997	1,66	0	2,55
23/09/1997	1,81	0	2,15
24/09/1997	1,85	0	1,8
25/09/1997	1,86	0	2,25
26/09/1997	1,82	1,2151474	1,6
27/09/1997	2,02	0,5040624	1,55
28/09/1997	1,9	0,4181925	3,25
29/09/1997	1,7	0	2,6
30/09/1997	1,6	0	4
01/10/1997	1,62	0	4,25
02/10/1997	1,69	0	3,25
03/10/1997	1,79	0	3,3
04/10/1997	1,79	0	5,5
05/10/1997	1,79	0,0258542	2,7
06/10/1997	1,66	0,2007324	3,4
07/10/1997	1,54	3,1280443	1,9
08/10/1997	1,54	1,9954726	1,95
09/10/1997	1,56	0,381375	2,7
10/10/1997	1,65	5,7893747	1,05
11/10/1997	1,66	6,7140953	0,3
12/10/1997	3,38	5,0786519	0,8
13/10/1997	1,9	0	4,2
14/10/1997	2,28	0	4,2
15/10/1997	1,91	0	3,4
16/10/1997	1,91	0	2,5
17/10/1997	1,91	0	3,05
18/10/1997	2,04	0,9564554	4,1
19/10/1997	4,6	55,539495	1,85
20/10/1997	7,67	47,9540211	1,45
21/10/1997	10,12	19,0370138	0,9
22/10/1997	5,82	1,3808991	1,4
23/10/1997	5,12	3,7735796	1,2
24/10/1997	4,31	1,5407868	1,1
25/10/1997	4,04	0,4495666	2,3
26/10/1997	3,92	2,2649534	1,55
27/10/1997	9,22	34,0083093	3
28/10/1997	9,08	9,6481383	0,95
29/10/1997	6,09	0	1,8

30/10/1997	5,13	0	2,05
31/10/1997	4,88	0	2,65
01/11/1997	4,67	0,0925602	1,95
02/11/1997	4,35	6,799405	2,55
03/11/1997	7,42	12,0243724	1,4
04/11/1997	9,91	21,2101369	0,9
05/11/1997	11,05	19,5479769	1,2
06/11/1997	8,95	5,0091348	1,3
07/11/1997	13,16	25,4416733	0,85
08/11/1997	20,22	15,4108387	0,4
09/11/1997	29,83	52,961028	0,8
10/11/1997	18,09	19,815959	1,7
11/11/1997	16,82	30,9839431	1,25
12/11/1997	16,82	15,2925607	0,7
13/11/1997	16,82	34,4060956	0,5
14/11/1997	16,82	11,296177	0,65
15/11/1997	16,82	2,3292918	0,7
16/11/1997	16,82	22,5846888	1,3
17/11/1997	16,82	10,435162	1,55
18/11/1997	16,82	42,5250961	1,2
19/11/1997	16,82	11,8780693	1,45
20/11/1997	16,82	16,1359748	2,15
21/11/1997	16,82	15,5637064	1,15
22/11/1997	16,82	12,8876007	0,55
23/11/1997	16,82	0,0167277	1,7
24/11/1997	16,82	18,204331	2,5
25/11/1997	16,82	51,6392927	1,15
26/11/1997	16,82	5,2912593	0,55
27/11/1997	16,82	13,1595872	1,15
28/11/1997	16,82	18,2184659	0,85
29/11/1997	16,82	4,989347	0,8
30/11/1997	16,82	0,265722	1,55
01/12/1997	16,18	7,4835368	0,7
02/12/1997	15,48	4,5620579	0,4
03/12/1997	14,39	2,3037534	0,5
04/12/1997	12,99	1,036263	0,85
05/12/1997	11,83	0	3,15
06/12/1997	11,4	0,5990768	1,9
07/12/1997	11,69	2,5236792	1,85
08/12/1997	13,76	9,0711354	0,6
09/12/1997	13,08	3,7399921	0,7
10/12/1997	12,81	1,0829021	0,35
11/12/1997	13,41	4,8484158	0,45
12/12/1997	20,66	21,7958146	0,55
13/12/1997	14,86	0,0167277	1,6

14/12/1997	13,44	0	1,45
15/12/1997	14,18	0,1617705	1,2
16/12/1997	19,05	1,8376386	2,7
17/12/1997	19,05	36,1227956	0,75
18/12/1997	19,05	38,8046359	1,1
19/12/1997	19,05	32,8962833	0,95
20/12/1997	19,05	25,7109859	1,1
21/12/1997	19,05	23,4854758	0,65
22/12/1997	19,05	14,7988292	0,45
23/12/1997	19,05	4,0522798	0,95
24/12/1997	19,05	0,1234136	0,85
25/12/1997	19,05	16,3391898	1,4
26/12/1997	19,05	8,5273626	0,75
27/12/1997	19,05	1,7768342	1,05
28/12/1997	19,05	6,1758542	0,95
29/12/1997	19,05	24,2299367	0,5
30/12/1997	19,05	12,906145	0,5
31/12/1997	19,05	7,189844	0,55
01/01/1998	19,05	2,2143815	1,2
02/01/1998	19,05	14,8643305	0,35
03/01/1998	19,05	12,9254712	0,65
04/01/1998	19,05	23,0008811	0,35
05/01/1998	23,82	5,1055741	0,7
06/01/1998	22,54	5,1400701	1,05
07/01/1998	22,77	18,0534033	0,9
08/01/1998	20,64	1,6242005	0,5
09/01/1998	17,9	0,1851204	2
10/01/1998	16,7	0	2,7
11/01/1998	16,23	5,145471	5,55
12/01/1998	15,83	5,3495029	2,7
13/01/1998	22,24	21,2801594	2,95
14/01/1998	19,45	4,8303389	1,1
15/01/1998	16,44	2,8844499	0,8
16/01/1998	16,68	3,7723815	0,85
17/01/1998	15,33	0,0501831	1,45
18/01/1998	21,32	11,9811651	1,35
19/01/1998	19,69	9,8543587	0,95
20/01/1998	16,16	0,34137	0,8
21/01/1998	15,56	0,215694	0,9
22/01/1998	14	0	1,85
23/01/1998	16,03	12,2365357	1,35
24/01/1998	15,14	2,9808199	0,7
25/01/1998	13,09	0	0,85
26/01/1998	12,27	0	1,45
27/01/1998	12,15	0	1,3

28/01/1998	12,55	6,5923953	1,2
29/01/1998	11,19	3,306112	1,55
30/01/1998	10,69	1,551252	2,35
31/01/1998	10,22	1,2908436	4,25
01/02/1998	10,03	0,3604335	1,95
02/02/1998	9,78	4,4665261	3,65
03/02/1998	8,93	0,3402737	3,7
04/02/1998	8,93	0,215694	2,85
05/02/1998	8,93	0	2,05
06/02/1998	8,93	0	2,15
07/02/1998	8,93	0	1,7
08/02/1998	8,93	0	2,25
09/02/1998	8,11	0	3,3
10/02/1998	7,8	0	2,9
11/02/1998	7,62	0	2,5
12/02/1998	7,62	0	2
13/02/1998	7,2	0	2
14/02/1998	6,93	0	1,95
15/02/1998	6,93	0	2,75
16/02/1998	6,35	0	1,15
17/02/1998	6,16	0	1,4
18/02/1998	6,16	0	1,8
19/02/1998	6,16	0	1,35
20/02/1998	6,11	0	1,9
21/02/1998	9,37	24,4064812	2,3
22/02/1998	8,98	9,1787418	1,05
23/02/1998	7,4	1,0600222	1,8
24/02/1998	6,8	0	3,1
25/02/1998	6,8	0	4,2
26/02/1998	6,8	0	2,85
27/02/1998	6,8	0	2,45
28/02/1998	6,55	0	2,3
01/03/1998	6,12	0	2,35
02/03/1998	5,47	0	1,45
03/03/1998	5,34	0	2,25
04/03/1998	5,34	0	4,45
05/03/1998	5,28	1,1310962	1,4
06/03/1998	4,84	0	1,4
07/03/1998	4,77	0	1,3
08/03/1998	4,77	0	1,65
09/03/1998	4,45	0,2241404	1,15
10/03/1998	4,46	0	2,2
11/03/1998	4,45	0,107847	2,4
12/03/1998	4,42	0	5,85
13/03/1998	4,4	0	7,05

14/03/1998	4,47	0	5,85
15/03/1998	4,35	0	3,35
16/03/1998	4,27	0	3,15
17/03/1998	4,15	0	3,25
18/03/1998	4,02	0	3,35
19/03/1998	3,91	0	4,45
20/03/1998	3,85	0	5,4
21/03/1998	3,61	0	4,55
22/03/1998	3,48	0	4,55
23/03/1998	3,41	0	2,75
24/03/1998	2,9	0	4,75
25/03/1998	2,95	0	5,2
26/03/1998	2,97	0	4,15
27/03/1998	3,01	0	3,7
28/03/1998	2,88	1,0873005	2,8
29/03/1998	4,05	19,6102699	1,35
30/03/1998	4,18	3,7064694	1,45
31/03/1998	4,59	7,1865881	3,35
01/04/1998	6	12,026154	1,25
02/04/1998	16,37	62,7277768	0,95
03/04/1998	13,98	9,3178604	1,55
04/04/1998	13,08	19,9688277	1,45
05/04/1998	11,51	13,0267186	2,1
06/04/1998	11,91	9,9111104	1,7
07/04/1998	17,76	29,9854146	0,7
08/04/1998	11,69	4,4732869	1,6
09/04/1998	10,91	6,1826417	2,4
10/04/1998	14,01	15,0332516	1,6
11/04/1998	13,23	11,7028461	2,1
12/04/1998	11,25	2,6685485	2,65
13/04/1998	9,62	1,8304792	2,2
14/04/1998	13,49	10,5743321	1,85
15/04/1998	16,86	27,5334218	1,05
16/04/1998	15,86	14,6057453	2,95
17/04/1998	16,42	22,1946639	1,55
18/04/1998	16,39	0,5700884	2,65
19/04/1998	16,39	2,9760302	1,95
20/04/1998	16,5	16,3777563	0,4
21/04/1998	15,89	0	1,8
22/04/1998	15,19	5,7011097	2,2
23/04/1998	14,37	0,3327879	2,35
24/04/1998	13,01	0,2572352	0,55
25/04/1998	12,57	0	2,1
26/04/1998	9,45	4,0591566	1,45
27/04/1998	8,28	6,5830481	2,1

28/04/1998	9,88	12,4291488	1,65
29/04/1998	11,05	9,6552433	1,65
30/04/1998	11,08	4,0761088	2,9
01/05/1998	10,53	4,2378869	2,75
02/05/1998	9,66	0	4,3
03/05/1998	8,87	0	4,75
04/05/1998	8,3	0	6
05/05/1998	7,44	0	6,5
06/05/1998	7,33	0	5,2
07/05/1998	7,34	0	3,55
08/05/1998	6,77	0	3,5
09/05/1998	6,33	0,0308534	2,35
10/05/1998	6,31	0,2635549	2,15
11/05/1998	6,54	6,3339808	2,1
12/05/1998	9,3	0,9478113	5,25
13/05/1998	9,21	1,6148921	2,35
14/05/1998	6,29	1,6028397	1,45
15/05/1998	6,08	0	1,65
16/05/1998	5,93	0	2
17/05/1998	5,56	0	1,5
18/05/1998	5,37	0	1,45
19/05/1998	5,21	0	1,5
20/05/1998	5,31	0,4653756	1,6
21/05/1998	5,14	0	1,75
22/05/1998	4,85	0	2,85
23/05/1998	4,94	6,6531958	4,8
24/05/1998	5,41	10,3103276	3,1
25/05/1998	5,12	0,4653756	2,15
26/05/1998	4,88	0	3,4
27/05/1998	4,86	0	3,7
28/05/1998	4,77	2,399225	1,9
29/05/1998	4,77	5,3231697	2,25
30/05/1998	5,77	8,219756	1,05
31/05/1998	6,96	11,8212549	0,9
01/06/1998	7,25	17,3484451	0,95
02/06/1998	7,38	11,4005192	0,65
03/06/1998	6,85	0	1,25
04/06/1998	6,2	0	2,75
05/06/1998	5,8	0	2,45
06/06/1998	5,77	6,7642589	2,05
07/06/1998	5,68	3,9470779	0,75
08/06/1998	5,39	0	2,6

ANEXO II – DADOS HIDROMÉTRICOS E HIDROLÓGICOS RIO SELHO

Data	Caudal (m^3/s)	Precipitação (mm/dia)	Evaporação (mm/dia)
06/08/1989	0,04	0	2,75
07/08/1989	0,04	0	2,4
08/08/1989	0,03	0	2,6
09/08/1989	0,02	0	4,25
10/08/1989	0,03	0	3,35
11/08/1989	0,02	0	4,2
12/08/1989	0,01	0	4,25
13/08/1989	0,01	0	4,8
14/08/1989	0,01	0	3,4
15/08/1989	0,01	0	3,1
16/08/1989	0,39	9,172	2,7
17/08/1989	0,07	0	3,65
18/08/1989	0,04	0	5
19/08/1989	0,01	0	4,7
20/08/1989	0,01	0	3,1
21/08/1989	0,09	0	4,2
22/08/1989	0,15	0	3,8
23/08/1989	0,14	0	3,65
24/08/1989	0,03	0	3,2
25/08/1989	0,06	0	3,4
26/08/1989	0,06	0	2,25
27/08/1989	0,21	0	2,45
28/08/1989	0,08	0	2,75
29/08/1989	0,09	0	2,7
30/08/1989	0,14	10,834	1,85
31/08/1989	0,12	2,407	0,85
01/09/1989	0,15	0	5,5
02/09/1989	0,05	0	7,75
03/09/1989	0,05	0	9,5
04/09/1989	0,13	0	7,35
05/09/1989	0,03	0	9,05
06/09/1989	0,08	0	9,15
07/09/1989	0,16	0	6,15
08/09/1989	0,1	0	5
09/09/1989	0,12	0	2,3
10/09/1989	0,12	0	3,3
11/09/1989	0,09	0	1,95
12/09/1989	0,11	0	1,85
13/09/1989	0,1	0	1,65
14/09/1989	0,05	0	4,35

15/09/1989	0,14	0	4,25
16/09/1989	0,11	0	2,7
17/09/1989	0,11	0	2,5
18/09/1989	0,09	0,74	2,05
19/09/1989	0,14	3,978	2,25
20/09/1989	0,22	0	3,6
21/09/1989	0,2	0	4,45
22/09/1989	0,12	2,196	1,7
23/09/1989	0,1	0	3,85
24/09/1989	0,09	0	4,35
25/09/1989	0,1	0	3,8
26/09/1989	0,11	0	2,15
27/09/1989	0,13	0	3,1
28/09/1989	0,13	0	5,15
29/09/1989	0,11	0	4,55
30/09/1989	0,06	0	5,2
01/10/1989	0,03	0	12,7
02/10/1989	0,07	0	10,9
03/10/1989	0,32	0	12,3
04/10/1989	0,12	0	13
05/10/1989	0,09	0	14,25
06/10/1989	0,06	0	4,35
07/10/1989	0,08	0	7
08/10/1989	0,04	0	9,8
09/10/1989	0,01	0	14,5
10/10/1989	0,1	0	16,35
11/10/1989	0,1	0	5,9
12/10/1989	0,13	0	7,35
13/10/1989	0,13	2,374	7
14/10/1989	0,21	0,693	8,1
15/10/1989	0,11	0	10,75
16/10/1989	0,06	0	10,8
17/10/1989	0,44	0	10,85
18/10/1989	0,17	1,749	11,5
19/10/1989	0,1	4,594	11,1
20/10/1989	0,11	0,583	12,2
21/10/1989	0,23	0	12,85
22/10/1989	0,4	3,475	14,95
23/10/1989	1,8	68,079	12,9
24/10/1989	0,7	15,607	13,6
25/10/1989	0,3	0	15,45
26/10/1989	0,31	7,956	1,55
27/10/1989	0,54	5,631	3,7
28/10/1989	0,37	14,439	1,8
29/10/1989	0,23	6,734	2,25

30/10/1989	0,36	0	2,45
31/10/1989	1,13	0	3,05
01/11/1989	0,74	0,074	3,65
02/11/1989	0,94	0,156	3,45
03/11/1989	1,05	15,718	5,45
04/11/1989	0,86	2,538	4,2
05/11/1989	0,83	6,15	4,9
06/11/1989	0,94	6,658	6,75
07/11/1989	1,04	9,249	5,45
08/11/1989	1,01	5,213	6
09/11/1989	1,18	1,88	7,4
10/11/1989	0,72	0	7,55
11/11/1989	0,89	1,119	8,25
12/11/1989	1,37	21,445	8,45
13/11/1989	0,74	12,284	9,5
14/11/1989	0,25	0	13,55
15/11/1989	0,22	0,072	14,6
16/11/1989	0,19	4,888	0,8
17/11/1989	0,94	25,5	1,15
18/11/1989	0,75	8,236	1,55
19/11/1989	1,68	64,293	3,1
20/11/1989	1,36	8,709	5,75
21/11/1989	2,64	37,007	4,85
22/11/1989	1,76	19,813	5,35
23/11/1989	1,82	19,421	6,65
24/11/1989	4,02	43,789	6,05
25/11/1989	2,25	13,81	6,8
26/11/1989	1,85	6,844	9,3
27/11/1989	1,3	0	8,15
28/11/1989	1,28	8,474	9
29/11/1989	1,14	0	9,45
30/11/1989	1,17	0	9,4
01/12/1989	1,08	3,978	9,8
02/12/1989	2,09	0	9,8
03/12/1989	4,43	0	10,3
04/12/1989	0,72	1,624	11,1
05/12/1989	0,91	2,94	12,5
06/12/1989	0,94	4,049	12,55
07/12/1989	0,89	0,663	12,3
08/12/1989	0,77	0,876	13,2
09/12/1989	2,19	29,575	13,95
10/12/1989	1,28	0,974	13,4
11/12/1989	1,2	0,541	13,7
12/12/1989	3,6	12,86	14,4
13/12/1989	3,89	39,392	14,25

14/12/1989	2,29	9,654	3,05
15/12/1989	4,76	47,909	3,55
16/12/1989	10,92	38,786	5,8
17/12/1989	9,91	52,373	6,2
18/12/1989	11,38	38,549	5,55
19/12/1989	6,63	14,044	6,35
20/12/1989	5,97	8,745	7,05
21/12/1989	11,64	52,24	7,25
22/12/1989	11,9	37,002	7,15
23/12/1989	8,58	10,019	7,7
24/12/1989	7,09	8,842	8,05
25/12/1989	9,67	20,205	9,4
26/12/1989	8,17	24,86	9,25
27/12/1989	6,09	1,944	8,75
28/12/1989	5,26	0,12	10,05
29/12/1989	4,59	0	11,3
30/12/1989	4,27	0	10,55
31/12/1989	3,77	4,518	10,75
01/01/1990	7,04	18,383	0,5
02/01/1990	4,68	0	0,9
03/01/1990	5,64	17,704	1,2
04/01/1990	4,23	2,284	0,65
05/01/1990	4	6,995	0,35
06/01/1990	4,75	7,248	0,9
07/01/1990	4,15	12,569	0,45
08/01/1990	3,29	0	1,2
09/01/1990	3,25	0	1,05
10/01/1990	3,27	0	1,2
11/01/1990	3,05	0	0,55
12/01/1990	2,73	0	1,45
13/01/1990	2,72	0	0,45
14/01/1990	2,66	0	0,95
15/01/1990	2,47	0	0,6
16/01/1990	2,39	0	1,1
17/01/1990	2,33	0	1,35
18/01/1990	2,36	0	0,45
19/01/1990	2,26	0	0,95
20/01/1990	2,09	0	1,2
21/01/1990	1,88	0	0,85
22/01/1990	1,95	0	1,25
23/01/1990	2,04	2,768	0,85
24/01/1990	2,42	7,596	0,75
25/01/1990	2,3	12,257	1,2
26/01/1990	2,72	18,826	1,05
27/01/1990	5,53	17,774	1,3

28/01/1990	4,25	26,235	0,8
29/01/1990	5,33	12,655	1,25
30/01/1990	5,09	29,983	1,75
31/01/1990	7,45	29,913	1,8
01/02/1990	6,38	27,513	1,45
02/02/1990	9,29	27,158	1
03/02/1990	8,36	27,559	1,35
04/02/1990	5,62	0	1,35
05/02/1990	4,97	2,016	1,25
06/02/1990	5,83	3,515	3,45
07/02/1990	4,88	4,074	2,1
08/02/1990	4,89	11,373	1
09/02/1990	4,83	12,689	0,6
10/02/1990	5,2	5,67	1,05
11/02/1990	4,6	7,634	0,7
12/02/1990	4,58	8,314	2,6
13/02/1990	4,51	8,888	1,3
14/02/1990	4,12	0,196	1,15
15/02/1990	3,87	0	1,2
16/02/1990	3,7	0	1,9
17/02/1990	3,7	0	1
18/02/1990	3,58	2,698	1,8
19/02/1990	3,76	11,181	1,4
20/02/1990	3,43	6,603	1,35
21/02/1990	3,21	0,111	1,05
22/02/1990	3,09	0	1,5
23/02/1990	3,08	0	3,25
24/02/1990	3,01	0	2,6
25/02/1990	2,67	0	1,7
26/02/1990	2,7	3,736	1,1
27/02/1990	2,56	0,294	0,9
28/02/1990	2,52	0	1,25
01/03/1990	2,55	0	1,7
02/03/1990	2,39	0	4,95
03/03/1990	2,28	0	9,8
04/03/1990	2,08	0	12,15
05/03/1990	2,15	0	9,35
06/03/1990	2,25	0	3,7
07/03/1990	2,19	0,582	4,1
08/03/1990	2,18	3,606	2,3
09/03/1990	2,07	1,95	1,3
10/03/1990	2,18	0	3,2
11/03/1990	2	0,078	5,7
12/03/1990	1,93	0	2,45
13/03/1990	1,85	0	2,3

14/03/1990	1,93	0	1,2
15/03/1990	1,85	0	2,05
16/03/1990	1,82	0	3,25
17/03/1990	1,78	0	4,2
18/03/1990	1,39	0	4,6
19/03/1990	1,37	0	3,5
20/03/1990	1,38	0	4
21/03/1990	1,33	0	4,15
22/03/1990	1,22	4,836	3,8
23/03/1990	1,44	6,537	3,75
24/03/1990	1,71	1,952	2,2
25/03/1990	1,3	0	3,8
26/03/1990	1,16	0	7,15
27/03/1990	1,09	0	5,05
28/03/1990	1,1	0	3,85
29/03/1990	1,08	0	3,75
30/03/1990	1,03	0	11,3
31/03/1990	1	0,447	9,65
01/04/1990	0,99	0	9,25
02/04/1990	1,73	15,026	4,65
03/04/1990	1,36	17,931	1
04/04/1990	1,26	7,363	2,55
05/04/1990	1,32	6,912	0,75
06/04/1990	1,89	12,27	1,1
07/04/1990	1,45	7,987	1,05
08/04/1990	1,27	0,259	4,1
09/04/1990	1,3	0	3,6
10/04/1990	1,19	0	8,9
11/04/1990	1,26	0	4
12/04/1990	1,18	0	4,25
13/04/1990	1,31	2,028	3,7
14/04/1990	1,29	13,477	3,15
15/04/1990	1,21	2,535	1,7
16/04/1990	1,14	0,148	2
17/04/1990	1,08	0	3,55
18/04/1990	1,12	0	6,95
19/04/1990	1,09	0	6,2
20/04/1990	1,11	0	3,55
21/04/1990	0,95	0,481	3,85
22/04/1990	0,92	0	3,8
23/04/1990	0,97	0	3,95
24/04/1990	1,05	0	3,65
25/04/1990	0,92	1,258	3,85
26/04/1990	1,26	0	5,55
27/04/1990	1,01	0	7,4

28/04/1990	0,96	0	8,5
29/04/1990	0,82	0,037	6,05
30/04/1990	0,72	0	4,75
01/05/1990	0,27	0,39	4,85
02/05/1990	0,37	0	2,5
03/05/1990	0,48	0	6,5
04/05/1990	0,41	0	6,9
05/05/1990	0,34	0	5,75
06/05/1990	0,26	0	5,05
07/05/1990	0,44	0	4,2
08/05/1990	0,51	0	6,65
09/05/1990	0,6	4,091	5,85
10/05/1990	0,57	4,716	4,75
11/05/1990	0,57	0	5,05
12/05/1990	0,59	19,573	4,05
13/05/1990	0,56	11,23	2,25
14/05/1990	0,65	0,39	2,45
15/05/1990	0,58	3,678	1,65
16/05/1990	0,6	0	2,9
17/05/1990	0,6	0,814	2,85
18/05/1990	0,59	7,374	2,8
19/05/1990	0,49	0	3
20/05/1990	0,39	0,074	2,6
21/05/1990	0,59	0	2,8
22/05/1990	0,54	1,073	2,85
23/05/1990	0,57	0,912	3,05
24/05/1990	0,51	0	4,2
25/05/1990	0,55	0	2,95
26/05/1990	0,48	0	3,55
27/05/1990	0,25	5,517	1,55
28/05/1990	0,52	0,195	5,8
29/05/1990	0,5	0	6,2
30/05/1990	0,49	0	6,2
31/05/1990	0,47	0	3,7
01/06/1990	0,53	0	4,25
02/06/1990	0,47	0	4,5
03/06/1990	0,46	8,481	4,6
04/06/1990	0,69	0	2,85
05/06/1990	0,7	0	2,65
06/06/1990	0,67	0	5
07/06/1990	0,68	0	2,65
08/06/1990	0,66	0	4,1