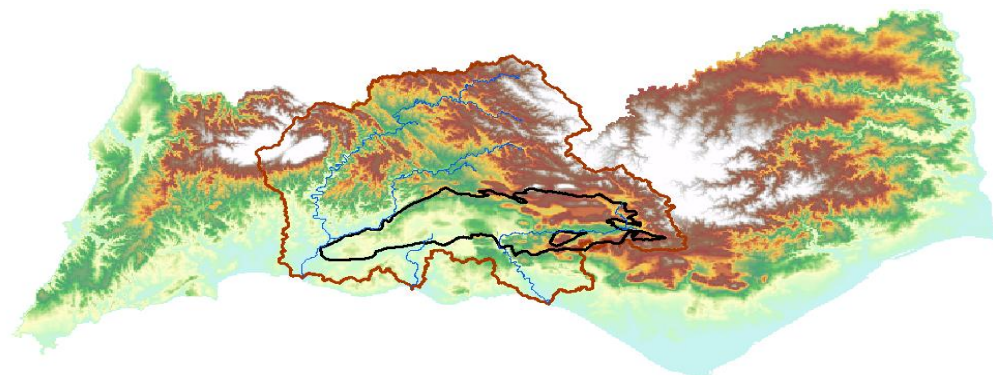




INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



CÁLCULO DA RECARGA DO AQUÍFERO QUERENÇA-SILVES

Aplicabilidade do Modelo SWAT a Bacias Hidrográficas
sobre Aquíferos Cársicos

Daniel Louro Mendes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente

Júri

Presidente: Prof. Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Orientadores: Prof. Doutor Luis Filipe Tavares Ribeiro

Prof. Doutor Rodrigo de Almada Cardoso Proença de Oliveira

Vogais: Prof. Doutor Tibor Yvan Stigter

Prof. Doutor João Pedro Carvalho Nunes

Novembro 2010

«Não sabemos um milionésimo de 1% de coisa alguma.»

Thomas Edison

RESUMO

O aquífero Querença-Silves é o maior e o mais importante da região algarvia. Ao longo dos anos tem servido para fornecer água, quer para o abastecimento público, quer para a agricultura. Devido à sua enorme importância, existem diversos estudos que têm incidido, ao longo dos anos, sobre esta importante reserva de água.

Neste trabalho procura-se aprofundar o conhecimento sobre este aquífero. Aplica-se o Modelo SWAT às bacias hidrográficas que se lhe sobrepõem para calcular a recarga anual. Ao utilizar este modelo procura-se uma integração dos recursos hídricos superficiais com os recursos hídricos subterrâneos.

Com a aplicação do Modelo SWAT a estas bacias testa-se, ainda, a sua adequabilidade em regiões de características cársicas. Uma vez que este modelo foi desenhado para ser empregue, sobretudo, na agricultura, não é evidente que a sua aplicação em regiões cársicas seja correcta e, como tal, torna-se também necessário verificar a forma como o modelo simula, perante esta particularidade.

Nesta dissertação procede-se à análise dos estudos efectuados na área estudada. Em seguida, caracteriza-se a zona, do ponto de vista climatológico, hidrológico, topográfico, do uso do solo e do tipo de solo. Seleccionam-se ainda os dados necessários para a simulação pelo Modelo SWAT.

Apresentam-se as metodologias utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, ao nível da recarga, mas também para preencher séries climáticas incompletas.

Por fim, analisam-se os resultados e procura-se verificar o sucesso da aplicação do Modelo SWAT em aquíferos cársicos, como o Querença-Silves.

Palavras-chave: Querença-Silves; SWAT; Modelação Hidrológica; Recarga; Recursos Hídricos

ABSTRACT

The Querença-Silves aquifer is the largest and most important in the Algarve region. Over the years, the aquifer has served to provide water, whether for public supply, whether for agriculture. Due to its enormous importance, there are several studies that have focused on this important water reservoir.

This study aims to increase the knowledge about this aquifer. Applying the SWAT model to watersheds that overlap the Querença-Silves allows the calculation of the annual recharge. The use of this model focuses on the integration of surface and groundwater resources.

The application of the SWAT model to these basins is meant to assess its suitability in karst regions. Since this model was designed to be used mainly in agriculture, it isn't evident that its application in karst regions is correct and it is also necessary to evaluate how the model simulates under these conditions.

This thesis proceeds to the analysis of studies conducted in the study area. The region is described concerning climate, hydrology, topography, land use and soil type. The data needed for the simulation by the SWAT model, are selected.

The methodologies, used to develop this study, are presented, concerning recharge and gap filling of climate series.

Finally the simulation results are analyzed, and is verified the success of the SWAT model implementation in karstic aquifers, as Querença-Silves.

Keywords: Querença-Silves; SWAT; Hydrologic Modeling; Recharge; Water Resources

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, o meu agradecimento dirige-se ao Professor Doutor Luís Ribeiro, por me ter dado a conhecer o projecto CLIMWAT e pela oportunidade, não só de fazer parte deste grupo de investigação, como de poder aprofundar o meu conhecimento em hidrologia. Agradeço, ainda, a disponibilidade demonstrada e a ajuda prestada no desenvolvimento deste estudo.

Agradeço, também, ao Doutor João Pedro Nunes a sua ajuda na co-orientação deste trabalho. Entre as suas viagens Aveiro – Lisboa, nunca uma questão ficou mais de um dia sem resposta. Por toda esta disponibilidade e ajuda, quero expressar a minha mais sincera e sentida gratidão.

Ao Doutor Jorge Mendes, pelas conversas amigas e pelos longos conselhos dados, antes e durante o meu percurso académico.

À Sara, não só pela ajuda que me deu em todos os momentos, como pelos “puxões de orelhas” que me fizeram terminar esta tese no tempo determinado para tal. Sem o seu apoio incondicional não teria sido possível.

Aos meus pais e avós por terem formado a pessoa que sou e pelo apoio concedido ao longo dos anos, sem nunca duvidarem das minhas capacidades e suportando toda e qualquer decisão.

Aos meus amigos, que cultivei ao longo dos anos em que frequentei o curso de Engenharia do Ambiente, quer os que conheci em Lisboa, quer os que conheci em Gent. Todos eles participaram num ou noutro momento deste processo, facilitando esta epopeia.

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|-----------|
| Resumo | I |
| Abstract | III |
| Agradecimentos | V |
| Índice Geral | VII |
| Índice de Figuras | XI |
| Índice de Tabelas | XV |
| Acrónimos e Abreviaturas | XVII |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivações | 1 |
| 1.2 Objectivos | 3 |
| 1.3 Organização | 4 |
| 2 Estado da Arte | 7 |
| 2.1 Conceitos | 7 |
| 2.2 O projecto Algarve | 9 |
| 2.3 A Criação do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água e Saneamento do Algarve e a Transição entre Água Subterrânea e a Água Superficial | 13 |
| 2.4 A Seca de 2004-2005 | 14 |
| 2.5 Pós Seca 2004-2005 | 15 |
| 3 Caracterização do Caso de Estudo | 17 |
| 3.1 Introdução à Área de Estudo | 17 |
| 3.2 Clima | 19 |
| 3.3 Hidrologia | 22 |
| 3.4 Topografia | 24 |
| 3.5 Uso do Solo | 27 |
| 3.6 Tipo de Solo | 34 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.7 | Obtenção de Dados | 36 |
| 3.7.1 | Dados Climáticos | 36 |
| 3.7.2 | Dados Hidrométricos | 38 |
| 4 | Metodologia | 41 |
| 4.1 | Abordagem Prevista Para o Estudo | 41 |
| 4.2 | Preenchimento de Dados em Falta | 42 |
| 4.2.1 | Temperatura e Humidade Relativa | 43 |
| 4.2.2 | Velocidade do Vento | 45 |
| 4.2.3 | Radiação Solar | 46 |
| 4.3 | Modelos Analíticos para o Cálculo da Recarga | 49 |
| 4.3.1 | Método de Penman-Grindley | 49 |
| 4.3.2 | Método de Kessler | 50 |
| 4.4 | Modelos Analíticos para o Cálculo da Evapotranspiração Potencial | 51 |
| 4.4.1 | Método de Hargreaves | 51 |
| 4.4.2 | Método de Thornthwaite | 52 |
| 4.4.3 | Método de Turc | 52 |
| 4.5 | O Modelo SWAT | 54 |
| 5 | Apresentação de Resultados | 59 |
| 5.1 | Séries Temporais de Dados Obtidos | 59 |
| 5.1.1 | Temperatura | 59 |
| 5.1.2 | Humidade | 60 |
| 5.1.3 | Radiação Solar | 61 |
| 5.2 | Calibração do Modelo SWAT | 62 |
| 5.2.1 | Parâmetros Utilizados para Calibração | 63 |
| 5.2.2 | Resultados da Calibração do Modelo SWAT | 64 |
| 5.3 | Evapotranspiração Potencial | 67 |
| 5.3.1 | Método de Hargreaves | 68 |
| 5.3.2 | Método de Thornthwaite | 69 |
| 5.3.3 | Método de Turc | 70 |
| 5.3.4 | Método de Penman-Monteith | 71 |
| 5.3.5 | Comparação de Resultados | 72 |
| 5.4 | Recarga | 75 |

| | | |
|-------------|--------------------------------|-----------|
| 5.4.1 | Método de Penman-Grindley | 75 |
| 5.4.2 | Método de Kessler | 76 |
| 5.4.3 | Modelo SWAT | 76 |
| 5.4.4 | Comparação de Resultados | 77 |
| 5.5 | Discussão de Resultados | 80 |
| 6 | Conclusões | 85 |
| | Bibliografia | 87 |
| Anexo I - | Dados de Temperaturas | I-I |
| Anexo II - | Dados de Humidade Relativa | II-I |
| Anexo III - | Dados de Radiação Solar | III-I |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - O Ciclo Hidrológico Fonte: FISRWG, 1998 | 7 |
| Figura 2.2 - Esquema do modelo hidrogeológico do Thames Water Authority Fonte: Ribeiro & Braga dos Santos, 2006 | 11 |
| Figura 3.1 – Localização geográfica da área de estudo | 17 |
| Figura 3.2 - Topografia da área de estudo e aquífero Querença-Silves; Fonte: MDT IGeoE 25x25m; Atlas do Ambiente | 19 |
| Figura 3.3 - Média da precipitação mensal e médias das temperaturas máxima e mínima da normal climática 1960-1961 a 1989-1990 para a região do Algarve; Fonte: SNIRH..... | 20 |
| Figura 3.4 – a) Temperatura média anual Fonte: Nunes, não publicado; b) Precipitação média anual Fonte: Nicolau, 2002 1000x1000m | 21 |
| Figura 3.5 – Média da precipitação anual nas estações consideradas (apresentadas na Figura 3.14) e precipitação média anual para o período analisado | 21 |
| Figura 3.6 - Topografia da área de estudo Fonte: MDT IGeoE 25x25m | 24 |
| Figura 3.7 - Classes de elevação na área de estudo..... | 25 |
| Figura 3.8 - Declives da área de estudo | 26 |
| Figura 3.9 - Distribuição das classes de declives na bacia | 27 |
| Figura 3.10 - Uso do solo na zona de estudo; Legenda referente às classes de uso do solo definidas no modelo SWAT | 33 |
| Figura 3.11 - Distribuição do uso do solo na zona de estudo..... | 34 |
| Figura 3.12 - Tipo de solo. Fonte: Carta de Solos do Atlas do Ambiente, 1971..... | 35 |
| Figura 3.13 - Localização geográfica das estações climatológicas utilizadas | 36 |
| Figura 3.14 - Localização geográfica das estações com dados de precipitação | 37 |
| Figura 3.15 - Estações hidrométricas do INAG com dados disponíveis após 1993..... | 38 |
| Figura 3.16 – Estações com dados hidrométricos disponíveis entre 1993 e 2008 | 39 |
| Figura 4.1 - Relação entre a temperatura (em °C) no Aeroporto de Faro (estação do IM) e as estações do INAG..... | 43 |
| Figura 4.2 - Relação entre a humidade relativa (em %) entre estações analisadas | 44 |
| Figura 4.3 – a) Relação entre os valores diários estimados e medidas de radiação solar (em MJ.m ⁻² .d ⁻¹); b) Relação entre os valores mensais estimados e medidos de radiação solar (em MJ.m ⁻² .ano ⁻¹) para a estação de Algoz..... | 48 |
| Figura 4.4 - Relação entre a recarga anual e o valor RPD..... | 51 |
| Figura 4.5 – Comparação entre os três métodos usados para o cálculo da evapotranspiração potencial no Algarve para a estação de Algoz; a) Evapotranspiração potencial mensal; b) Evapotranspiração potencial anual | 53 |
| Figura 4.6 – Esquema conceptual do modelo SWAT (adaptado de Neitsch, et al., 2005)..... | 56 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.1 - a) Média mensal das temperaturas máxima e mínima na estação de Algoz (1998 a 2007); b) Média anual das temperaturas máxima e mínima | 59 |
| Figura 5.2 - a) Média mensal da humidade relativa na estação de Algoz (1998 a 2007); b) Média anual humidade relativa | 60 |
| Figura 5.3 - Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil) a) ao nível mensal; b) ao nível anual | 60 |
| Figura 5.4 - a) Média mensal da radiação solar para a estação de Algoz (1998 a 2007); b) Radiação solar anual | 61 |
| Figura 5.5 - Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil) a) ao nível mensal; b) ao nível anual | 61 |
| Figura 5.6 - Estações hidrométricas utilizadas para a calibração do modelo | 62 |
| Figura 5.7 - Comparação dos valores obtidos no modelo SWAT com os dados observados. a) Estação de Ponte da Ribeira do Rio Seco; b) Estação da Quinta Passagem; c) Estação de Querença. | 66 |
| Figura 5.8 - Adequação da totalidade dos dados (observados vs. simulados) | 67 |
| Figura 5.9 – ETP (mm) calculada pelo método de Hargreaves a) Valores calculados para os anos em análise e média; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil) | 68 |
| Figura 5.10 - ETP (mm) calculada pelo método de Thornthwaite a) Valores calculados para os anos em análise e média; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil) | 69 |
| Figura 5.11 - ETP (mm) calculada pelo método de Turc a) Valores calculados para os anos em análise e média; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil) | 70 |
| Figura 5.12 - ETP (mm) resultante do modelo SWAT a) Valores calculados para os anos em análise e média; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil) | 71 |
| Figura 5.13 – Comparação entre os resultados do Modelo de Thornthwaite e o Modelo SWAT a) Dispersão de resultados obtidos entre os dois modelos; b) Diferenças relativas entre os dois modelos | 72 |
| Figura 5.14 - Variação dos valores de ETP anual nas estações em estudo; a) Modelo SWAT; b) Método Thornthwaite..... | 73 |
| Figura 5.15 – Comparação entre os resultados do Modelo de Thornthwaite e o Modelo SWAT a) Dispersão de resultados obtidos entre os dois modelos; b) Relação entre os dados obtidos para os dois modelos | 74 |
| Figura 5.16 - Variação dos valores de ETP mensal nas estações em estudo; a) Modelo SWAT; b) Método Thornthwaite..... | 74 |
| Figura 5.17 - Recarga calculada com o método Penman-Grindley | 75 |
| Figura 5.18 - Recarga calculada com o método Kessler | 76 |
| Figura 5.19 - Recarga simulada pelo modelo SWAT | 77 |
| Figura 5.20 – Recarga (mm) calculada pelos diferentes métodos a) Valores anuais de recarga; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, mediana, primeiro quartil e terceiro quartil) | 78 |

Figura 5.21 - Semelhança entre a recarga dos diferentes métodos por comparação dos valores anuais.
a) Recarga de Penman-Grindley vs. recarga SWAT; b) Recarga Kessler vs. recarga SWAT..... 79
Figura 5.22 - Contribuição da infiltração nos cursos de água para a recarga no aquífero..... 80

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Municípios da área de estudo e a sua contribuição..... | 18 |
| Tabela 3.2 - Tabela de correspondência entre as classes CLC2000/IFN e as classes utilizadas pelo SWAT | 28 |
| Tabela 3.3 - Valores utilizados para a parametrização do uso de solo (culturas apresentadas por Nunes (2007))..... | 29 |
| Tabela 3.4 - Valores utilizados para a parametrização do uso de solo | 30 |
| Tabela 3.5 - Referências utilizadas para parametrização do uso do solo | 32 |
| Tabela 4.1 - Velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) para as estações climáticas do SNIRH | 45 |
| Tabela 4.2 – Relação quadrática entre a diferença de temperatura e a radiação solar extraterrestre para as 5 estações de monitorização do INAG..... | 48 |
| Tabela 4.3 - Valores do factor de correcção k para vários valores de μ | 50 |
| Tabela 5.1 - Parâmetros que representam a relação água superficial/aquífero..... | 64 |
| Tabela 5.2 - Parâmetros que representam a relação aquífero superficial/zona não saturada..... | 64 |
| Tabela 5.3 - Parâmetros que representam a relação aquífero superficial/aquífero profundo | 64 |
| Tabela 5.4 - Parâmetros quantitativos de adequação dos resultados para as 3 estações | 65 |
| Tabela 5.5 - Parâmetros quantitativos de adequação dos resultados para a totalidade dos gráficos .. | 67 |
| Tabela 5.6 – ETP (mm) calculada pelo método de Hargreaves | 68 |
| Tabela 5.7 – ETP (mm) calculada pelo método de Thornthwaite | 69 |
| Tabela 5.8 - ETP (mm) calculada pelo método de Turc | 70 |
| Tabela 5.9 - ETP (mm) resultado do modelo SWAT..... | 71 |
| Tabela 5.10 - Desvio padrão dos valores obtidos para a ETP anual..... | 73 |
| Tabela 5.11 - Valores de recarga obtidos pelos diferentes métodos..... | 77 |
| Tabela 5.12 - Parâmetros quantitativos de adequação entre o modelo SWAT e o método de Penman-Grindley, entre o método de Kessler e entre os métodos de Kessler e Penman-Grindley | 79 |

ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

CLC2000 – Corine Land Cover 2000

CLIMWAT – Impacte das Alterações Climáticas nas Águas Subterrâneas Costeiras e Ecossistemas Dependentes (Assessing and Managing the Impact of the Climate Change on Coastal Groundwater and Dependent Ecosystems)

CircleMed – Coordenação da Investigação dos Impactes no Clima para uma Europa mais Abrangente - Grupo Mediterrâneo (Climate Impact Research Coordination for a Larger Europe – Mediterranean Group)

ET – Evapotranspiração

ETP – Evapotranspiração Potencial

ETR – Evapotranspiração Real

FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (Food and Agricultural Organization of the United Nations)

HRU – Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrological Response Units).

IM – Instituto de Meteorologia

INAG – Instituto da Água

MDT (DEM) – Modelo Digital do Terreno (Digital Elevation Model)

PNA – Plano Nacional da Água

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

SWAT – Ferramenta de Análise do Solo e Água (Soil and Water Assessment Tool)

USGS – Base de Dados Geológica dos Estados Unidos (United States Geological Survey)

WMO – Organização Mundial de Meteorologia (World Meteorological Organization)

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

O presente estudo foi desenvolvido no âmbito do projecto europeu *Assessing and Managing the Impact of the Climate Change on Coastal Groundwater and Dependent Ecosystems - CLIMWAT* integrado no projecto *CircleMed*.

Este projecto tem como objectivo a avaliação e gestão dos impactes das alterações climáticas nos recursos hídricos subterrâneos costeiros, ecótonos e ecossistemas associados. Por ecótonos entende-se as zonas de transição entre água doce e água salgada e entre águas subterrâneas e águas superficiais.

O projecto *CLIMWAT* desenvolve-se em 3 bacias costeiras localizadas em Portugal, Espanha e Marrocos.

Em Portugal o projecto estuda uma área situada na zona central do Algarve, onde se encontra o mais importante aquífero da região - o aquífero Querença-Silves - e onde incidirá esta dissertação. A zona central do Algarve está sob imensas pressões turísticas e a proximidade ao Oceano Atlântico representa um risco de intrusão salina no aquífero de Querença-Silves.

A área de estudo em Espanha localiza-se no delta do rio Ebro, que apresenta a maior bacia hidrográfica espanhola. O delta do Ebro representa uma das mais importantes zonas húmidas da Europa, mas que se encontra sobre grande pressão antropogénica.

A zona marroquina em que o *CLIMWAT* incide fica na bacia de Oualidia, no Sahel Atlântico, no Sudoeste deste país africano. O sistema hidrológico em estudo é composto por um conjunto de lagoas, um aquífero e o oceano, sendo a região classificada como SIBE (Sitio de Interesse Biológico e Ecológico) e onde se desenvolvem actividades como a pesca e o turismo.

O projecto encontra-se em desenvolvimento abrangendo as seguintes entidades:

- CVRM - Centro de Geossistemas, Instituto Superior Técnico/Universidade do Algarve - Portugal;
- CEHIDRO – Centro de Estudos de Hidrossistemas, Instituto Superior Técnico - Portugal;
- Departamento de Tecnoloxía da Construción, Universidad da Coruña - Espanha;
- Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad – Marrocos.

Inclui-se, neste projecto, a necessidade de uma análise da relação entre os recursos hídricos superficiais e os recursos hídricos subterrâneos. Para desenvolver esta análise recorreu-se ao modelo

SWAT (*Soil and Water Assessment Tool* – Ferramenta de Análise do Solo e Água). A utilização deste modelo permitirá calcular a recarga do aquífero de Querença-Silves, de forma a melhor quantificar este parâmetro do balanço hídrico.

O propósito do estudo, que a seguir se desenvolve, advém directamente da necessidade atrás descrita, bem como da crescente importância que a água representa na sociedade actual, quer ao nível do desenrolar de todas as actividades do ser humano, quer ao nível da qualidade das massas de água com significância na conservação e integridade de ecossistemas.

Ao nível da sociedade, as necessidades de água são bastante elevadas. Segundo o Plano Nacional da Água (PNA), INAG (2005), a procura de água em Portugal está estimada em cerca de $7\,500 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, sendo 87% ($6\,550 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) para a agricultura, 8% ($570 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) para o abastecimento urbano às populações e 5% ($385 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$) para a indústria.

No que ao Algarve respeita, segundo Do Ó & Monteiro (2006) os consumos de água por sector são:

- $230 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ (72%) para a agricultura;
- $70 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ (22%) para o abastecimento público;
- $9 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ (3%) para a indústria;
- $10 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ (3%) para o golfe.

Do total de água utilizada nesta região cerca de 67% corresponde a água subterrânea e 33% a água superficial. No entanto, estudando por sectores, o abastecimento com recurso a águas superficiais corresponde a 14% no sector agrícola e a 94% no abastecimento público. Já a utilização de águas subterrâneas corresponde a 86% no sector agrícola e 6% no abastecimento público (Do Ó & Monteiro, 2006).

Por esta análise podemos verificar as diferenças entre cada sector e a importância dos recursos hídricos subterrâneos para a região algarvia, em especial para o sector agrícola. Na realidade existe uma tendência de maior utilização dos recursos hídricos superficiais, apesar de estes estarem mais expostos e serem mais vulneráveis à poluição, uma vez que se encontram muitas vezes em contacto directo com diversas actividades antropogénicas.

Pelo contrário, os recursos hídricos subterrâneos possuem uma defesa natural às contaminações antropogénicas. O solo, que se encontra a separar a superfície terrestre do aquífero, e por onde a água se infiltra para gerar recarga, possui capacidades naturais depuradoras.

A depuração a que a água é sujeita durante a infiltração é baseada em diversos processos naturais de degradação, resultados de processos químicos, físicos e biológicos. Esta é uma vantagem clara da utilização dos recursos hídricos subterrâneos e também a menor aplicação de recursos económicos que o aproveitamento de recursos subterrâneos exige (Ribeiro, 2004).

No entanto, não se podem analisar os recursos hídricos superficiais e subterrâneos de forma distinta. Ambos são, na realidade, um único recurso em fases distintas do seu ciclo. Analisando a água como um recurso único, será a água disponível no Algarve suficiente para as necessidades desta região?

De uma forma simplificada, o balanço hídrico, pode ser representado por:

$$\text{Escoamento total} = \text{Precipitação} - \text{Evapotranspiração Real} - \text{Recarga} + \text{Caudal dos Cursos de Água}$$

Sendo a precipitação média anual do Algarve aproximadamente 653mm, obtém-se um total de $3\,500 \times 10^6 \text{m}^3$ e a evapotranspiração real cerca de 70% deste valor sobram cerca de $1\,000 \times 10^6 \text{m}^3$ (Monteiro, 2007). Como se verifica, o volume de água disponível no Algarve é, em média, suficiente para satisfazer as necessidades.

No entanto, e sendo a água existente no Algarve teoricamente suficiente, verificaram-se já situações de escassez de água nesta região do País. O período de seca de 2004-2005 é um exemplo próximo de uma situação crítica para esta região. As reservas superficiais de água atingiram neste período níveis alarmantes, sendo que se tornou necessário recorrer aos, já praticamente abandonados, furos para o abastecimento urbano de água.

Urge assim a necessidade de se estudar os recursos hídricos de forma integrada. Não é possível separar as fases de um recurso que, na realidade, é um só. A incorporação de ambas as componentes deste recurso e uma gestão integrada do mesmo, possibilitará melhores resultados e uma visão abrangente de algo tão importante nas nossas vidas.

1.2 OBJECTIVOS

O objectivo principal a que esta tese se propõe é o de calcular a recarga anual de água no aquífero Querença-Silves, tendo em consideração que o recurso água não deve ser separado em águas superficiais e águas subterrâneas.

De modo a integrar estas duas componentes dos recursos hídricos, recorreu-se à modelação matemática das bacias hidrográficas que se encontram sobre o aquífero.

Assim, utilizou-se o modelo SWAT, que foi desenvolvido como uma ferramenta de apoio à agricultura, para simular os processos hídricos superficiais e permitir identificar a quantidade de água que se infiltra, dando origem à recarga no aquífero.

Com este modelo procura-se, não só aferir a sua capacidade de actuar sobre um aquífero de características cársicas, mas também contribuir para um melhor conhecimento dos cursos de água

superficiais e a sua interligação com a componente subterrânea que se encontra na sua área de influência.

Para se poder verificar a adequabilidade deste modelo para regiões com características semelhantes, foi necessário proceder à elaboração de séries climáticas. Foi, então, necessária a aplicação de diferentes metodologias para a elaboração destas séries, bem como compreender a fiabilidade da aplicação destas metodologias para um clima Mediterrânico.

Desta forma, espera-se, no final, obter diferentes resultados a partir do modelo SWAT:

- séries climáticas que se adequem às características da região em estudo;
- séries de evapotranspiração real para a região em estudo;
- recarga no aquífero Querença-Silves.

Estes resultados poderão vir a servir para um conhecimento mais profundo da região, bem como uma melhor noção das limitações/capacidades do modelo SWAT, podendo ainda auxiliar na melhoria de resultados de outros modelos já existentes, devido à interligação das águas superficiais com as águas subterrâneas, presente neste estudo.

Por fim, infere-se sobre a adequabilidade do modelo SWAT para a modelação de regiões cársicas.

1.3 ORGANIZAÇÃO

Este documento encontra-se dividido em seis secções e III anexos.

A secção 2 aborda o tema água e a forma como este recurso tem sido estudado ao longo dos anos, na região do Algarve. Faz-se uma revisita histórica dos estudos com maior relevância para este trabalho, que tiverem lugar nos últimos anos, bem como as forças que os motivaram.

Na secção 3 descreve-se a região em estudo, começando por integrá-la a nível nacional. Em seguida, caracteriza-se a região ao nível do clima, hidrologia, topografia, uso do solo e tipo de solo. Por fim, apresentam-se as estações climatológicas e hidrométricas utilizadas, bem com o período de dados seleccionado.

A secção 4 expõe a metodologia usada para o desenvolvimento deste trabalho e para a persecução do objectivo pretendido. Apresenta-se a metodologia empregue para o preenchimento de dados em falta nas séries climáticas e, também, os modelos analíticos a utilizar para o cálculo da ETP e da recarga no aquífero, bem como uma descrição do método numérico a utilizar.

Na secção 5 são demonstrados os resultados obtidos e comparam-se os diferentes métodos aplicados. Os resultados são confrontados entre si e criticados, tendo em conta a sua adequação e representatividade.

Por fim, na secção 6, mostram-se as principais conclusões retiradas do estudo e referem-se os possíveis desenvolvimentos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

Devido à importância que o recurso água apresenta, têm sido efectuados, ao longo dos anos, estudos com vista a ampliar o conhecimento existente. Ensaio de modelação hidrológica e hidrogeológica têm sido realizados um pouco por todo o país e, com maior relevância para esta dissertação, na região do Algarve. Assim, realiza-se, nesta secção, um resumo dos contributos mais importantes para o conhecimento nas áreas da modelação hidrológica e da recarga em aquíferos, que têm sido levados a cabo na região algarvia.

2.1 CONCEITOS

O ciclo hidrológico considera o movimento da água através da hidrosfera, que se define como toda a zona que contém água, a atmosfera, superfície terrestre e subsolo. Durante todo o ciclo a água passa por vários processos e estados.

A passagem da água da superfície terrestre para a atmosfera dá-se através do processo de evapotranspiração, que conjuga os processos de transpiração e evaporação. Uma vez na atmosfera, a acumulação de água dá origem à precipitação que pode ocorrer sob a forma de chuva, granizo, neve, orvalho e geada, dependendo das condições climáticas. Quando a precipitação atinge o solo pode ficar retida, infiltrar-se ou gerar escoamento superficial. Eventualmente toda a precipitação volta a atmosfera por evaporação ou transpiração.

Na Figura 2.1 apresenta-se um modelo do ciclo hidrológico.

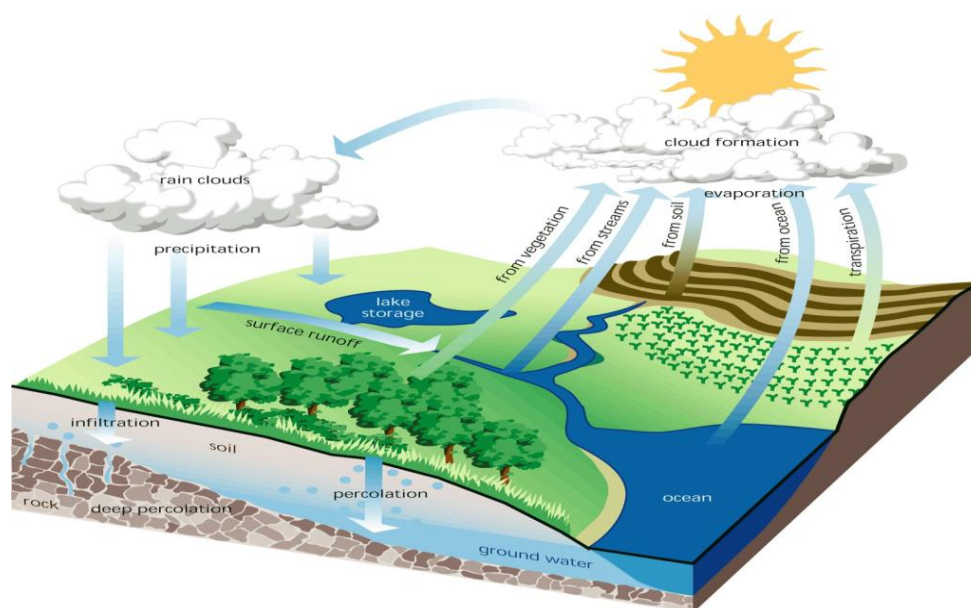


Figura 2.1 - O Ciclo Hidrológico Fonte: FISRWG, 1998

Na fase terrestre do ciclo hidrológico a água passa por uma série de processos e interações que influenciam o escoamento superficial e a recarga no aquífero.

Como **recarga** entende-se o processo natural, ou artificial, através do qual um aquífero recebe água proveniente do ciclo hidrológico de forma directa, ou indirectamente através de outra formação, lago ou rio. A recarga natural depende fundamentalmente do regime pluviométrico e do equilíbrio que se estabelece entre a infiltração, o escoamento e a evaporação. Assim sendo, a natureza do solo e o coberto vegetal têm um papel fundamental na recarga dos aquíferos (IGM, 2004).

Escoamento superficial entende a parte da precipitação que flui por acção da gravidade de modo não organizado, das zonas mais elevadas para as zonas mais baixas, concentrando-se em pequenos riachos que se reúnem em ribeiros e mais tarde em rios. Esta água irá terminar em lagos, mares ou oceanos, podendo infiltrar-se no terreno ou evaporar-se para a atmosfera. A magnitude do escoamento superficial depende da intensidade da precipitação, permeabilidade do terreno, duração e frequência da precipitação, tipo de coberto vegetal, área da bacia de drenagem, distribuição espacial da precipitação, geometria dos rios e ribeiros e declive dos terrenos (IGM, 2004).

Entende-se por **aquífero**, o estrato ou formação geológica que permite a circulação da água através dos seus poros ou fracturas, de modo a que o Homem possa aproveitá-la em quantidades economicamente viáveis tendo em conta um determinado uso (IGM, 2004). Os aquíferos podem ser classificados de diversas formas consoante as duas características hidrogeológicas.

Aquífero aluvionar considera as formações hidrogeológicas formadas por materiais não consolidados, depositados pela água (depósitos aluvionares), tipicamente adjacentes a cursos de água, com os quais, geralmente, mantém conexão hidráulica (IGM, 2004).

Aquífero cársico ocorre em rochas solúveis, geralmente zonas calcárias e dolomíticas, onde acções mecânicas e químicas originam cavidades de dissolução (dissolução do carbonato da rocha pela água) que podem atingir grandes dimensões. Quando há conexão hidráulica entre as diversas cavidades de dissolução, podem constituir-se verdadeiros cursos de água subterrânea, que permitem a circulação rápida da água. Os aquíferos cársicos são extremamente vulneráveis à contaminação, podendo proporcionar caudais avultados, de forma irregular, no espaço e no tempo (IGM, 2004).

Aquífero fissurado (ou fracturado) ocorre em formações geológicas que apresentam fissuras e fendas, mais ou menos contínuas. Este tipo de aquíferos ocorre em rochas ígneas e metamórficas. A capacidade destas rochas armazenarem água depende da sua porosidade e permeabilidade que, por sua vez, dependem da existência de fissuras ou fendas, da sua quantidade, abertura e intercomunicação. Geralmente, este tipo de aquíferos não fornece caudais muito avultados, permitindo apenas pequenas extracções locais (IGM, 2004).

No que respeita à forma como a água se encontra no solo, os aquíferos podem ser **livres ou confinados**.

No **aquífero livre** existe uma superfície livre de água que está em contacto directo com o ar, ou seja, à pressão atmosférica. Este tipo de aquíferos são superficiais ou subsuperficiais, o que facilita a sua exploração, recarga e contaminação. Num furo que atravesse, total ou parcialmente, um aquífero livre, o nível da água (ou nível freático), coincidirá com o limite superior do aquífero, por a água estar à mesma pressão que a pressão atmosférica. Também pode ser referido como aquífero não confinado ou aquífero freático (IGM, 2004).

Aquífero confinado define-se como um aquífero limitado superior e inferiormente por formações impermeáveis ou praticamente impermeáveis. Nos aquíferos confinados, a água está submetida a uma pressão superior à pressão atmosférica e todos os poros, ou outros espaços, estão completamente saturados de água. Num furo que intersecte um aquífero confinado, o nível da água, ou nível piezométrico, subirá até estabilizar num determinado nível, devido ao peso das camadas confinantes subjacentes. Este fenómeno é conhecido por artesianismo (IGM, 2004).

2.2 O PROJECTO ALGARVE¹

O primeiro estudo a ser realizado sobre a região do Algarve data do ano 1980 e foi desenvolvido a pedido da Direcção Geral de Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, no seguimento da aplicação de um estudo semelhante na região de Setúbal.

Este, denominado *Évaluation des Ressources en Eaux des Systèmes Aquifères de L'Algarve* ou mais sucintamente, Projecto Algarve, tinha como principal objectivo «(...) chegar a uma gestão racional do recursos hídricos para apoiar e fomentar o crescimento económico e o desenvolvimento regional do Algarve (...)» (Ribeiro & Braga dos Santos, 2006). Neste projecto foram identificados e estudados nove sistemas aquíferos do Algarve, ocupando uma área total de 1 700km².

Concluído em Dezembro de 1981, este estudo trouxe, para além do objectivo a que se propôs, *know-how* criado pela aplicação de modelos até esta altura nunca antes aplicados no nosso país, nomeadamente modelos de simulação para o estudo do movimento da interface brusca água doce/água salgada em aquíferos costeiros e um modelo de representação global do sistema hidrogeológico.

¹ Com base no artigo publicado pela APRH no 8º Congresso da Água, intitulado *O Projecto Algarve revisitado 25 anos depois*.

O Projecto Algarve possuía, ainda, um número significativo de metas, que se propôs atingir, da maior importância ao nível dos estudos hidrológicos e hidrogeológicos. Assim, os objectivos imediatos do projecto, definidos no plano de operação eram os seguintes:

- Realização de um inventário das águas subterrâneas do Algarve e estudo do funcionamento dos diversos sistemas aquíferos;
- Definição da viabilidade técnico-económica dos diferentes níveis de exploração das águas subterrâneas, com vista a assegurar as necessidades de água previstas para os horizontes de 2000 e 2020, face aos riscos de deterioração da qualidade da água;
- Formação de especialistas na área da modelação hidrogeológica e na gestão de recursos hídricos;
- Estudo preliminar de um sistema de gestão integrada, de um conjunto de recursos hídricos superficiais e subterrâneos do Algarve, de forma a optimizá-los;
- Criação de uma infra-estrutura de informação sobre os recursos hídricos do Algarve.

No que diz respeito aos modelos utilizados neste projecto, e uma vez que no projecto de Setúbal tinham sido utilizados modelos de diferenças finitas, foi escolhido, para aplicação aos sistemas calcários do Algarve, um modelo desenvolvido pelo Thames Water Authority (U.K.) que representa os aquíferos sob a forma de reservatórios lineares, sendo um modelo de aplicação global do sistema hidrogeológico.

Na representação do sistema aquífero como um conjunto de reservatórios lineares, a água precipitada poderá retornar à atmosfera por evaporação ou percolar através do solo. No segundo caso, a água vai “enchendo” diversos reservatórios até atingir a zona saturada do aquífero. Ao chegar à zona saturada, a água poderá, ainda, drenar para um curso de água ou, por outro lado, infiltrar-se directamente de um curso de água para o aquífero. Na Figura 2.2 pode ver-se um esquema do modelo do Thames Water Authority.

Como se depreende, este é um método bastante simplificado de representação hidrogeológica, mas que permite a sua aplicação onde a falta de informação é evidente ao nível do conhecimento da estrutura de cada sistema aquífero, bem como ao nível da escassez de dados.

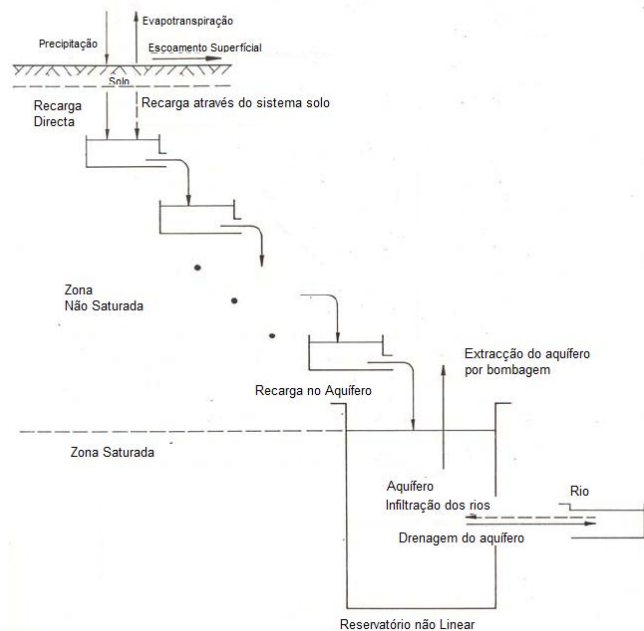


Figura 2.2 - Esquema do modelo hidrogeológico do Thames Water Authority Fonte: Ribeiro & Braga dos Santos, 2006

Foi, também, utilizado um modelo que simula o movimento da interface água doce/água salgada, desenvolvido no USGS (United States Geological Survey) por Faust, Mercer e Larson. Este segundo modelo resolve, de forma integrada, as equações de densidade dos fluidos, utilizando uma formulação em diferenças finitas.

O modelo do USGS foi aplicado ao sistema aquífero das areias dunares de Vila Real de Santo António e ao sistema aquífero de formação mio-pliocénica de Albufeira. Esta foi a primeira aplicação de modelos deste tipo em Portugal. Com base neste modelo foram realizadas simulações para 10 anos do movimento da interface no aquífero de Albufeira.

No que concerne a resultados, este projecto efectuou simulações para os horizontes 1981, 1990, 1995, 2000 e 2010, segundo um plano de adequação de procura de água, tendo em conta nove sistemas aquíferos, duas barragens existentes (Bravura e Arade) e quatro barragens em fase de projecto (Odelouca, Funcho, Odeleite e Beliche).

As simulações efectuadas permitiram avaliar que os sistemas aquíferos existentes eram suficientes para as necessidades de água, à data do estudo. Demonstrou-se, ainda, que caso as necessidades de água quadruplicassem, e com uma gestão racional dos recursos, os sistemas aquíferos seriam capazes de providenciar 90% das necessidades de água da região.

Comprovou-se, deste modo, que os recursos hídricos não representavam um factor limitante ao desenvolvimento sócio-económico da região.

Almeida (1985) promoveu um estudo sobre a hidrogeologia do Algarve central. Neste estudo, Almeida, invoca a importância da água e em especial da água subterrânea no Algarve. Segundo o autor, «[a] importância das águas subterrâneas, em termos económicos e humanos, pode ser aquilatada comparando o desenvolvimento do Barrocal algarvio com o que apresentava poucos anos atrás. A charneca alternando com a cultura da alfarrobeira e da amendoeira, foi substituída por vastos pomares de citrinos, por hortas ou por estufas onde se cultivam as novidades.».

Ainda segundo o autor, de modo a se poder preservar um bem tão fundamental, torna-se necessário um conhecimento tão completo quanto possível dos aquíferos. Apenas com este conhecimento se poderá efectuar uma gestão e protecção adequada à importância demonstrada.

Apesar de o estudo anteriormente descrito concluir que o recurso água não representa um factor limitante ao desenvolvimento económico, Almeida reitera a importância de realizar estudos mais aprofundados, com vista a eliminar eventuais explorações incontroladas que poderão levar a situações de rotura.

A região estudada por Almeida corresponde à zona central do Algarve, coincidindo aproximadamente com a bacia hidrográfica da ribeira de Quarteira, e teve como principal objectivo a definição das diversas unidades hidrogeológicas presentes na região e a definição das principais características hidráulicas e hidroquímicas.

Para a caracterização hidráulica o autor recorreu, essencialmente, a ensaios de caudal e ao estudo da propagação das flutuações da maré nos aquíferos. Já a caracterização das unidades hidrogeológicas, em termos de funcionamento, baseou-se, sobretudo, no estudo da piezometria.

Apesar das referências à necessidade de planeamento na utilização dos recursos hídricos, este estudo nada concluiu sobre esta matéria. As conclusões vieram, sim, aumentar o conhecimento sobre as características hidrogeológicas e hidroquímicas desta região.

Não menosprezando o conhecimento que este estudo veio trazer, observa-se uma dissociação entre o recurso água superficial e o recurso água subterrânea. No entanto, o recurso água deve ser encarado como um recurso único, e este estudo é desenvolvido, de uma forma geral, dissociando a componente superficial da componente subterrânea, afastando-se de uma análise integrada do recurso como um todo.

2.3 A CRIAÇÃO DO SISTEMA MULTIMUNICIPAL DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E SANEAMENTO DO ALGARVE E A TRANSIÇÃO ENTRE ÁGUA SUBTERRÂNEA E A ÁGUA SUPERFICIAL

Até ao final da década de noventa não se registaram grandes evoluções no que respeita a estudos na região do Algarve. No entanto, estava em curso uma reformulação no sector do abastecimento de água para os anos seguintes que iria alterar este cenário.

Foi nesta altura que se deu uma verdadeira mudança de paradigma no Algarve. Após terem sido constituídas, em 1995, as empresas Águas do Barlavento Algarvio, S.A. e Águas do Sotavento Algarvio, S.A., surge, em 1999-2000, a empresa Águas do Algarve, S.A. como resultado da fusão das duas anteriores.

Apesar dos resultados do Projecto Algarve, as orientações políticas vinham no sentido de passar a utilizar-se recursos superficiais em detrimento dos recursos subterrâneos, uma vez que estes eram insuficientes. Com o aparecimento da Águas do Algarve, o abastecimento que, até esta altura era feito recorrendo principalmente a recursos subterrâneos, passa a ser feito maioritariamente recorrendo a águas superficiais.

A componente superficial foi ainda reforçada pelo mais recente avanço da construção da Barragem de Odelouca, que integra a concessão da Águas do Algarve e que servirá para abastecimento de água nesta região.

Quinze anos depois do estudo pioneiro levado a cabo no início da década de oitenta, passa-se a ter mais confiança nas reservas de água superficial. Deixa de se encarar o recurso água como um todo e passa-se a considerar o recurso água superficial como o futuro e o recurso água subterrânea como algo ultrapassado.

Também no ano 2000 surgem os Planos de Bacia Hidrográfica, e com relevância para esta dissertação, o Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Algarve. Neste, surge definido que os aquíferos, devido às suas características morfológicas e hidrodinâmicas de menor vulnerabilidade, deverão ser considerados como estratégicos (INAG, 2000).

A opção de utilização dos aquíferos apenas em situação de emergência, por parte do INAG, veio no sentido de reforçar a opção tomada pela Águas do Algarve, S.A.. Havia, para além do fundamento político, um fundamento técnico a suportar tal decisão.

2.4 A SECA DE 2004-2005

Em 2004 e 2005 registou-se um período de seca em Portugal. Durante este período, e apesar de o Algarve ter sido das regiões mais afectadas, pode considerar-se, de uma forma geral, que a água para consumo humano nunca faltou.

Mas, durante estes anos de seca, observou-se a água das barragens que servem a região do Algarve atingir níveis preocupantemente baixos. Em Janeiro de 2005, o Diário de Noticias noticiava que a Barragem de Bravura já se encontrava a 60% da sua capacidade (Naves, 2005), enquanto as Barragens do Arade e do Funcho se encontravam com um nível de água inferior a 15% (Garcia, 2005).

O Público tinha então noticiado, no dia 6 de Janeiro do mesmo ano, que já se encontrava em estudo a activação de alguns dos furos existentes no Algarve, com vista a colmatar a falta de água (Agência Lusa, 2006).

Apenas cinco anos após a criação da empresa que permitiu que o Algarve fosse abastecido por águas superficiais, é atingida uma situação em que se torna necessário reactivar as antigas fontes de água subterrânea para abastecimento desta região.

Nesta altura, e impulsionado pelo período que se atravessava, foi lançado, pelo INAG, um estudo sobre o aproveitamento sustentável dos recursos hídricos do aquífero Querença-Silves. Este estudo tinha como objectivo verificar a capacidade do aquífero Querença-Silves ser uma alternativa segura ao recurso a águas superficiais em casos extremos (Lopes, et al., 2005).

Os resultados deste estudo foram, à altura em que foi divulgado, chocantes, referindo que, mantendo os níveis de extracção, o aquífero Querença-Silves poderia ver a sua superfície piezométrica rebaixada em cerca de 15m em cerca de dois anos. Previu ainda a formação de um cone de rebaixamento na zona das extracções e uma inversão do fluxo junto ao Rio Arade.

Esta publicação do INAG veio contrariar os resultados divulgados no início da década de oitenta pelo Projecto Algarve, que indicava que os sistemas aquíferos do Algarve tinham capacidade para quadruplicar a água fornecida ao sistema de abastecimento e que a água não constituía um factor limitante ao crescimento económico.

O estudo, então divulgado pelo INAG, em conciliação com a seca que se registou, funcionou como impulsionador dos estudos hidrológicos e hidrogeológicos nesta região. Ressalve-se que os estudos posteriores vieram demonstrar conclusões contrárias às do estudo do INAG.

2.5 PÓS SECA 2004-2005

Após o período de seca que se registou, e motivado pelo medo que outra seca pudesse lançar, uma vez mais, o Algarve numa crise devido à falta de água, sucederam-se os estudos sobre o potencial dos aquíferos e sobre as reais reservas de água da região.

Monteiro, et al. (2006b) divulgaram um ensaio realizado sobre o aquífero Querença-Silves, onde demonstram a metodologia utilizada para a calibração de um modelo de escoamento, baseado em elementos finitos. No estudo evidenciam, ainda, as fragilidades dos modelos adoptados anteriormente.

Segundo os autores, apesar de ser um modelo de mais difícil aplicação/calibração, o resultado final será bastante mais positivo do que os resultados dos modelos aplicados anteriormente. Este foi, assim, um passo em frente no conhecimento do funcionamento deste aquífero.

Monteiro, et al. (2006a) após a calibração do seu modelo de elementos finitos, apresentaram um estudo que demonstra a fulcral ligação existente entre os recursos subterrâneos e os superficiais. Neste estudo, foi utilizada uma metodologia simples, segundo o próprio autor, mas que permite identificar de forma grosseira troços de rios/ribeiras influentes (que contribuem para a recarga do aquífero) e troços efluentes (em que recebem água subterrânea).

A metodologia utilizada consistiu em verificar os troços dos cursos de água onde o potencial hidráulico cruza a linha topográfica, ou o fundo do leito dos cursos de água. Para esta hipótese foi ainda admitido que a totalidade dos cursos de água possui conexão hidráulica com o aquífero (o que não é necessariamente verdade).

Foram, também, identificados os principais pontos a melhorar neste tipo de estudo, que passa, em especial, pela identificação das conexões hidráulicas entre os troços de água e o aquífero. No entanto, e em particular para um aquífero cársico como o Querença-Silves, é demonstrada a importância de uma gestão integrada do recurso água subterrânea.

Esta divisão entre o estudo das águas superficiais e das águas subterrâneas não se encontra exclusivamente nas instituições portuguesas, mas sim um pouco por todo o mundo. Esta separação deve-se, essencialmente, às dificuldades na definição de relações quantitativas entre as componentes superficial e subterrânea do ciclo hidrológico (Monteiro, et al. 2006a).

Em 2008, Mendes Oliveira, M. et al. divulgam um estudo sobre a recarga no aquífero Querença-Silves. Para o cálculo de recarga foi utilizado o modelo BALSEQ_MOD, que faz um balanço sequencial ao nível do solo, incorporando metodologias para o cálculo dos processos de infiltração no

solo, evapotranspiração real e infiltração profunda no solo. A infiltração profunda no solo é considerada um estimador da recarga no aquífero (Mendes Oliveira, et al., 2008).

Como dados de entrada, o modelo, utiliza a precipitação diária (registada na estação de São Bartolomeu de Messines), a evapotranspiração de referência diária (estimada com base nos dados climatológicas da estação da Praia da Rocha, Portimão), um conjunto de parâmetros relacionados com o solo (cartografia da Carta de Solos) e a ocupação do solo (Corine Land Cover 2000) (Mendes Oliveira, et al., 2008).

A recarga foi deste modo estimada para o período entre 1 de Janeiro de 1941 e 30 de Setembro de 1991, tendo sido obtido o valor de $314\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, ou seja, $100\text{hm}^3\cdot\text{ano}^{-1}$. Tendo em conta que a precipitação anual média é de $704\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, a relação entre a recarga anual média e a precipitação anual média é de 45%.

Também no ano de 2008, Stigter, et al., trabalharam em conjunto com a empresa Águas do Algarve, S.A. com vista a flexibilizar o sistema de abastecimento de água desta região. O estudo resultante foi motivado pela falta de água que se registou nas fontes de água superficial utilizadas por esta entidade.

O objectivo deste trabalho centrou-se na elaboração de um sistema de suporte à decisão, de modo a garantir abastecimento de água na região algarvia a longo prazo. Com vista ao objectivo final, tornou-se, ainda, necessário escolher os locais/furos que deveriam ser utilizados pelo sistema multimunicipal, tendo em conta a sua produtividade e qualidade da água.

Este estudo demonstrou, uma vez mais, que uma visão estratégica e integrada da gestão da água promove o conhecimento deste recurso, bem como a resiliência dos sistemas e actividades económicas. Já na directiva 2000/60/CE e na actual Lei da Água (DL 58/2005), bem como em diversos documentos técnicos e institucionais, de países como os Estados Unidos e a Austrália, existem apelos e argumentos sobre a pertinência e necessidade de a gestão da água passar por uma gestão conjunta dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais (Monteiro, et al., 2006a).

3 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

A secção seguinte apresenta uma caracterização da área de estudo em função do clima, regime hidrológico, topografia, uso do solo e tipo de solo, e uma visão global sobre a obtenção de dados. A descrição sobre a obtenção de dados será centrada nas necessidades do modelo SWAT 2009².

3.1 INTRODUÇÃO À ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na região central do Algarve, estendendo-se desde a costa Sul até às cadeias montanhosas a Norte. Além do Algarve a área de estudo engloba, ainda, uma pequena parte do Alentejo. Com uma área de 1 655km² compreende 9 municípios: 2 pertencentes ao Alentejo e 7 ao Algarve, tal como se observa na Figura 3.1.

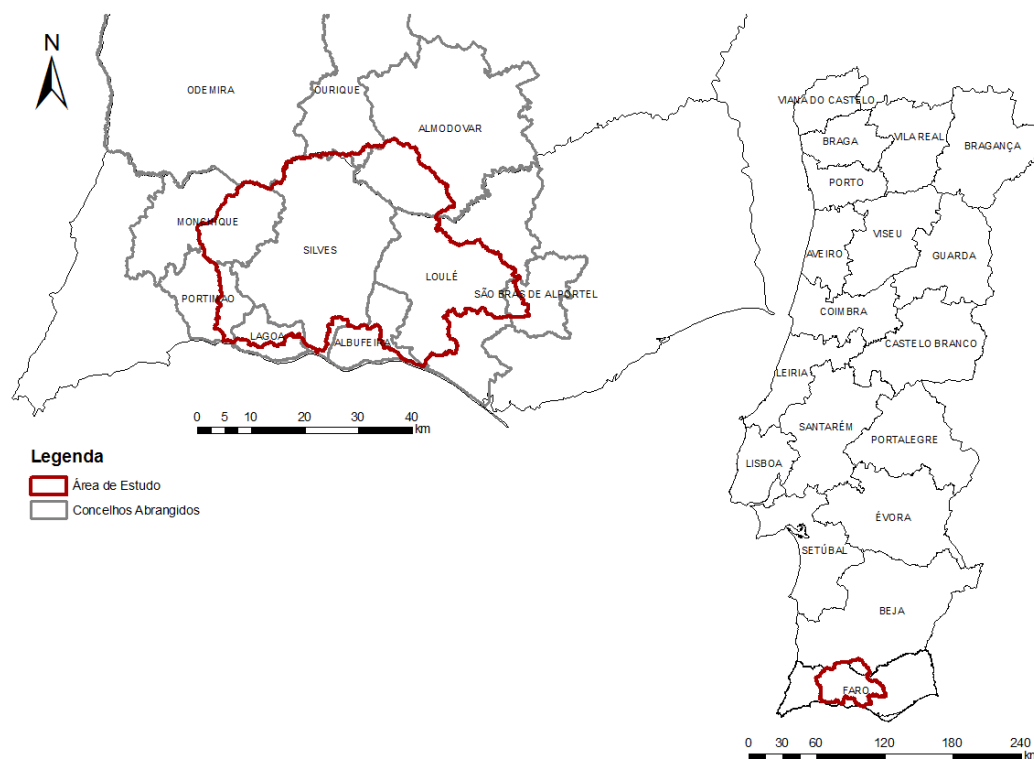


Figura 3.1 – Localização geográfica da área de estudo

A área da zona em estudo não está igualmente dividida pelos 9 municípios. Como se pode observar na Figura 3.1 o município de Silves, que se encontra no centro da área de estudo, é o que mais contribui para esta, em oposição o concelho de Ourique apenas contribui com 0.07%.

Na Tabela 3.1 pode verificar-se a contribuição de cada município para a bacia em análise.

² Este modelo será descrito na Secção 4.5.

Tabela 3.1 – Municípios da área de estudo e a sua contribuição

| Município | Região | Área do Município (km²) | Área do Município na Bacia (km²) | % Peso do Município na Bacia |
|-----------------------------|---------------|---|--|-------------------------------------|
| Almodôvar | Alentejo | 775.45 | 151.60 | 9.58% |
| Ourique | Alentejo | 660.15 | 11.03 | 0.70% |
| Albufeira | Algarve | 140.57 | 60.35 | 3.81% |
| Lagoa | Algarve | 88.25 | 54.07 | 3.42% |
| Loulé | Algarve | 764.26 | 403.50 | 25.50% |
| Monchique | Algarve | 395.26 | 161.10 | 10.18% |
| Portimão | Algarve | 182.08 | 56.93 | 3.60% |
| São Brás de Alportel | Algarve | 153.37 | 20.17 | 1.27% |
| Silves | Algarve | 680.02 | 663.40 | 41.93% |

A área de estudo é ainda caracterizada pela sua topografia e características geológicas. A Norte encontra-se limitada pelas zonas mais altas da região do Algarve, em particular a serra de Monchique e a serra do Caldeirão, contrastando com o Sul, em que é delimitada pelo mar. Contém ainda no seu núcleo o aquífero Querença-Silves, o mais importante da região algarvia devido à sua natureza cársica, à sua espessura e dimensão, bem como à sua capacidade de regulação anual e interanual. A Figura 3.2 representa o que se descreve anteriormente.

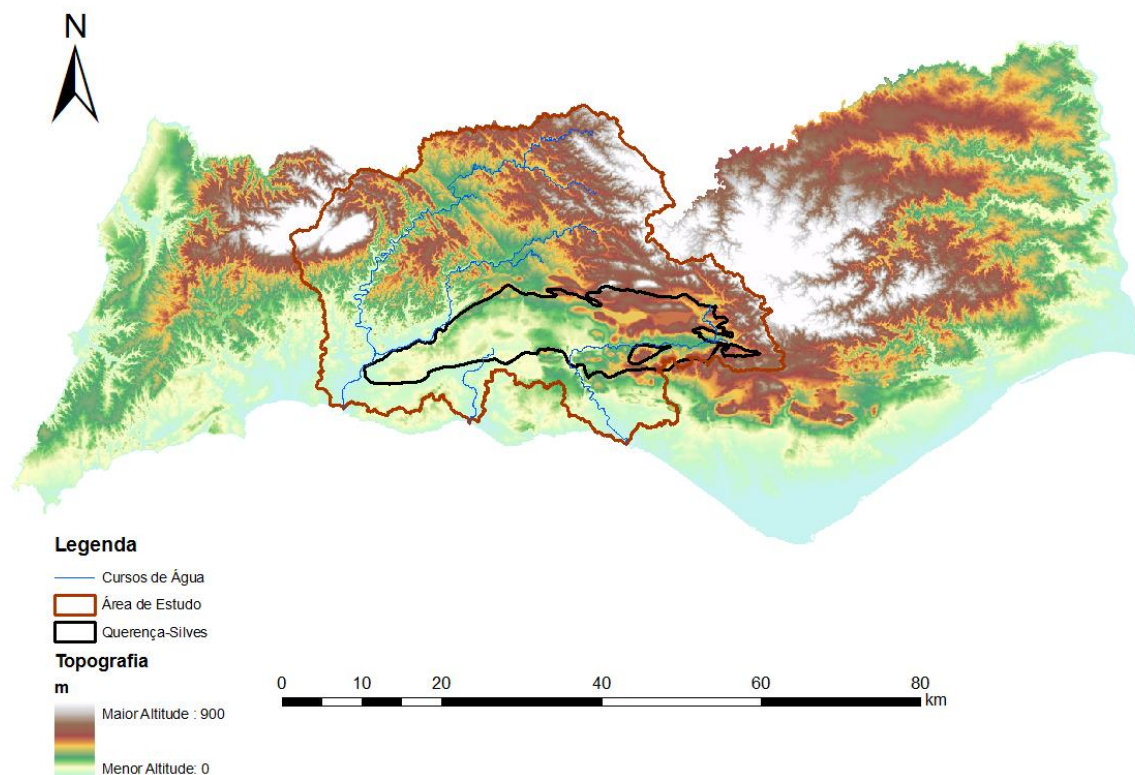


Figura 3.2 - Topografia da área de estudo e aquífero Querença-Silves; Fonte: MDT IGeoE 25x25m; Atlas do Ambiente

3.2 CLIMA

O clima na área de estudo pode ser caracterizado como clima Mediterrânico. No entanto, este encontra-se sobre a influência de aspectos locais, tais como a proximidade ao mar e a altitude, que varia desde o nível médio do mar até a cerca de 900m de altitude na serra de Monchique, conferindo-lhe características únicas.

Em relação à temperatura, considera-se que esta região tem uma temperatura moderada, variando entre os 10°C de mínima, no Inverno, e os 30°C de máxima, no Verão. No Inverno a amplitude de temperaturas médias varia entre os 6°C na serra de Monchique e os 20°C nas zonas perto do mar. Dias com temperaturas inferiores a 0°C são raras nas zonas costeiras, mas mais frequentes nas zonas interiores mais elevadas. Por outro lado, temperaturas acima dos 25°C são frequentes ocorrendo cerca de 150 vezes por ano, sobretudo nos meses de Julho e Agosto (CCDR Algarve, 2004).

No que respeita à precipitação, e pelo facto de nos encontrarmos numa zona de clima Mediterrânico, esta ocorre principalmente entre Outubro e Abril, sendo, no entanto, bastante heterogénea. A zona de

Monchique apresenta uma precipitação anual média acima de 1 000mm, podendo chegar aos 1 650mm (INAG, 2000). Contrariamente, a precipitação nas zonas costeiras raramente ultrapassa os 600mm anuais.

A figura abaixo mostra a precipitação média e as temperaturas máxima e mínima registadas entre os anos hidrológicos 1960-1961 e 1989-1990 (de referir que o ano hidrológico, em Portugal, decorre entre o dia 1 de Outubro e o dia 30 de Setembro do ano seguinte), na região do Algarve, a partir de dados retirados do SNRIH.

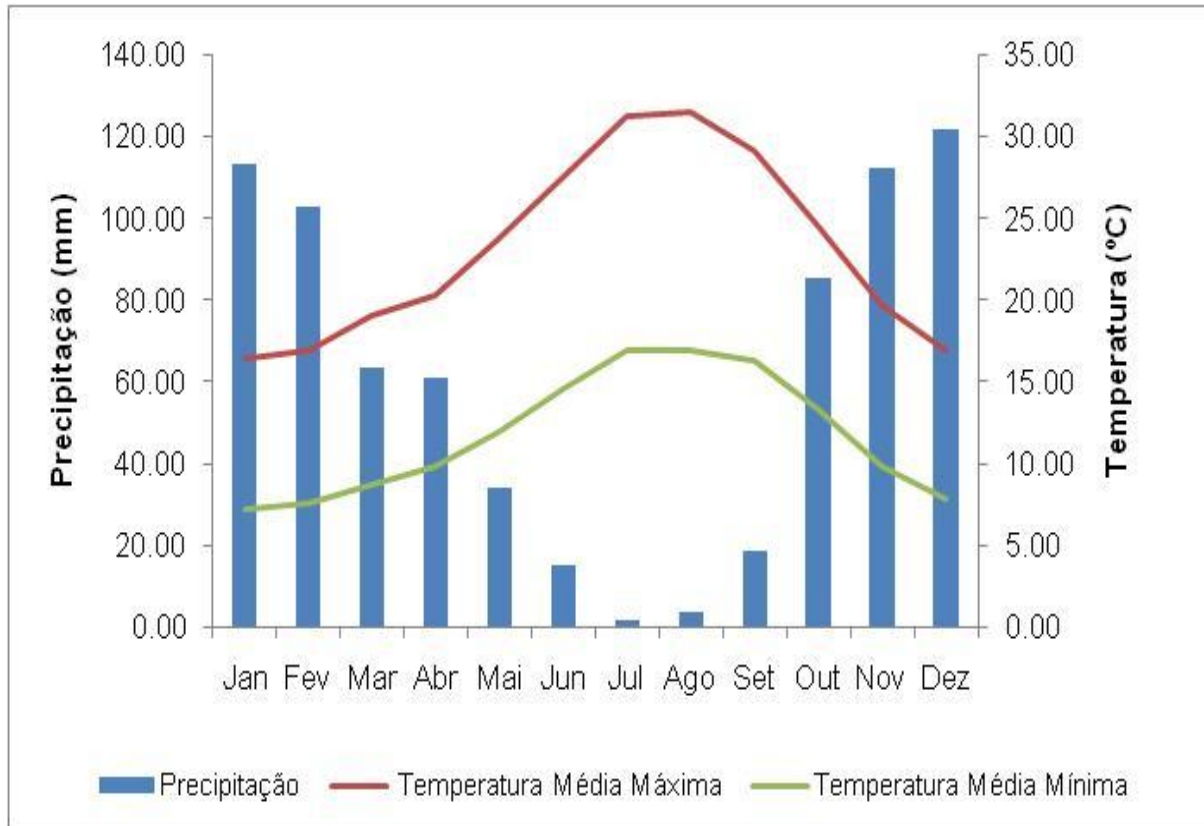


Figura 3.3 - Média da precipitação mensal e médias das temperaturas máxima e mínima da normal climática 1960-1961 a 1989-1990 para a região do Algarve; Fonte: SNIRH

Em relação à humidade, a zona em estudo é considerada seca, tendo um valor de humidade relativa média anual inferior a 75%, apenas com excepção das zonas montanhosas onde é considerada húmida (INAG, 2000).

Na Figura 3.4 pode-se observar como a temperatura e a precipitação variam na região do Algarve e, mais propriamente, na área de estudo. Como já referido anteriormente, existe uma diferença significativa entre as zonas costeiras e as zonas de montanhas da área de estudo.

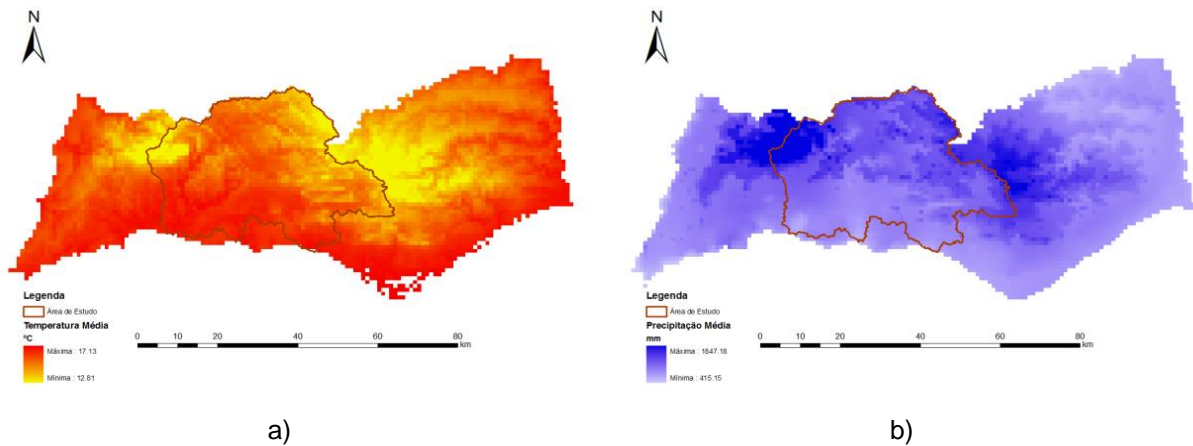


Figura 3.4 – a) Temperatura média anual Fonte: Nunes, não publicado; b) Precipitação média anual Fonte: Nicolau, 2002 1000x1000m

Na Figura 3.5 apresenta-se a evolução da precipitação média das estações analisadas, por ano hidrológico.

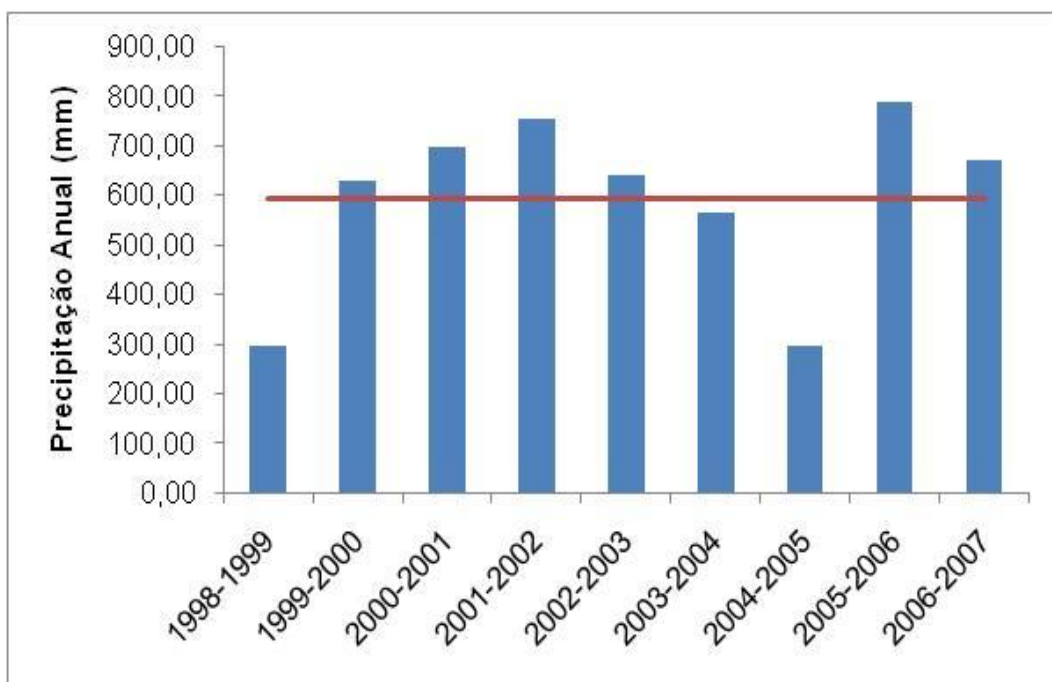


Figura 3.5 – Média da precipitação anual nas estações consideradas (apresentadas na Figura 3.14) e precipitação média anual para o período analisado

3.3 HIDROLOGIA

Recursos Hídricos Superficiais

A área de estudo é caracterizada por três cursos de água principais: o rio Arade-Odelouca, a ribeira de Alcantariilha e a ribeira de Quarteira. Tal como os restantes cursos de água desta região (com excepção do rio Guadiana), os que estão presentes neste estudo têm a sua origem nas cadeias montanhosas existentes a Norte da Bacia.

Grande parte das linhas de água, existentes nesta área, apresenta escoamento apenas durante os períodos de chuva, ou períodos imediatamente a seguir, estando secos nas restantes alturas do ano (MAOTDR, 2004), devido, essencialmente, as características hidrogeológicas da região, mais propriamente pela presença do aquífero Querença-Silves de características cársicas. Por norma, estas linhas têm uma extensão inferior a 30km, com excepção do rio Arade-Odelouca (CCDR Algarve, 2004).

Os três cursos de água em estudo têm um escoamento maioritariamente no sentido Norte-Sul, com um elevado declive no seu início, que diminui gradualmente com a aproximação às áreas costeiras.

O rio Arade (Arade-Odelouca) é o segundo curso de água mais importante da região algarvia, logo a seguir ao rio Guadiana. O Arade possui no seu percurso duas barragens: a Barragem de Silves (também conhecida como Barragem do Arade) e a Barragem do Funcho. Ambas representam uma elevada importância no abastecimento de água da região. Encontra-se, actualmente, em enchimento uma terceira barragem, a Barragem de Odelouca, que funcionará em conjunto com as duas anteriores, para assegurar o abastecimento de água a toda a região Algarvia.

Recursos Hídricos Subterrâneos

No que respeita à hidrogeologia, a área de estudo inclui as duas grandes formações presentes no Algarve: o Maciço Antigo e a Bacia Sedimentar. Ao nível dos recursos hídricos subterrâneos apenas a segunda apresenta potencial para a existência de reservas de água com algum significado.

É na bacia sedimentar que se encontra o aquífero Querença-Silves. Este é o maior e mais importante aquífero da região Algarvia e, por conseguinte, da área de estudo, tendo sido o principal responsável pelo abastecimento de água no ano 2005, quando as reservas superficiais deixaram de ser suficientes.

O aquífero Querença-Silves é caracterizado pela sua formação onde predominam os calcários e dolomitos, que lhe conferem uma natureza cársica. Este aquífero tem uma área de, aproximadamente, 318km² e uma espessura de cerca de 200m. Em termos de produtividade pode atingir valores de 83.3l.s⁻¹, sendo o valor médio de 12.2l.s⁻¹.

A análise piezométrica demonstra a existência de um fluxo preferencial no sentido Este-Oeste, existem, no entanto, anomalias locais. O escoamento é condicionado pelas descargas existentes no limite Oeste do aquífero, das quais se destaca as Fontes de Estômbar, com um caudal médio de 239l.s^{-1} (Tenreiro, et al., 2009).

Os cursos de água que atravessam o aquífero Querença-Silves possuem troços influentes e troços efluentes (Tenreiro, et al., 2009). Este factor faz com que as sub-unidades que caracterizam o aquífero se tornem menos independentes. O facto de haver troços influentes e efluentes mostra a grande influência que o aquífero tem sobre os cursos de água que o atravessam. Esta influência é facilmente observada, uma vez que é possível verificar que, na mesma altura do ano, um curso de água que se apresente seco numa zona mais a montante, pode apresentar um caudal significativo numa zona mais a jusante, após ter entrado na zona de influência do aquífero. A ribeira de Quarteira é um exemplo de um curso de água influenciado pelo Querença-Silves, sendo alimentada por várias nascentes ao longo do seu percurso (nascentes de Alte, Salir e Benémola).

Os recursos médios renováveis deste aquífero são de $100\text{M m}^3.\text{ano}^{-1}$ (Mendes Oliveira, et al., 2008), valor superior aos cerca de $70\text{M m}^3.\text{ano}^{-1}$ que são distribuídos anualmente pela empresa Águas do Algarve S.A.³ por toda a região algarvia.

Quer a produtividade média anual, quer a influência deste aquífero nos recursos hídricos superficiais, demonstra a importância de um estudo mais aprofundado sobre a recarga anual que aqui se verifica.

³ Valor referido no sítio <http://www.aguasdoalgarve.pt/>.

3.4 TOPOGRAFIA

A bacia estudada, como já foi referido, é caracterizada por grandes diferenças topográficas entre o Norte e o Sul. Enquanto o Norte é marcado por montanhas de zonas mais ou menos declivosas, o Sul é uma típica região costeira, com altitudes baixas e zonas planas abundantes, tal como se pode observar na Figura 3.6. Esta diferença encontra-se relacionada com o movimento das placas tectónicas e com a evolução geomorfológica, onde as fortes precipitações desempenham um papel importante.

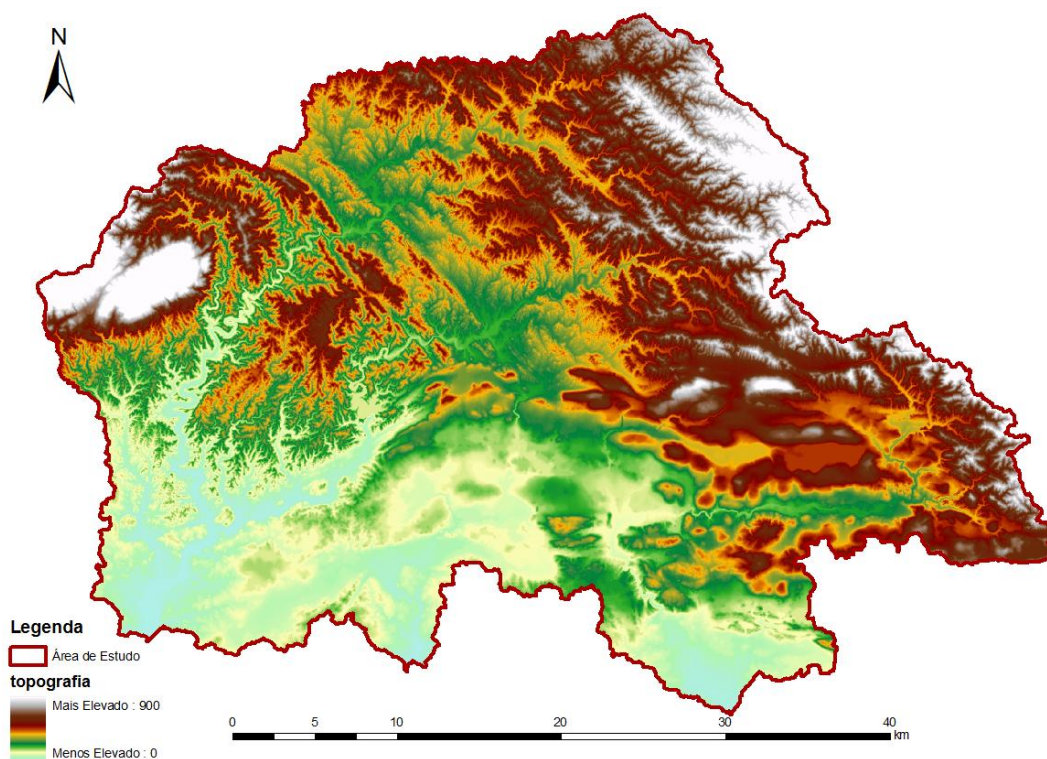


Figura 3.6 - Topografia da área de estudo Fonte: MDT IGeoE 25x25m

O limite Norte da bacia é caracterizado pela sua elevada altitude. Na região Noroeste, delimitada pela serra de Monchique, localiza-se o ponto mais elevado da área de estudo, a 900m de altitude. A Nordeste encontra-se a serra do Caldeirão que se eleva até os 500m.

Apesar da presença destas duas cadeias montanhosas, a zona em estudo é caracterizada por uma elevação média relativamente baixa em relação ao nível do mar. Assim, 31,52% da área da bacia encontra-se entre o nível do mar e os 100m e mais de 50% da bacia tem uma altitude inferior a 200m. Apenas cerca de 1% da área de estudo está acima dos 500m, tal como ilustrado na Figura 3.7.

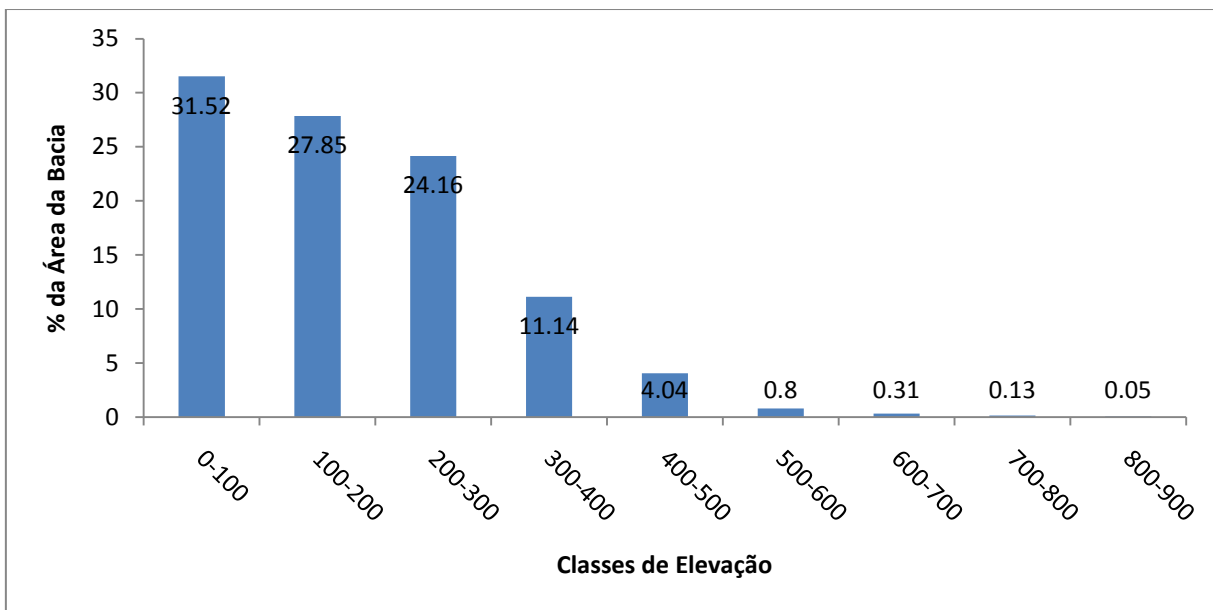


Figura 3.7 - Classes de elevação na área de estudo

Em termos de declive a área de estudo é, mais uma vez, dividida em duas áreas distintas. A zona Norte (caracterizada pelas serras algarvias) e a zona a Sul (caracterizada pela orla costeira). Tal como pode ser visto na Figura 3.8 os maiores declives encontram-se na zona a Norte, enquanto que a zona a Sul é caracterizada por declives mais suaves.

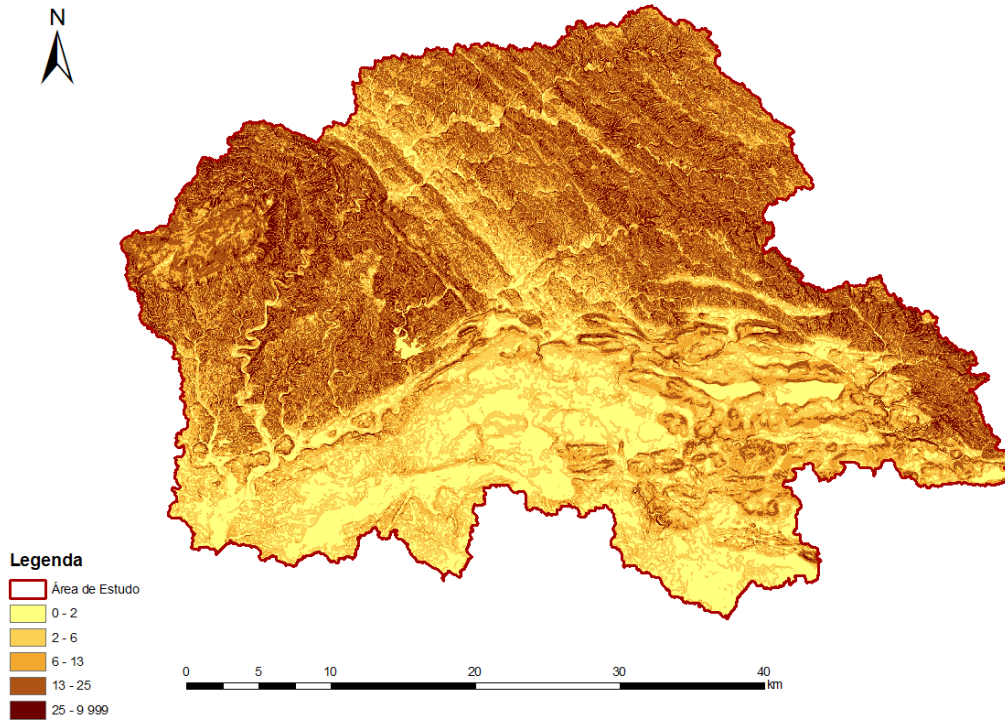


Figura 3.8 - Declives da área de estudo

A escolha de classes para este estudo corresponde às quatro primeiras classes da classificação de declives proposta pela FAO. A quinta e sexta classes definidas pela FAO foram agrupadas neste estudo, uma vez que o modelo SWAT apenas permite a diferenciação de cinco classes, desta forma a quinta classe varia desde o limite inferior da quinta classe da FAO até ao declive máximo. Tal como se pode ver na Figura 3.9 a distribuição de classes de declives é praticamente homogénea. Apenas a última classe se evidencia, facto que reside na gama de declives considerada nesta classe.

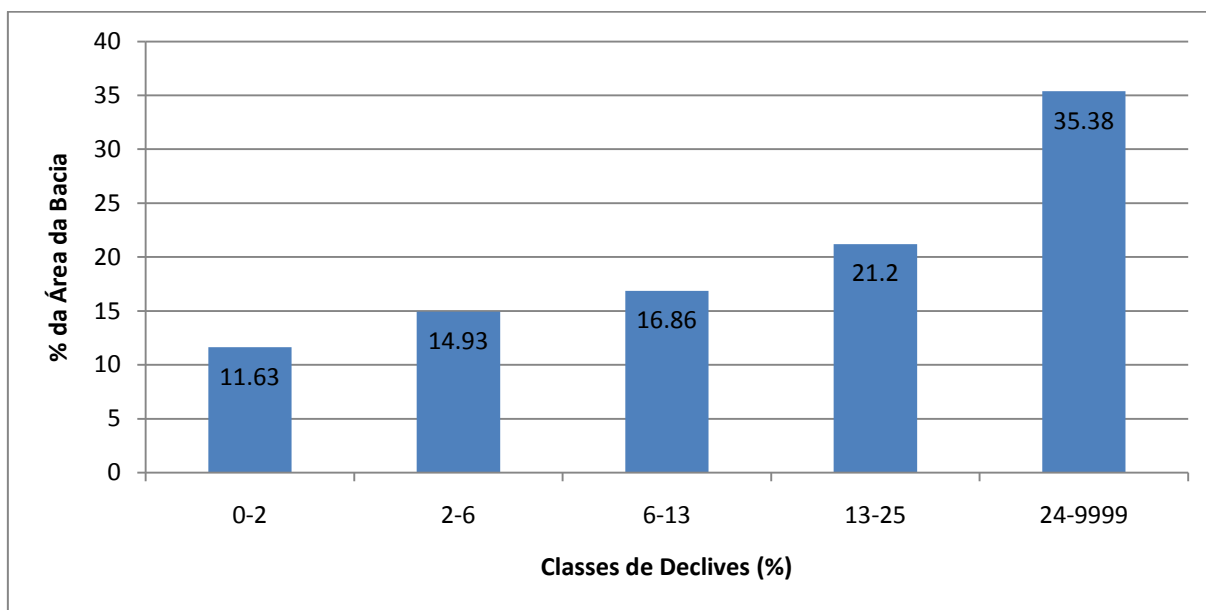


Figura 3.9 - Distribuição das classes de declives na bacia

3.5 USO DO SOLO

O uso do solo na área de estudo é caracterizado por uma diferença significativa entre a região Norte e a região Sul. Esta desigualdade deriva, essencialmente, do tipo de solo e da topografia destas regiões distintas.

A área a Norte é maioritariamente ocupada por montado e por matos mediterrânicos, em contraste, a área mais a Sul é densamente ocupada por árvores de citrinos e pomares.

Para a caracterização do uso de solo da área foram utilizadas as seguintes cartas: Corine Land Cover 2000 (daqui em diante designada por CLC2000) e Inventário Florestal Nacional (daqui em diante designado por IFN). A CLC2000 foi desenvolvida entre 2002 e 2004, através de uma iniciativa da União Europeia, ao contrário da IFN que foi desenvolvida em Março de 2001 sobre o projecto Neolnv do Ministério da Agricultura. Tendo em conta que ambas foram desenvolvidas na primeira metade da década de 2010, considera-se que representam um período de tempo coincidente.

A CLC2000, na sua classe 311, floresta de folhosas, inclui eucaliptos, carvalhos, sobreiros e azinheiras. Uma vez que estas culturas apresentam características distintas e representam uma área significativa na zona de estudo, o inventário da CLC2000 foi combinado com o IFN. Desta acção resultou uma carta onde foram analisadas as situações onde a CLC2000 apresentava florestas de folha perene e a IFN apresentava florestas de sobreiro, de eucalipto e de azinheira. Estas localizações foram reclassificadas de modo a representar as diferenças entre estas culturas.

Para que fosse possível correr o modelo SWAT, tornou-se necessário reclassificar a CLC2000, agora com os dados do IFN incorporados, quer para a adaptar à base de dados do SWAT em termos de culturas, quer para parametrizar os tipos de vegetação mais importantes.

A Tabela 3.2 ilustra a reclassificação introduzida na carta CLC2000 de forma a incorporar, nesta, uma matriz de correspondência com as culturas e zonas artificiais presentes no modelo SWAT. As últimas três categorias (523, 524 e 525) correspondem, não a uma categoria CLC2000, mas à sobreposição entre a CLC2000 e a IFN referida anteriormente.

Tabela 3.2 - Tabela de correspondência entre as classes CLC2000/IFN e as classes utilizadas pelo SWAT

| Valor CLC2000 | CLC2000 Nível III | Uso do Solo SWAT |
|----------------------|--|------------------------------|
| 111 | Continuous urban fabric | Industrial |
| 112 | Discontinuous urban fabric | Industrial |
| 121 | Industrial or commercial units | Industrial |
| 122 | Road and rail networks and associated land | Transportation |
| 123 | Port areas | Transportation |
| 131 | Mineral extraction sites | Southwestern US (Arid) Range |
| 132 | Dump sites | Southwestern US (Arid) Range |
| 133 | Construction sites | Residential |
| 142 | Sport and leisure facilities | Residential-Med/Low Density |
| 211 | Non-irrigated arable land | Agricultural Land-Row Crops |
| 212 | Permanently irrigated land | Orchard Irrigated |
| 221 | Vineyards | Vineyard |
| 222 | Fruit trees and berry plantations | Orchard Irrigated |
| 231 | Pastures | Pasture |
| 241 | Annual crops associated with permanent crops | Citrus orchard |
| 242 | Complex cultivation patterns | AGRR Irrigated |
| 243 | Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural forest | Mediterranean shrubland |
| 244 | Agro-forestry areas | Montado |
| 311 | Broad-leaved forest | Montado |
| 312 | Coniferous forest | Pine Forest |

| Valor CLC2000 | CLC2000 Nível III | Uso do Solo SWAT |
|---------------|-----------------------------|------------------------------|
| 313 | Mixed forest | Mixed commercial forest |
| 321 | Natural grasslands | Semi-arid grassland |
| 323 | Sclerophyllous vegetation | Mediterranean shrubland |
| 324 | Transitional woodland-shrub | Mediterranean shrubland |
| 331 | Beaches, dunes, sands | Southwestern US (Arid) Range |
| 421 | Salt marshes | Wetlands-Forested |
| 512 | Water bodies | Water |
| 522 | Estuaries | Water |
| 523 | Broad-leaved forest | Eucalyptus forest |
| 524 | Broad-leaved forest | Montado |
| 525 | Broad-leaved forest | Dense sclerophyll forest |

De notar que algumas das classes de culturas não estavam presentes na base de dados do modelo SWAT, como tal foi seguida a parametrização utilizada por Nunes (2007) para as culturas *Eucalyptus forest* e *Vineyard*, às quais foram adicionados os parâmetros descritos na tabela abaixo.

Tabela 3.3 - Valores utilizados para a parametrização do uso de solo (culturas apresentadas por Nunes (2007))

| Parâmetro | Unidade | Descrição | Eucalyptus forest | Vineyard |
|------------------|-------------|--|-------------------|----------|
| CPNM | | Quatro letras para identificação da cultura | EUCL | VINE |
| IDC | | Tipo de cultura | 7 | 7 |
| CROPNAME | | Nome da cultura | Eucalyptus forest | Vineyard |
| ALAI_MIN | m2/m2 | Área de folhas mínima durante período de dormência | 0.8 | 0.15 |
| BIO_LEAF | fracção | Fracção da biomassa que é acumulada a cada ano e que se transforma em resíduo durante o período de dormência | 0.3 | 0.3 |
| MAT_YRS | years | Número de anos para o desenvolvimento máximo | 15 | 10 |
| BMX_TREES | ton/ha | Biomassa máxima para uma floresta | 500 | 300 |
| EXT_COEFF | coeficiente | Coeficiente de extinção de luz | 0.42 | 0.47 |
| BM_DIEOFF | | | 0.1 | 0.1 |

Foram, ainda, parametrizadas as culturas *Montado*, *Dense sclerophyll forest*, *Citrus orchard* de acordo com os parâmetros apresentados em seguida.

Tabela 3.4 - Valores utilizados para a parametrização do uso de solo

| Parâmetro | Unidade | Descrição | Montado | Dense sclerophyll forest | Citrus orchard |
|-----------------|----------------------------------|---|------------------------|--------------------------|----------------|
| CPNM | | Quatro letras para identificação da cultura | MONT | FRSS | CTRS |
| IDC | | Tipo de cultura | 7 | 7 | 7 |
| CROPNAME | | Nome da cultura | Montado - oak savannah | Dense sclerophyll forest | Citrus orchard |
| BIO_E | (kg/ha)/ (MJ/m ²) | Eficiência no uso da radiação ou rácio biomassa-energia | 15 | 15 | 14 |
| HVSTI | fracção | Índice de colheita para crescimento óptimo | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| BLAI | | Índice potencial máximo de crescimento folhar | 2 | 4 | 4 |
| FRGRW1 | fracção | Fracção das unidades de calor potencial: primeiro ponto na curva de crescimento óptimo das folhas | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| LAIMX1 | fracção | Fracção da área de folhas máxima: primeiro ponto na curva de crescimento óptimo das folhas | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| FRGRW2 | fracção | Fracção das unidades de calor potencial: segundo ponto na curva de crescimento óptimo das folhas | 0.2 | 0.2 | 0.4 |
| LAIMX2 | fracção | Fracção da área de folhas máxima: segundo ponto na curva de crescimento óptimo das folhas | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| DLAI | fracção | Fracção da época de crescimento das folhas em que começa o declínio da área | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| CHTMX | m | Altura máxima | 6 | 6 | 4 |
| RDMX | m | Profundidade máxima das raízes | 9 | 9 | 9 |
| T_OPT | °C | Temperatura óptima de crescimento | 24.5 | 24.5 | 23 |
| T_BASE | °C | Temperatura mínima de crescimento | 9 | 9 | 13 |

| Parâmetro | Unidade | Descrição | Montado | Dense sclerophyll forest | Citrus orchard |
|-----------------|------------------------------|---|---------|--------------------------|----------------|
| CNYLD | kg N/kg produzido | Fracção normal de Azoto necessário | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 |
| CPYLD | kg P/kg produzido | Fracção normal de Fósforo necessário | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| BN(1) | kg N/kg biomassa | Fracção normal de Azoto para o rebentar da planta | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| BN(2) | kg N/kg biomassa | Fracção normal de Azoto a 50% do crescimento | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| BN(3) | kg N/kg biomassa | Fracção normal de Azoto na maturidade | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 |
| BP(1) | kg P/kg biomassa | Fracção normal de Fósforo para o rebentar da planta | 0.0007 | 0.0007 | 0.0007 |
| BP(2) | kg P/kg biomassa | Fracção normal de Fósforo a 50% do crescimento | 0.0004 | 0.0004 | 0.0004 |
| BP(3) | kg P/kg biomassa | Fracção normal de Fósforo na maturidade | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| WSYF | fracção | Índice de limite mínimo de colheita | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| USLE_C | | USLE C mínimo | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| GSI | m/s | Condutividade estomática máxima com radiação solar elevada e défice de vapor de água | 0.003 | 0.003 | 0.004 |
| VPDFR | kPa | Défice de pressão de vapor: segundo ponto na curva de condutividade estomática | 4 | 4 | 4 |
| FRGMAX | fracção | Fracção da condutividade máxima estomática: segundo ponto da curva de condutividade estomática | 0.3 | 0.3 | 0.5 |
| WAVP | g.MJ-1.kPa ⁻¹ | Taxa de declínio na eficiência de uso da radiação por unidade de aumento na pressão atmosférica | 7 | 7 | 7 |
| CO2HI | µL CO ² /L ar | Concentração de CO ₂ elevada: segundo ponto na curva de uso eficiente da radiação | 700 | 700 | 560 |
| BIOEHI | (kg/ha)/(MJ/m ²) | Rácio Biomassa-Energia: segundo ponto na curva de uso eficiente da radiação | 20 | 20 | 18 |
| RSDCO_PL | | Coefficiente de decomposição | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| OV_N | | Valor "n" de Manning para escoamento superficial | 0.1 | 0.1 | 0.15 |

| Parâmetro | Unidade | Descrição | Montado | Dense sclerophyll forest | Citrus orchard |
|-----------|--------------------------------|--|---------|--------------------------|----------------|
| CN2A | | A Número da curva SCS para condições de humidade II, tipo de solo A | 57 | 57 | 45 |
| CN2B | | A Número da curva SCS para condições de humidade II, tipo de solo B | 73 | 73 | 66 |
| CN2C | | A Número da curva SCS para condições de humidade II, tipo de solo C | 82 | 82 | 77 |
| CN2D | | A Número da curva SCS para condições de humidade II, tipo de solo D | 86 | 86 | 83 |
| FERTFIELD | | 1 se cultura fertilizada. 0 se cultura não fertilizada | 0 | 0 | 1 |
| ALAI_MIN | m ² /m ² | Área de folhas mínima durante período de dormência | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| BIO_LEAF | fracção | Fracção da biomassa que é acumulada a cada ano e que se transforma em resíduo durante o período de dormência | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| MAT_YRS | anos | Número de anos para o desenvolvimento máximo | 15 | 15 | 10 |
| BMX_TREES | ton/ha | Biomassa máxima para uma floresta | 500 | 1000 | 500 |
| EXT_COEFF | coeficiente | Coeficiente de extinção de luz | 0.47 | 0.47 | 0.47 |
| BM_DIEOFF | | | 0.1 | 0.1 | 0.1 |

Na Tabela 3.5 resumem-se as referências utilizadas na construção das tabelas apresentadas anteriormente, que serviram para a parametrização dos usos do solo considerados.

Tabela 3.5 - Referências utilizadas para parametrização do uso do solo

| Nome da Cultura | Referências |
|---------------------------------|---|
| Montado | PEÑUELAS, J. et al., 1997; Hoff, C. et al., 2002; Bussotti, F. et al., 2003; García-Mozo, H. et al., 2002; Tognetti, R. et al., 1998; Lhomme, J.P. et al., 2001; Rapp, M. et al., 1999; A. BOMBELLI, A. e GRATANI, L., 2003; Pereira, T.C. et al., 2009; Naburs, G.J. et al., 2003; Penman, J. et al., 2009; Deguchi, A. et al., 2006 |
| Dense sclerophyll forest | PEÑUELAS, J. et al., 1997; Hoff, C. et al., 2002; Bussotti, F. et al., 2003; García-Mozo, H. et al., 2002; Tognetti, R. et al., 1998; Lhomme, J.P. et al., 2001; Rapp, M. et al., 1999; A. BOMBELLI, A. e GRATANI, L., 2003; Pereira, T.C. et al., 2009; Naburs, G.J. et al., 2003; Penman, J. et al., 2009; Deguchi, A. et al., 2006 |
| Citrus orchard | Ribeiro, R.V. e Machado, E.C., 2007; Sandhu, C.S.S., 2003; Stenzell N.M.C. et al., 2006; Pérez Latorre, A.V. e Cabezudo, B., 2002; A. BOMBELLI, A. e GRATANI, L., 2003; Pereira, T.C. et al., 2009; Naburs, G.J. et al., 2003; Penman, J. et al., 2009; Deguchi, A. et al., 2006 |

| Nome da Cultura | Referências |
|-------------------|--|
| Eucalyptus forest | Pereira, T.C. et al., 2009; Naburs, G.J. et al., 2003; Penman, J. et al., 2009; Deguchi, A. et al., 2006 |
| Vineyard | Pereira, T.C. et al., 2009; Naburs, G.J. et al., 2003; Penman, J. et al., 2009; Deguchi, A. et al., 2006 |

O mapa de uso do solo, depois de reclassificado, pode ser visto na Figura 3.10. Constata-se que a zona em estudo é ocupada principalmente por montado (22.28%) e por matos mediterrânicos (31.92%) na zona Norte, enquanto que na zona Sul é ocupada maioritariamente por árvores de citrinos (12.85%) e por pomares (12.27%). A Figura 3.11 mostra a distribuição das culturas mais significativas na área de estudo.

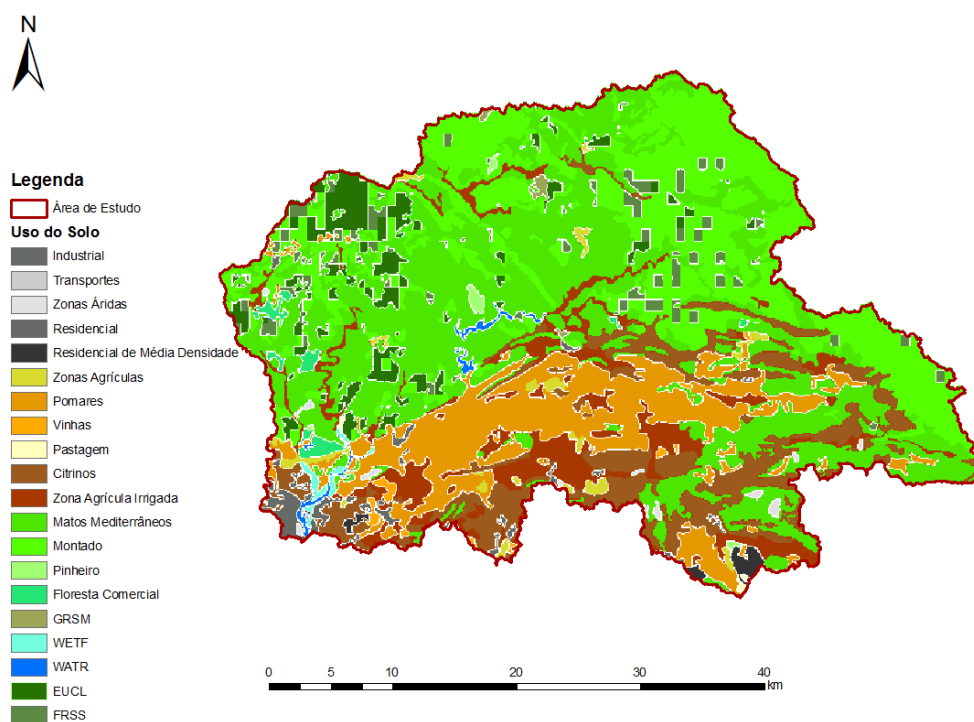


Figura 3.10 - Uso do solo na zona de estudo; Legenda referente às classes de uso do solo definidas no modelo SWAT

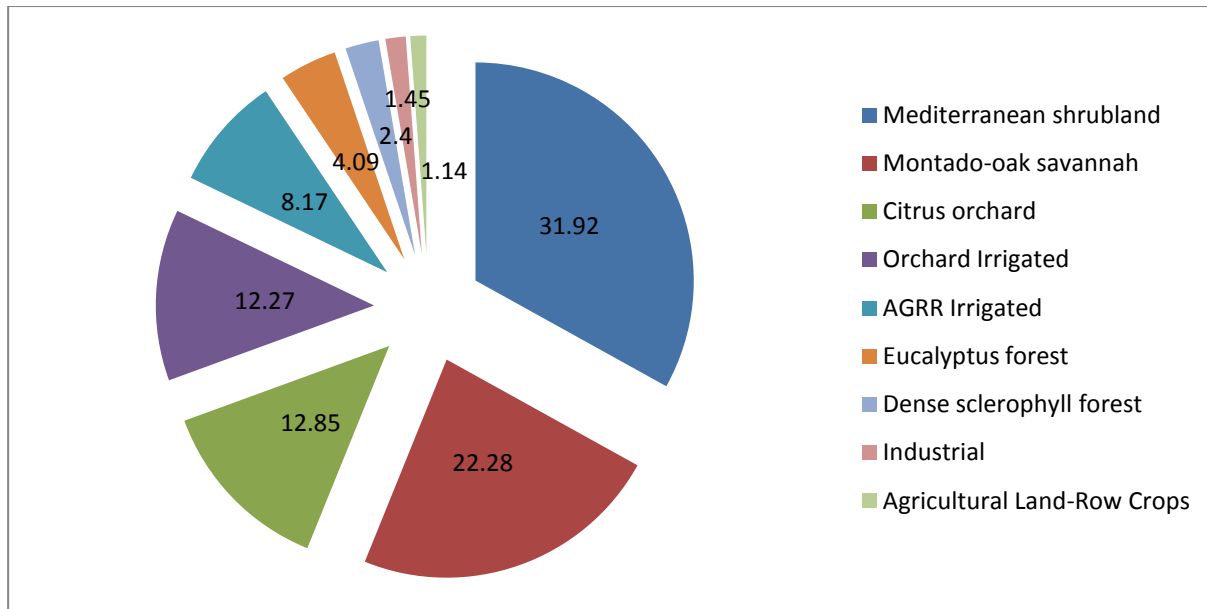


Figura 3.11 - Distribuição do uso do solo na zona de estudo

3.6 TIPO DE SOLO

Na área de estudo é possível encontrar, segundo a carta de solos do atlas do ambiente de 1971, quatro tipos de solo: Litossolos, Luvisolos, Cambissolos e Fluvisolos (segundo o sistema de classificação FAO 1976). Todos derivam de material primitivo, desde formações carbonatadas antigas, até recentes sedimentos de baixios e são estes materiais primitivos que determinam as características mais importantes dos solos, como a possibilidade de desagregação, a profundidade do solo, a tendência de erosão, os elementos nutritivos, entre outras (Kopp, 2000).

A distribuição deste tipo de solo, ao longo da zona em estudo, não é homogênea, distinguindo-se, tal como em anteriores características, a região mais montanhosa a Norte da região mais plana a Sul. A distribuição quantitativa do tipo de solo pode ser analisada na figura seguinte, sendo evidente a maior relevância de Litossolos, em contraste com a menor presença de Fluvisolos.

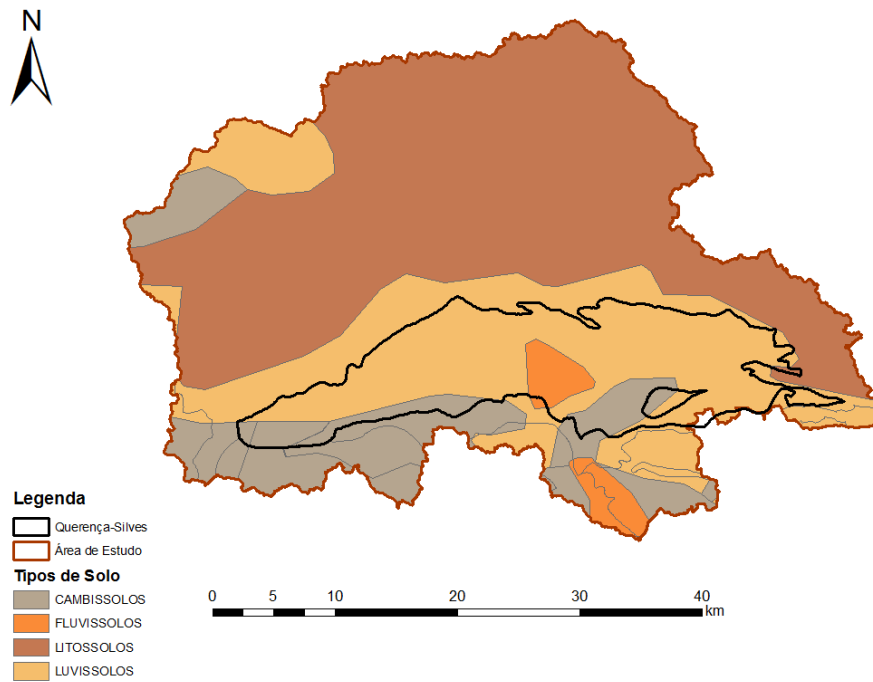


Figura 3.12 - Tipo de solo. Fonte: Carta de Solos do Atlas do Ambiente, 1971

Com vista a uma melhor caracterização do solo, necessária para a simulação decorrente da aplicação do modelo SWAT, introduziu-se uma alteração à carta de solos do atlas do ambiente de 1971. Esta modificação consistiu na sobreposição da carta de solos do atlas do ambiente com a carta dos aquíferos da orla meridional, também do atlas do ambiente.

Com esta operação pretende-se diferenciar solos idênticos mas que tenham características hidrogeológicas distintas. Desta forma a simulação no modelo SWAT é mais rigorosa, sobretudo no que se refere à recarga no aquífero.

3.7 OBTENÇÃO DE DADOS

3.7.1 Dados Climáticos

A amostragem de dados climáticos na zona em estudo é retirada do INAG e, também, do IM. Do INAG foram utilizadas as estações de monitorização disponíveis através do SNIRH e do IM utilizou-se a estação do aeroporto de Faro, disponível através dos dados diários da WMO.

Na área de estudo existem apenas 5 estações de monitorização do clima, do INAG, adicionando a estação do IM, foi possível contar com um total de 6 estações climatológicas para este estudo. Destas estações existem disponíveis dados de precipitação, temperatura, humidade relativa, velocidade do vento e radiação solar (apenas para as estações do INAG). A localização geográfica das estações pode ser visualizada na Figura 3.13.

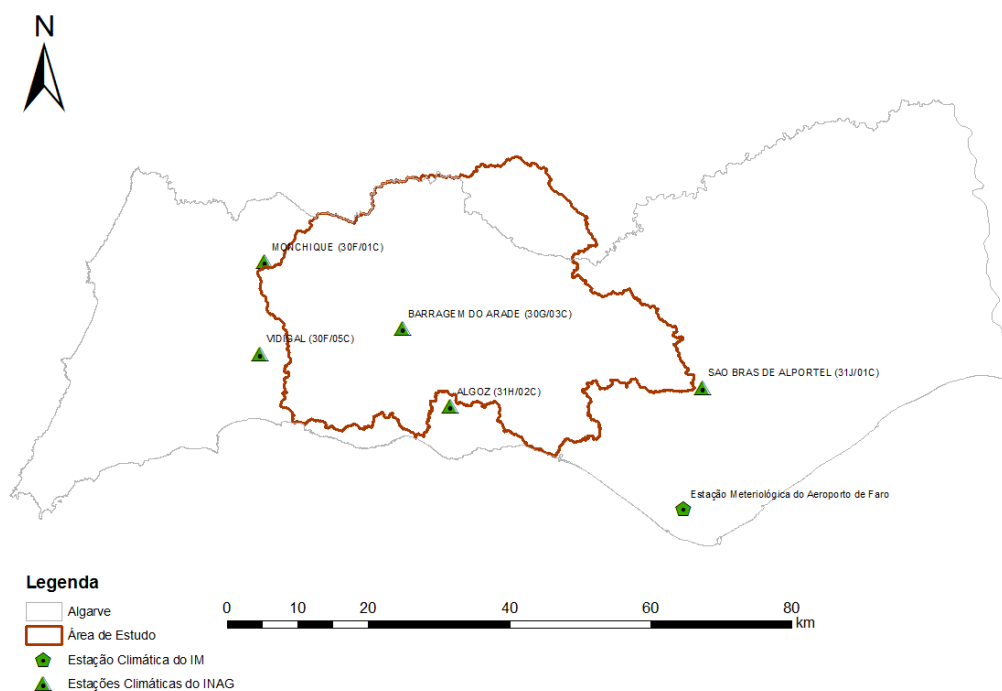


Figura 3.13 - Localização geográfica das estações climatológicas utilizadas

No que concerne a dados sobre a precipitação, o INAG tem disponível uma rede bastante mais completa. Deste modo foi possível utilizar um total de 21 estações com dados de precipitação (incluindo as 5 estações climatológicas já referidas), sendo que destas 1 corresponde à estação do IM do aeroporto de Faro – *vide* Figura 3.14. Para a maioria destas estações foi também possível retirar dados relativos à velocidade do vento.

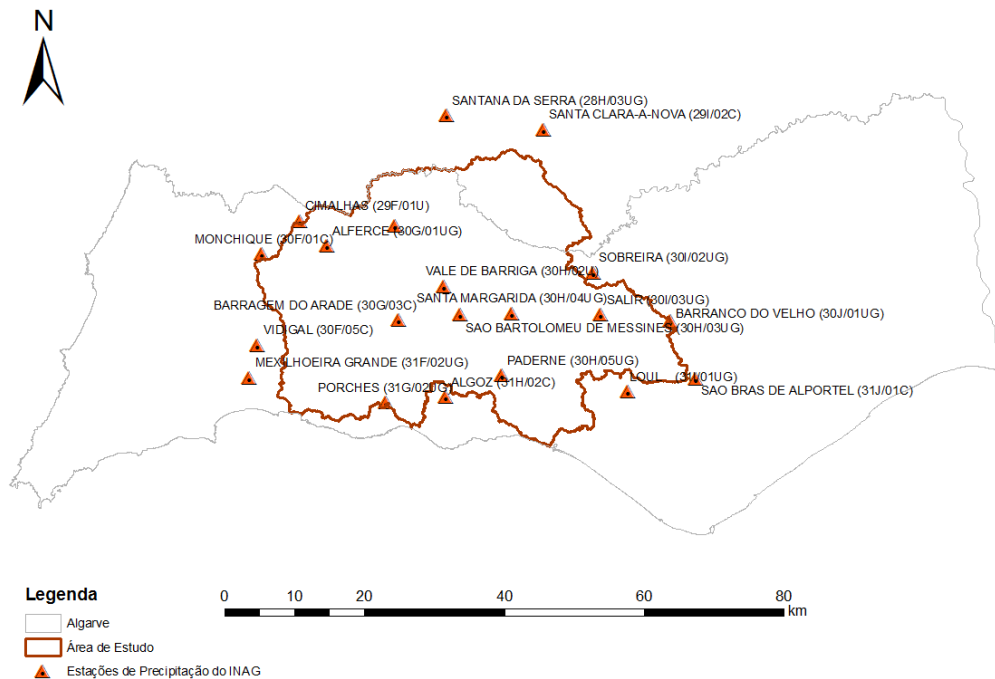


Figura 3.14 - Localização geográfica das estações com dados de precipitação

As estações climatológicas operadas pelo INAG, referidas anteriormente, no que respeita ao conjunto de dados que engloba radiação solar, temperatura horária, humidade relativa e velocidade do vento, só apresentam dados a partir do ano 2001. Assim, a única estação com dados disponíveis anteriores a esta data é a estação do aeroporto de Faro, operada pelo IM.

Para o modelo SWAT são apenas necessários valores de temperatura diários. No entanto, existem dados horários disponíveis para a maior parte do período analisado (1998-2007), desta forma decidiu utilizar-se apenas estes, não entrando em conta com os dados diários de temperatura máxima, mínima e média anteriores a 2001.

Tornou-se, assim, necessário completar os dados climáticos de modo a abranger um maior período de análise. O processo metodológico utilizado para tal será desenvolvido no capítulo referente à Metodologia (Secção 5).

3.7.2 Dados Hidrométricos

Na área de estudo existem 9 estações hidrométricas operadas pelo INAG, com dados disponíveis através do SNIRH. Estas estações possuem dados diários de caudal para os três cursos de água principais.

As estações utilizadas podem ser divididas em dois grandes grupos no que diz respeito aos dados que possuem: estações com dados anteriores a 1993 e estações com dados posteriores a 1993. Esta divisão é de extrema importância, uma vez que, como já foi dito, os dados climáticos das estações do INAG referem-se apenas ao período posterior a 2001. Na Figura 3.15 é possível ver a distribuição geográfica das estações hidrométricas.

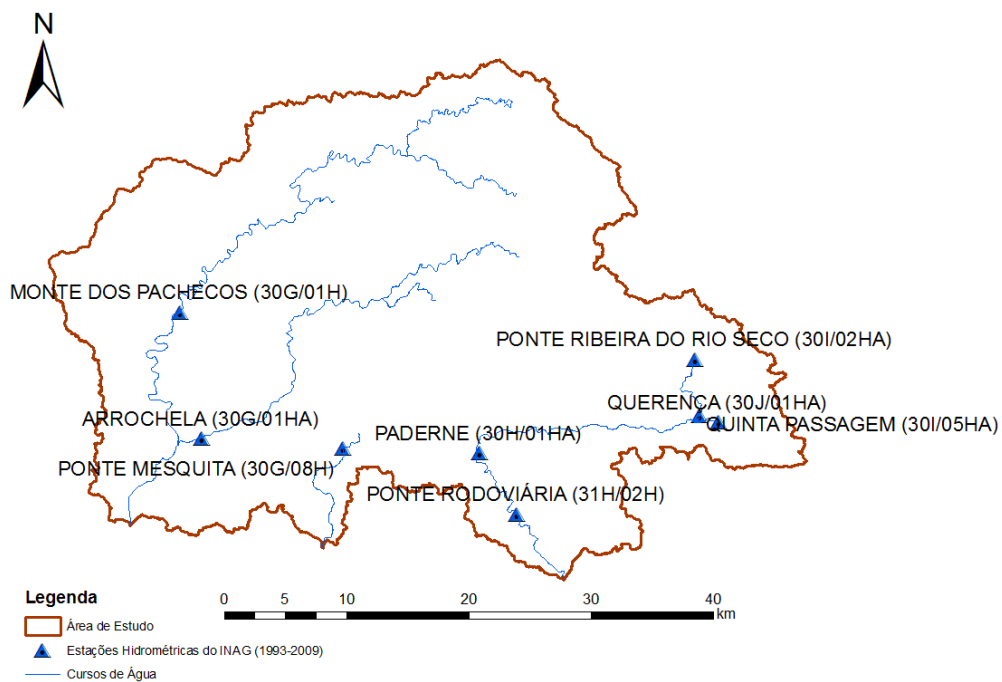


Figura 3.15 - Estações hidrométricas do INAG com dados disponíveis após 1993

Verificou-se, para estas estações, qual o período com a melhor colecção de dados disponíveis. Na Figura 3.16 podemos ver os dados disponíveis no SNIRH para o período entre o ano de 1993 e 2008.

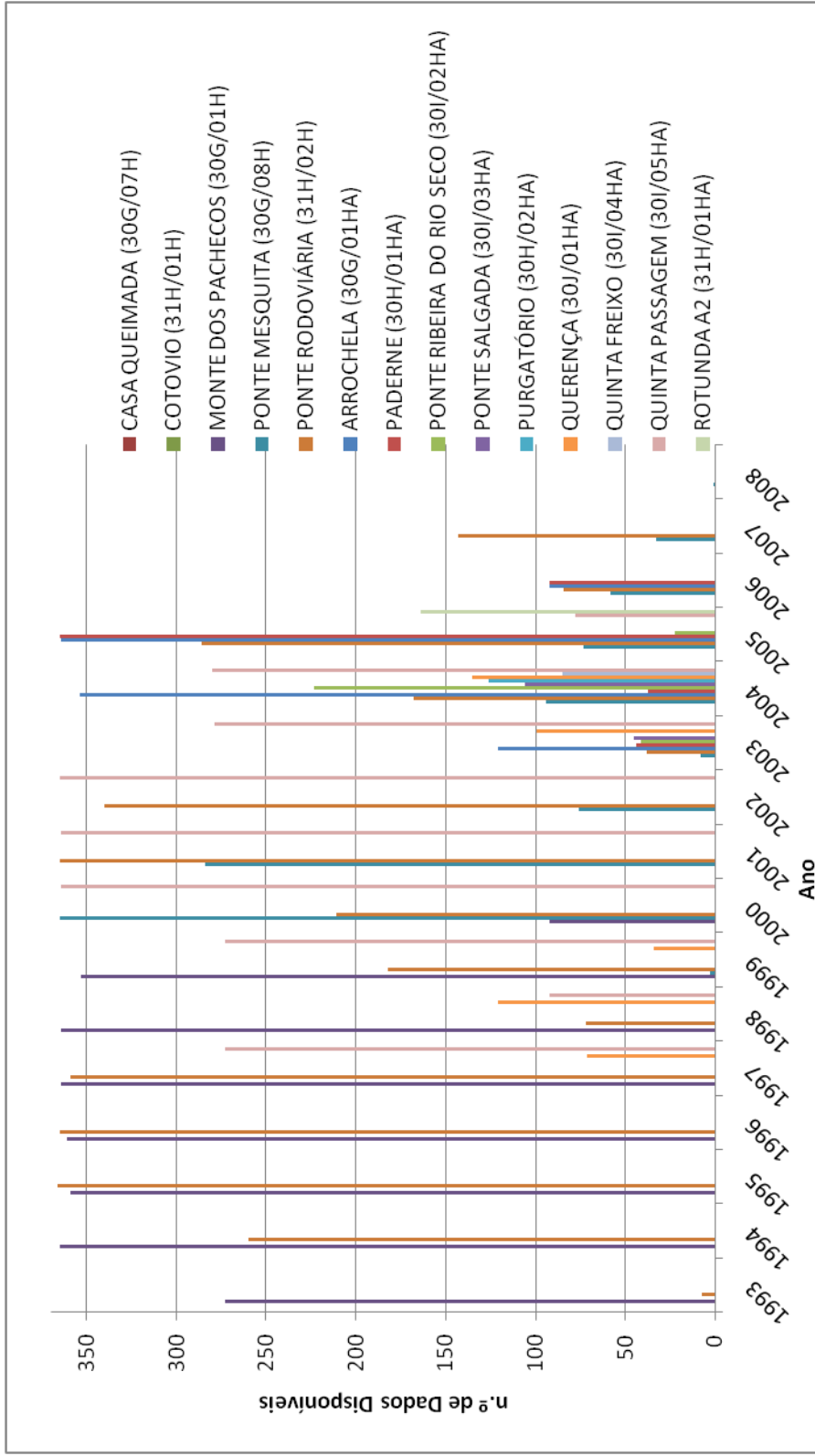


Figura 3.16 – Estações com dados hidrométricos disponíveis entre 1993 e 2008

4 METODOLOGIA

Nesta secção apresenta-se a metodologia usada para a análise definida como objectivo. Primeiro define-se o objectivo desta dissertação e qual a abordagem para o atingir. De seguida mostram-se os métodos que se utilizaram para completar os dados necessários, seguido de uma descrição dos métodos analíticos utilizados para o cálculo da recarga. Por fim descreve-se o modelo SWAT dando ênfase às suas principais características.

4.1 ABORDAGEM PREVISTA PARA O ESTUDO

Como já referido, pretende-se com este estudo aferir as capacidades do modelo SWAT, não apenas ao nível hidrológico, onde já existem estudos que o demonstram, mas na articulação hidrologia/hidrogeologia, em especial para uma zona cársica, com características bastante particulares.

Os dados utilizados para correr o modelo SWAT serão também aplicados a dois métodos analíticos para calcular a recarga. Estes métodos, que diferem entre si, têm a vantagem de necessitarem de uma menor quantidade de dados, sendo de aplicação mais imediata.

O primeiro método aplicado, para cálculo da recarga, é o de Penman-Grindley, que se baseia no balanço hídrico. O segundo é um método empírico, desenvolvido por Kessler especialmente para aquíferos cársicos.

Beneficiando da necessidade de calcular a ETP no método de Penman-Grindley, comparam-se os resultados de três métodos empíricos – Hargreaves, Thornthwaite e Turc - com os resultados de ETP do modelo SWAT, calculados através do método de Penman-Monteith.

A comparação dos resultados obtidos através dos métodos analíticos, aplicados para o cálculo da recarga e da ETP, com os valores resultantes do modelo SWAT permite averiguar a capacidade preditiva do mesmo. Esta análise leva a identificar o método que melhor se aproxima dos resultados hidrológicos/hidrogeológicos existentes para a região em estudo. Por fim, faz-se uma crítica sobre o desempenho do SWAT quando aplicado a regiões com características hidrogeológicas cársicas.

4.2 PREENCHIMENTO DE DADOS EM FALTA

Conjugando os dados hidrométricos e climatológicos existentes, definiu-se como período de referência o período entre Outubro de 1998 e Setembro de 2007, ou seja, 10 anos hidrológicos completos. Este período foi escolhido de modo a aproveitar o volume elevado de dados hidrométricos existentes, sem descurar o facto de a maioria dos dados climáticos estarem apenas disponíveis a partir do ano 2001.

Na análise dos dados climáticos constatou-se a existência de valores em falta nas séries necessárias, como seja ausência total de dados para os primeiros anos (1998 a 2001), ou pequenas lacunas existentes ao longo do período analisado. Para que os dados pudessem ser utilizados no modelo SWAT tornou-se necessário ter as séries temporais completas. Tal como já foi referido no ponto 3.7, os dados climáticos disponíveis no SNIRH começam apenas em 2001, mas, uma vez que era possível completar a informação existente com dados climáticos para anos anteriores e preencher os vazios existentes nos dados disponíveis, seleccionou-se o período de 1998 a 2007, em conformidade com os dados hidrométricos disponíveis.

Devido às diferentes metodologias utilizadas, a análise aos dados em falta será dividida em três pontos: dados referentes à temperatura e humidade relativa, dados referentes à velocidade do vento e dados referentes à radiação solar.

4.2.1 Temperatura e Humidade Relativa

Para estimar os dados, das estações do INAG, entre 1998 e 2001 referentes à temperatura foram utilizados os dados existentes para a estação do Aeroporto de Faro, do IM. Para uma melhor adequação dos dados foram construídas regressões lineares com base nos dados existentes de todas as estações em comparação com a estação do Aeroporto de Faro. Foi, assim, possível construir as series climáticas com todos os dados necessários para o período em causa.

Na Figura 4.1 apresenta-se um exemplo das relações lineares utilizadas para preencher os dados de temperatura relativa das 5 estações climáticas do INAG.

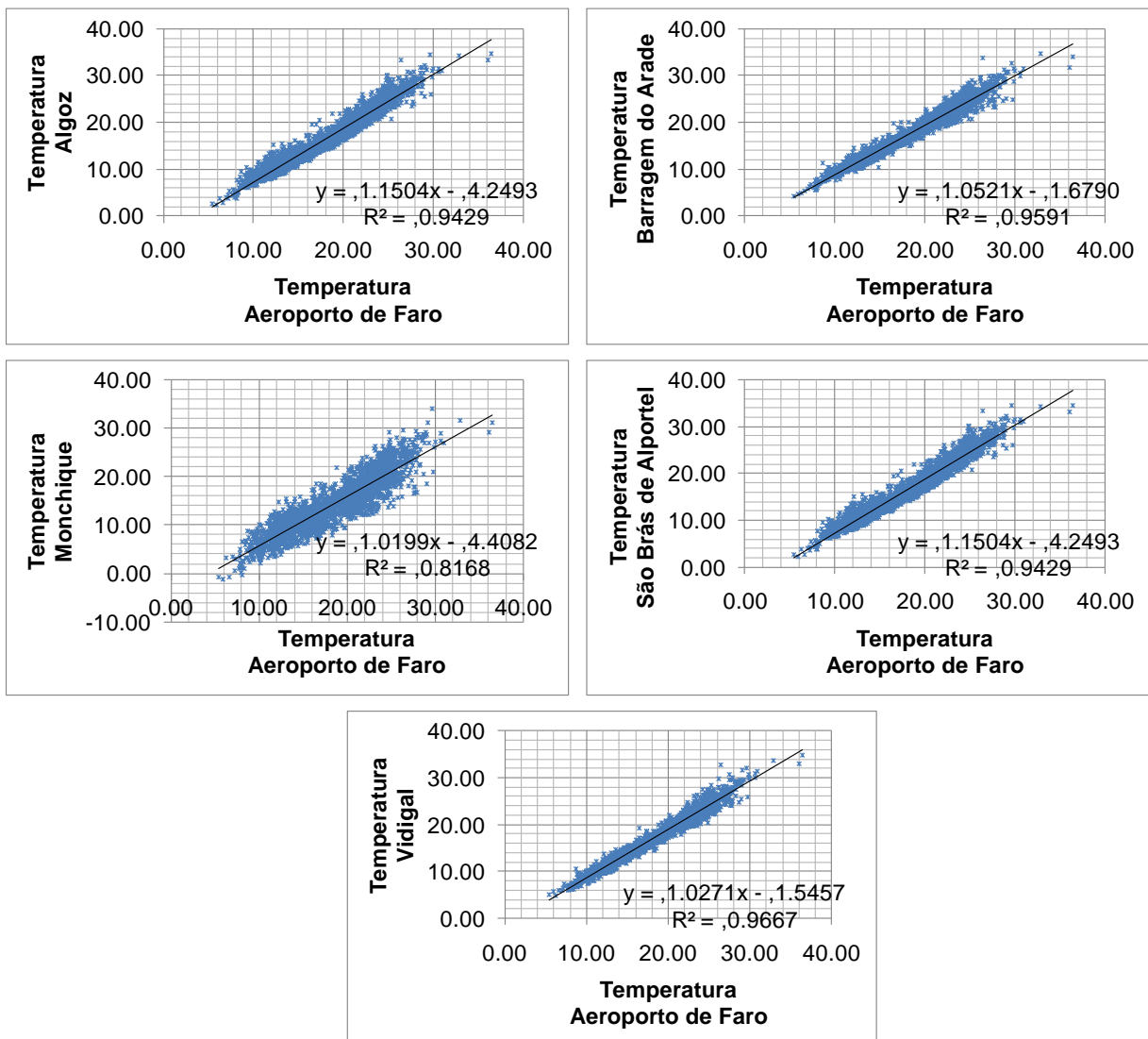


Figura 4.1 - Relação entre a temperatura (em °C) no Aeroporto de Faro (estação do IM) e as estações do INAG

No que respeita ao preenchimento dos dados em falta, verificou-se qual a melhor correspondência entre as 6 estações existentes. Com este método foi possível preencher as restantes falhas, passando a ter séries de dados completas para a temperatura, entre o dia 1 de Outubro de 1998 e o dia 30 de Setembro de 2007.

Para a humidade relativa, e uma vez que o SNIRH tinha disponíveis dados para a totalidade do período analisado, foi apenas necessário preencher as lacunas pontuais de dados. Compararam-se, assim, as 6 estações e foi adoptada a melhor relação entre duas estações para que fosse possível completar as séries com os dados em falta.

Na Figura 4.2 apresentam-se as relações para a humidade relativa entre as diferentes estações.

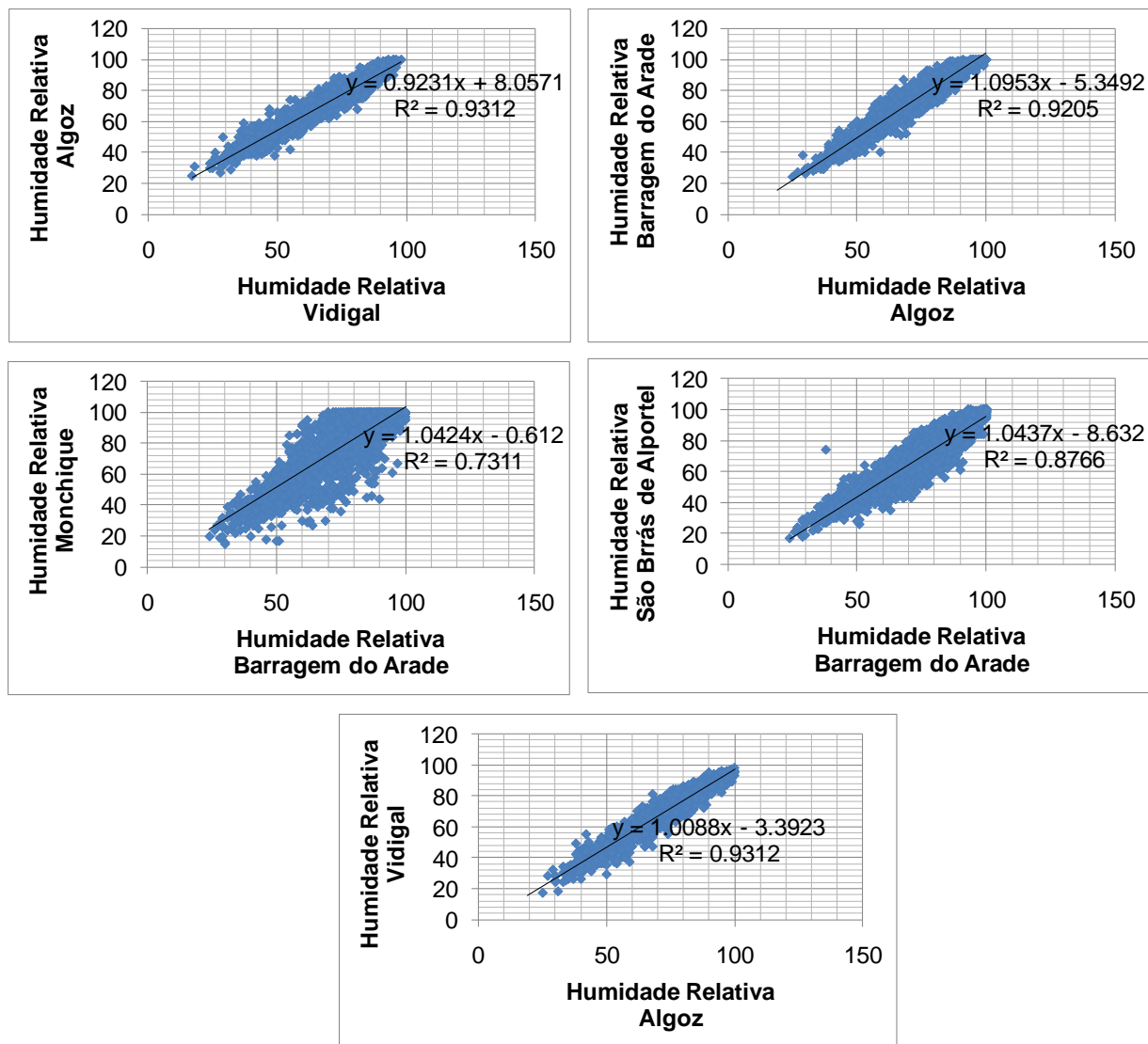


Figura 4.2 - Relação entre a humidade relativa (em %) entre estações analisadas

4.2.2 Velocidade do Vento

Tal como para as restantes variáveis climáticas, também para a velocidade do vento os dados disponíveis são apenas a partir de 2001. Devido à variabilidade espacial deste parâmetro não era viável a aplicação do método anterior. Assim tomou-se como válido que o valor da velocidade do vento para os dias em falta seria igual à média desse mês nos vários anos com dados disponíveis.

Para este parâmetro não existem apenas as 5 estações já referidas como estações climáticas do INAG. Neste caso existe um total de 19 estações com esta informação disponível no SNIRH. As estações com dados sobre a velocidade do vento incluem-se nas estações definidas na Figura 3.14. Na Tabela 4.1 nomeiam-se as estações utilizadas, bem como a velocidade média mensal do vento para cada uma das estações.

Tabela 4.1 - Velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) para as estações climáticas do SNIRH

| Mês | Alferce | Algoz | Barragem do Arade | Barranco do Velho | Loulé | Mexilhoeira Grande | Monchique |
|-----------|---------|-------|-------------------|-------------------|-------|--------------------|-----------|
| Janeiro | 1.18 | 0.79 | 0.72 | 2.18 | 0.60 | 0.40 | 1.95 |
| Fevereiro | 1.26 | 0.79 | 0.94 | 2.04 | 0.59 | 0.60 | 1.91 |
| Março | 1.56 | 0.90 | 1.19 | 2.34 | 0.68 | 0.67 | 2.34 |
| Abril | 1.55 | 0.91 | 1.39 | 2.13 | 0.69 | 0.82 | 2.08 |
| Maiο | 1.68 | 1.07 | 1.40 | 2.13 | 0.80 | 0.96 | 2.00 |
| Junho | 1.83 | 1.20 | 1.72 | 2.16 | 0.92 | 1.08 | 2.02 |
| Julho | 2.00 | 1.43 | 1.90 | 2.16 | 1.21 | 1.32 | 2.08 |
| Agosto | 1.78 | 1.18 | 1.61 | 2.12 | 0.98 | 1.10 | 1.91 |
| Setembro | 1.63 | 1.03 | 1.42 | 1.91 | 0.80 | 0.89 | 1.84 |
| Outubro | 1.59 | 0.86 | 1.29 | 2.17 | 0.62 | 0.68 | 2.08 |
| Novembro | 1.23 | 0.90 | 0.89 | 2.04 | 0.60 | 0.49 | 1.80 |
| Dezembro | 1.25 | 0.94 | 0.85 | 2.57 | 0.68 | 0.53 | 2.31 |

| Mês | Paderne | Porches | Salir | Santa Margarida | Santana da Serra | Sobreira |
|-----------|---------|---------|-------|-----------------|------------------|----------|
| Janeiro | 0.58 | 0.27 | 0.92 | 0.63 | 0.61 | 0.77 |
| Fevereiro | 0.76 | 0.30 | 0.90 | 0.66 | 0.72 | 0.77 |
| Março | 0.98 | 0.41 | 1.24 | 0.90 | 0.90 | 1.00 |
| Abril | 1.03 | 0.45 | 1.22 | 0.74 | 0.94 | 0.93 |
| Maiο | 1.21 | 0.55 | 1.34 | 0.69 | 1.03 | 0.97 |
| Junho | 1.37 | 0.58 | 1.37 | 0.84 | 1.11 | 1.09 |
| Julho | 1.54 | 0.73 | 1.53 | 0.84 | 1.17 | 1.26 |
| Agosto | 1.22 | 0.58 | 1.36 | 0.86 | 1.05 | 1.12 |

| Mês | Paderne | Porches | Salir | Santa Margarida | Santana da Serra | Sobreira |
|----------|---------|---------|-------|-----------------|------------------|----------|
| Setembro | 1.02 | 0.44 | 1.11 | 0.81 | 0.95 | 0.97 |
| Outubro | 0.84 | 0.34 | 1.06 | 1.09 | 1.01 | 1.00 |
| Novembro | 0.67 | 0.27 | 0.94 | 0.64 | 0.75 | 0.84 |
| Dezembro | 0.71 | 0.27 | 1.04 | 0.83 | 0.67 | 0.92 |

| Mês | São Bartolomeu de Messines | São Brás de Alportel | São Marcos da Serra | Vidigal |
|-----------|----------------------------|----------------------|---------------------|---------|
| Janeiro | 1.27 | 1.06 | 0.77 | 0.83 |
| Fevereiro | 1.25 | 0.91 | 0.77 | 0.95 |
| Março | 1.47 | 1.09 | 1.06 | 1.08 |
| Abril | 1.50 | 1.08 | 1.06 | 1.10 |
| Maio | 1.68 | 1.26 | 1.21 | 1.23 |
| Junho | 1.86 | 1.18 | 1.35 | 1.38 |
| Julho | 2.07 | 1.59 | 1.58 | 1.45 |
| Agosto | 1.89 | 1.27 | 1.39 | 1.33 |
| Setembro | 1.64 | 1.04 | 1.13 | 1.17 |
| Outubro | 1.44 | 0.86 | 1.05 | 1.06 |
| Novembro | 1.20 | 0.99 | 0.94 | 0.91 |
| Dezembro | 1.19 | 0.99 | 0.94 | 0.92 |

4.2.3 Radiação Solar

Para o cálculo da radiação solar seguiu-se o método proposto por Samani, em 2000, e que o próprio apelidou de equação de Hargreaves-Samani. Este método surge da necessidade de estimar a radiação solar com um mínimo de dados climáticos disponíveis e adapta o método descrito por Hargreaves e Samani, em 1982.

Segundo o método original a radiação solar (R_s em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) deveria ser estimada seguindo a seguinte equação:

$$R_s = (KT)(R_a)(TD)^{0.5} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

TD – a diferença entre a temperatura máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$);

R_s – radiação extraterrestre ($\text{Mj.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$);

KT – coeficiente empírico.

Samani (2000) acrescenta que KT deverá ser calculado verificando a relação quadrática entre a radiação observada e a diferença entre a temperatura mínima e máxima, sendo este ponto a diferença entre a equação proposta inicialmente e esta nova abordagem.

Por sua vez, calculou-se a radiação extraterrestre diária (R_a em $Mj.m^{-2}.d^{-1}$) recorrendo ao método descrito em Neitsch (2005) e que se baseia no seguinte conjunto de equações:

$$R_a = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 [\omega T_{sr} (\sin \delta \sin \Phi) + (\cos \delta \cos \Phi \sin(\omega T_{sr}))] \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

I_{sc} – constante solar ($4\,921\,Mj.m^{-2}.h^{-1}$);

E_0 – correcção da excentricidade da órbita da terra;

ω – velocidade angular de rotação da Terra ($0.2618\,rad.h^{-1}$);

T_{sr} – hora a que o Sol nasce;

δ – declinação solar;

Φ – latitude geográfica (rad).

As equações 4.3 a 4.5 permitem calcular o factor de correcção da posição solar (E_0), a hora a que o Sol nasce (T_{sr}) e a declinação solar (δ).

$$E_0 = 1 + 0.033 \cos \left[\left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right] \quad \text{Equação 4.3}$$

$$T_{sr} = \frac{\cos^{-1}[-\tan \delta \tan \Phi]}{\omega} \quad \text{Equação 4.4}$$

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ 0.4 \sin \left[\frac{2\pi}{365} (d_n - 82) \right] \right\} \quad \text{Equação 4.5}$$

Onde:

d_n – dia do ano (entre 0 e 365)

Caso de Estudo

Para o caso de estudo, aplicou-se este método no cálculo da radiação solar, uma vez que os registos para as estações do INAG apenas começam em 2001 e são necessários dados a partir de Outubro de 1998.

O primeiro passo é o cálculo das equações que correspondem à relação entre a radiação solar extraterrestre e a diferença entre a temperatura mínima e máxima. Esta relação pode ser verificada na Tabela 4.2, sendo que os valores de a, b e c correspondem aos parâmetros das equações quadráticas para o cálculo de KT.

Tabela 4.2 – Relação quadrática entre a diferença de temperatura e a radiação solar extraterrestre para as 5 estações de monitorização do INAG

| Estação i | a | b | c | R ² |
|--------------------------------|---------|--------|--------|----------------|
| ALGOZ (31H/02C) | -0.0015 | 0.0510 | 0.2231 | 0.3495 |
| BARRAGEM DO ARADE (30G/03C) | -0.0018 | 0.0567 | 0.1950 | 0.2559 |
| MONCHIQUE (30F/01C) | -0.0057 | 0.1218 | 0.0368 | 0.5023 |
| SÃO BRÁS DE ALPORTEL (31J/01C) | -0.0042 | 0.1099 | 0.0615 | 0.6318 |
| VIDIGAL (30F/05C) | -0.0024 | 0.0755 | 0.072 | 0.4362 |

$$KT (\text{Estação } i) = aTD^2 \times bTD + c \quad \text{Equação 4.6}$$

Como se pode verificar na última coluna da Tabela 4.2, o R² obtido destas relações é extremamente baixo. No entanto, e com o intuito de verificar o método definido por Samani (2000), concluiu-se a metodologia com vista a comparar os dados de radiação solar calculados por este método com os existentes depois de 2001.

Verificou-se, assim, a adequação dos valores estimados com os valores registados quer ao nível diário, quer ao nível mensal. Como se pode ver na Figura 4.3 (exemplo para a estação de Algoz) a adequação diária é bastante razoável e, ao nível mensal, representa de forma bastante aproximada os dados registados.

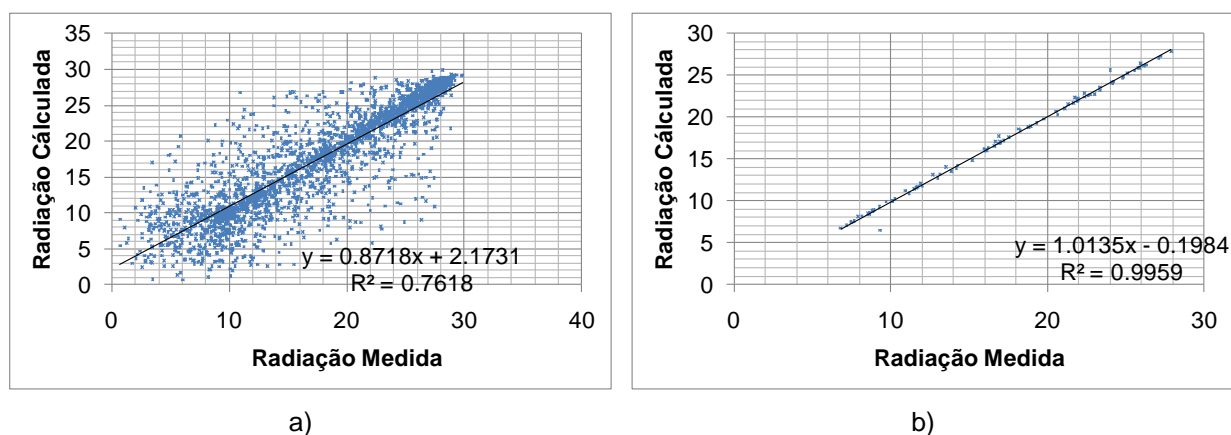


Figura 4.3 – a) Relação entre os valores diários estimados e medidas de radiação solar (em MJ.m⁻².d⁻¹); b) Relação entre os valores mensais estimados e medidos de radiação solar (em MJ.m⁻².ano⁻¹) para a estação de Algoz

Tendo em conta que o cálculo deste parâmetro se deve à necessidade destes dados para o modelo SWAT, e que este modelo usa a radiação solar com o intuito de calcular o crescimento vegetal, pode-se afirmar que esta aproximação se adequa para as metas propostas. Com estes valores podemos assumir que o crescimento vegetal, simulado no SWAT, será semelhante ao verificado na realidade, no que diz respeito à radiação solar.

4.3 MODELOS ANALÍTICOS PARA O CÁLCULO DA RECARGA

Considerando o objectivo desta dissertação, os modelos analíticos, a seguir apresentados, são orientados para o cálculo da recarga no aquífero Querença-Silves. Na equação abaixo podemos ver o balanço hidrológico evidenciando a recarga.

$$R = P - E_s - ETR \pm \Delta S \quad \text{Equação 4.7}$$

Onde:

R – recarga no aquífero;

E_s – escoamento superficial;

ETR – evapotranspiração real;

ΔS – variação do conteúdo de água no solo.

Se os restantes valores podem ser, de certa forma, simples de calcular, tal não se passa com a ETR. A primeira aproximação simples que se pode efectuar é o cálculo de ETP.

Para a estimativa de recarga no aquífero, e tendo por base a equação de balanço hídrico, Penman-Grindley definiu um método que torna possível a transformação de ETP em ETR e logo o cálculo de recarga.

Assim, para a estimativa de recarga no aquífero, utilizaram-se dois métodos distintos que serão descritos sucintamente: o método Penman-Grindley e o método de Kessler. Se o primeiro, e como já foi referido, se baseia na equação de balanço hídrico, o segundo vem de uma relação empírica e é apenas aplicável a aquíferos de características cársicas.

4.3.1 Método de Penman-Grindley

O método de Penman-Grindley é um método de cálculo da recarga baseado na equação 4.7 de balanço hídrico. Tal como já se referiu, o cálculo da ETR não é simples e, como tal, Penman (1948) sugeriu uma metodologia baseada na necessidade de água do solo para a calcular.

Segundo o autor, à medida que a disponibilidade de água no solo diminui e aumenta o défice (défice de água no solo – DAS) torna-se mais difícil a passagem de água do solo para a atmosfera, logo diminui a ETR.

Por seu lado, o DAS é controlado pelo factor que Penman denominou de constante de raiz (RC), que é uma característica da vegetação existente e influencia a facilidade com que o solo poderá, ou não, libertar água.

Quando não existe um défice de água no solo, ou seja, quando DAS é zero, a água que atinge o solo poderá contribuir para a infiltração.

Este método utiliza um passo temporal diário, logo podem retirar-se os valores de recarga diária.

4.3.2 Método de Kessler

O método de Kessler foi desenvolvido como modo de otimizar o cálculo da recarga em sistemas aquíferos carbonatados, onde a quantidade de água no solo assume um papel menos relevante para a recarga. Este método utiliza valores de precipitação mensal e pressupõe a utilização de anos civis.

A aplicação deste método consiste no cálculo da percentagem de chuva caída nos primeiros 4 meses do ano (Janeiro a Abril), relativamente ao total de pluviosidade anual (razão da precipitação determinativa – RPD). Esta percentagem será corrigida por uma constante, k, que varia consoante o valor de μ , calculado a partir da seguinte equação:

$$\mu = \frac{P_{Set-Dez} - \bar{P}_{Set-Dez}}{\bar{P}_{Set-Dez}} \quad \text{Equação 4.8}$$

Onde:

$P_{Set-Dez}$ – precipitação acumulada dos últimos 4 meses do ano anterior ao ano em análise;

$\bar{P}_{Set-Dez}$ – média da precipitação acumulada dos últimos 4 meses do ano, para um período de tempo significativo.

Recorrendo à tabela seguinte podemos relacionar os valores de μ , da equação 4.8, com os valores do factor de correcção k.

Tabela 4.3 - Valores do factor de correcção k para vários valores de μ

| μ | k |
|-------|----|
| 0-5 | 0 |
| 6-15 | 1 |
| 16-25 | 2 |
| 26-35 | 3 |
| 36-45 | 4 |
| 46-55 | 5 |
| 56-60 | 7 |
| 61-65 | 10 |
| 66-70 | 13 |
| >70 | 15 |

O valor de k deverá ser adicionado, ou subtraído, à razão entre a precipitação caída nos primeiros quatro meses do ano e a precipitação total do respectivo ano, consoante a diferença $P_{Set-Dez} - \bar{P}_{Set-Dez}$. seja positiva ou negativa.

Após esta correção ao valor de RPD, retira-se o valor da recarga recorrendo à seguinte curva.

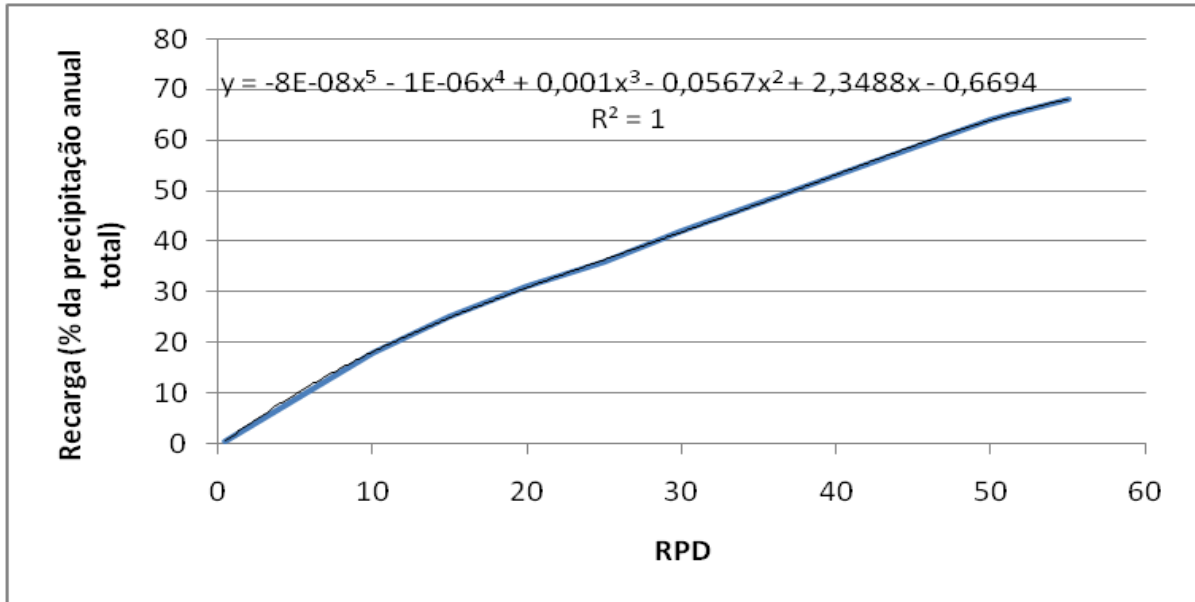


Figura 4.4 - Relação entre a recarga anual e o valor da RPD

4.4 MODELOS ANALÍTICOS PARA O CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Para o cálculo da ETP propõe-se neste estudo a utilização de três métodos distintos: método de Hargreaves, método de Thornthwait e o método de Turc.

4.4.1 Método de Hargreaves

Para o cálculo da evapotranspiração potencial, Hargreaves propõe a seguinte equação:

$$\lambda ETP = 0.0023(T_m + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_s \quad \text{Equação 4.9}$$

$$\lambda = 2.501 - 2.361 \times 10^{-3} \times T_m \quad \text{Equação 4.10}$$

Onde:

ETP – evapotranspiração potencial (mm.dia⁻¹);

T_m – temperatura média diária (°C);

T_{max} – temperatura máxima diária (°C);

T_{min} – temperatura mínima diária (°C);

R_s – radiação solar (MJ.m⁻².dia⁻¹);

Λ – calor latente de vaporização (MJ.kg⁻¹).

Ao longo dos anos, a aplicação desta equação tem demonstrado que a mesma se ajusta bem em períodos superiores a 10 dias. No entanto, tem-se verificado que os resultados são ligeiramente sobrestimados em regiões húmidas e subestimados em regiões áridas. Deste modo, depreende-se

que a equação de Hargreaves necessita de uma calibração local para uma melhor aplicabilidade (Ribeiro L. , 2009).

4.4.2 Método de Thornthwaite

Thornthwaite propôs, em 1948, um método alternativo para o cálculo da ETP, através de uma relação empírica baseada na temperatura média do ar. A fórmula que permite o cálculo da ETP encontra-se na equação seguinte.

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad \text{Equação 4.11}$$

Onde:

ETP – evapotranspiração potencial (mm.mês⁻¹);

T – temperatura média diária do mês (°C);

I – índice que expressa o nível de calor da região;

a – índice térmico regional.

O valor de I depende da variabilidade anual da temperatura e é calculado através da equação 4.12.

$$I = \sum_{j=1}^{12} (0.2T_j)^{1.514} \quad \text{Equação 4.12}$$

O a é um índice térmico regional, que varia com o valor de I, e que pode ser calculado com a equação 4.13.

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.7912 \times 10^{-2} I + 0.49239 \quad \text{Equação 4.13}$$

4.4.3 Método de Turc

Turc propôs, em 1961, um diferente método de cálculo para a ETP. Este método baseia-se na radiação solar e na temperatura média diária e aplica-se segundo a seguinte equação:

$$ETP = 0.013(23.88Rs + 50)T(T + 15)^{-1} \quad \text{Equação 4.14}$$

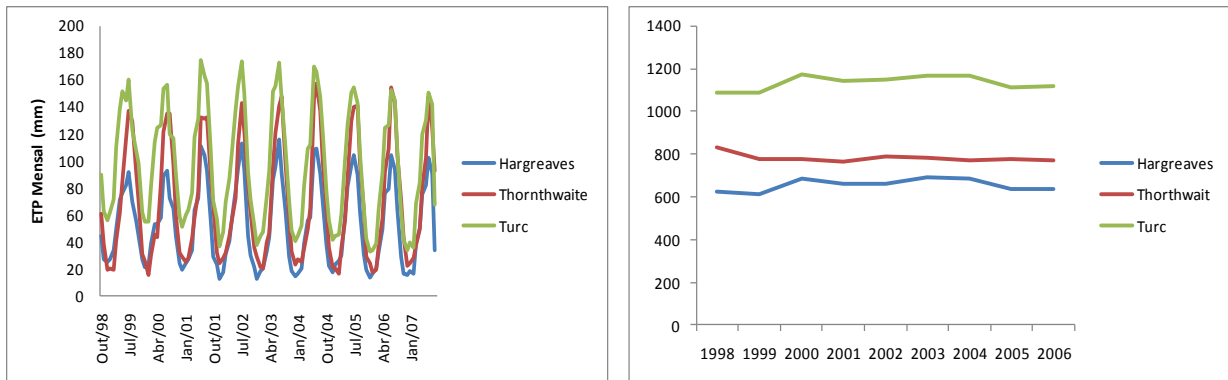
Onde:

ETP – evapotranspiração potencial;

T – temperatura média diária (°C)

Rs – radiação solar (Mj.m⁻².dia⁻¹)

Na Figura 4.5 pode-se observar a comparação entre os três métodos utilizados para o cálculo da evapotranspiração potencial. Como é visível, o método de Turc é aquele que resulta em valores mais elevados de ETP, por oposição, o método de Hargreaves é o que resulta para valores mais baixos.



a) b)

Figura 4.5 – Comparação entre os três métodos usados para o cálculo da evapotranspiração potencial no Algarve para a estação de Algoz; a) Evapotranspiração potencial mensal; b) Evapotranspiração potencial anual

4.5 O MODELO SWAT

O modelo SWAT – *Soil and Water Assessment Tool* (Ferramenta de Análise do Solo e Água) (Neitsch, 2005) tem sido desenvolvido e melhorado nos últimos 20 anos, pelo Departamento de Investigação em Agricultura (Agricultural Research Service) dos Estados Unidos da América.

O SWAT foi criado no início dos anos 90 através da fusão de dois modelos já existentes e desenvolvidos pelo mesmo departamento. Desde essa altura que tem sido alvo de sucessivas revisões e melhoramentos, sendo o SWAT2009 a 8ª versão deste modelo. Tem, actualmente, interfaces que permitem o seu uso em *softwares* do ambiente *Windows*, tais como *GRASS* e *ArcView*.

Este modelo foi construído para ser uma ferramenta para a análise do impacto das acções humanas nos processos hidrológicos e químicos, que ocorrem nas bacias hidrográficas. O SWAT incorpora oito componentes principais: hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento da flora, nutrientes, pesticidas e gestão de uso de solo agrícola.

A escolha da aplicação deste modelo prende-se sobretudo com a sua capacidade de:

- Prever os impactes de alterações climáticas e das acções humanas no crescimento da vegetação, balanço hidrológico, erosão do solo...;
- Simular grandes grupos de bacias e sub-bacias hidrográficas, com padrões de cultivo complexos e diferentes tipos de solo, com elevada descrição espacial;
- Fornecer resultados contínuos para períodos de tempo longos (anos ou décadas) permitindo a análise de padrões anuais e sazonais.

Esta ferramenta tem sido aplicada inúmeras vezes e em diferentes regiões, mostrando, quer a sua versatilidade, quer, pelos resultados obtidos, a sua aplicabilidade e coerência de resultados. Em Arnold e Allen (1996) este modelo foi aplicado a três Bacias do Illinois (Estados Unidos da América), com áreas até 246km², tendo validado, com sucesso, o escoamento e a evapotranspiração. No projecto HUMUS (Hydrologic Unit Model of the U.S.) o escoamento foi validado para o Norte do continente Americano.

Os maus resultados, que se podem obter na aplicação do modelo SWAT, estão normalmente associados à inadequada representação espacial da precipitação, devido ao insuficiente número de udómetros disponíveis, ou a sua desajustada distribuição na área analisada. Outros factores foram apontados por Bosh et al. (2004), que se referiu aos problemas de calibração do modelo, e por Muleta e Nicklow (2005), que referem problemas na calibração para períodos de análise muito curtos.

Descrição do Modelo

O SWAT é um modelo determinístico, com distribuição espacial e contínuo, ou seja, é baseado em equações hidrológicas e, recorrendo aos dados introduzidos, fornece estimativas distribuídas

especialmente pela área de estudo, para uma determinada sub-bacia, fazendo simulações contínuas (Neitsch S. L., et al., 2005).

Apesar de o modelo ter sido concebido para ser aplicado a uma bacia completa, permite a criação de sub-bacias, com vista ao refinamento dos parâmetros e da resolução espacial. Estas sub-bacias são, por sua vez, ligadas numa estrutura em cascata ao longo das linhas de água. Esta estrutura em cascata, faz com que a sub-bacia a montante desagúe na sub-bacia imediatamente a jusante desta e assim sucessivamente. O SWAT considera um único curso de água por sub-bacia e que cada uma tem características climáticas e fisiográficas idênticas.

As sub-bacias são, por sua vez, divididas em unidades de resposta hidrológica (HRU – *hydrological response units*). As HRU são definidas dentro das sub-bacias como uma área com um único tipo de solo, uso de solo e prática agrícola. Estas HRU são homogêneas no que respeita ao crescimento vegetal, escoamento e erosão do solo.

O balanço hidrológico é, assim, calculado de forma independente para cada HRU e os resultados das HRU são somados para calcular os valores totais da sub-bacia. Cada HRU é caracterizada por duas fronteiras, uma superior correspondente à superfície do solo, e outra inferior correspondente ao aquífero profundo. A fronteira superior recebe água directamente da precipitação, sendo que, parte desta se converte em escoamento superficial, uma parte infiltra-se e uma outra parte se evapora. A água que se infiltra no solo está sujeita a diversos factores, podendo ser evapotranspirada, percolada para o aquífero mais profundo ou transportada lateralmente ao longo do perfil do solo.

A base do modelo SWAT assenta no cálculo diário do balanço hidrológico para cada sub-bacia. O balanço de massa efectuado pelo modelo é o seguinte:

$$SW_t = SW_0 + (P - Q_{sup} - ET - I_d - Q_{sub}) \quad \text{Equação 4.15}$$

Onde:

SW_t – conteúdo de água no solo no final do passo temporal t (mm)

t – tempo de simulação (dias)

SW_0 – conteúdo de água no solo no início do passo temporal t (mm)

P – precipitação acumulada durante o passo temporal t (mm)

Q_{sup} – escoamento superficial acumulado durante o passo temporal t (mm)

ET – evapotranspiração acumulada durante o passo temporal t (mm)

I_d – infiltração para o aquífero profundo durante o passo temporal t (mm)

Q_{sub} – escoamento sub-superficial total durante o passo temporal t (mm)

Nesta equação a precipitação e o clima (que controla a ET) são os factores chave, sendo ambos definidos pelo utilizador e os restantes parâmetros calculados pelo modelo. Daqui se percebe, facilmente, que uma boa discretização espacial e temporal da precipitação, ao longo da área de estudo, é fundamental para que os resultados espelhem o que se passa na realidade.

O escoamento superficial é calculado como o excesso de água, baseado no número de curva desenvolvido pelos serviços de conservação do solo (SCS, 1972). O caudal de ponta é calculado utilizando o método racional (Lencastre e Franco, 1992). A evapotranspiração inclui, não só a evaporação do solo pelas superfícies expostas ao ar, como a transpiração das plantas e a evapotranspiração potencial calculada segundo os métodos de Thornthwaite (1948) e Penman & Monteith (Monteith (1965), Priestley & Taylor (1972) ou Hargreaves et al. (1985)). O escoamento sub-superficial é simulado usando um modelo de escoamento de água no solo, desenvolvido por Sloan & Moore (1984).

Para compreender melhor o funcionamento do programa, apresenta-se na figura abaixo um esquema conceptual do modelo SWAT.

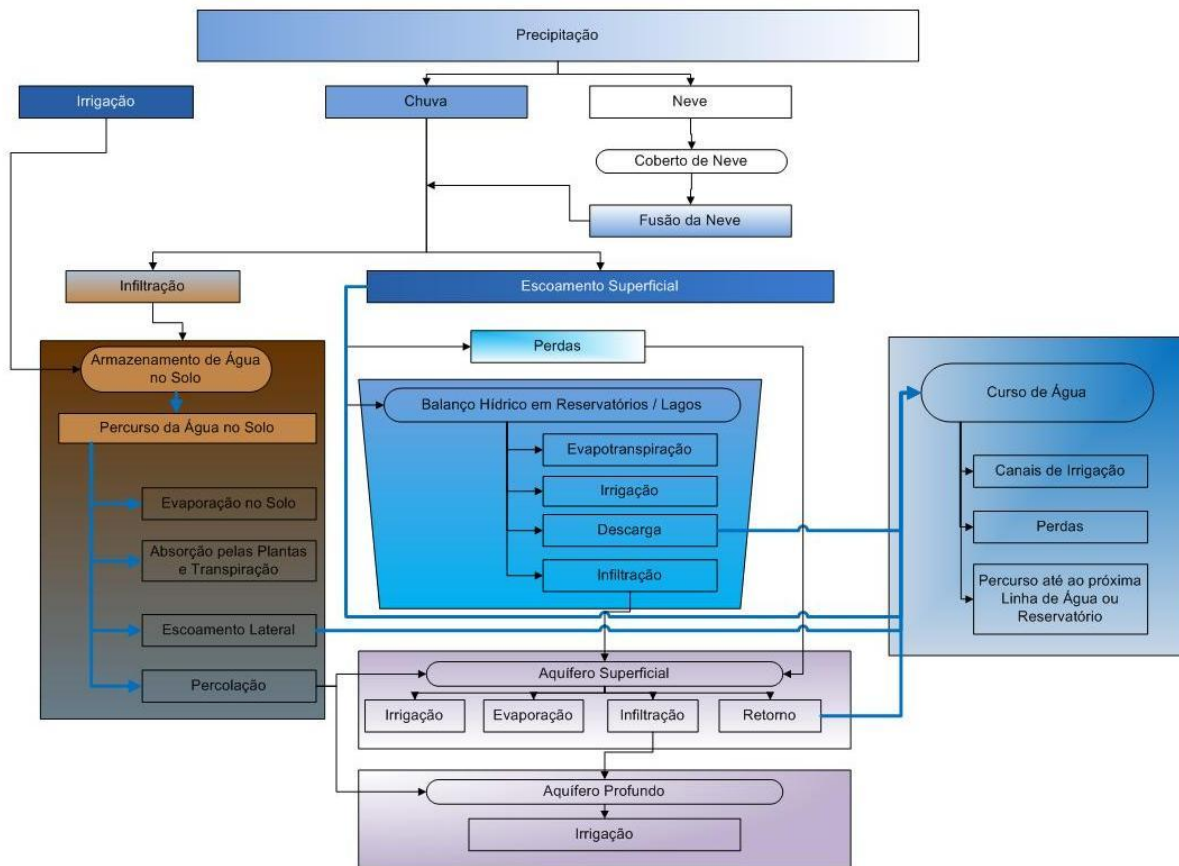


Figura 4.6 – Esquema conceptual do modelo SWAT (adaptado de Neitsch, et al., 2005)

Para ser possível calcular todos estes fenómenos hidrológicos e, mais concretamente, as equações que estão por trás destes fenómenos e que os regem, é necessário fornecer, ao modelo, dados que lhe permitam efectuar os cálculos. Para correr o modelo SWAT é indispensável o seguinte conjunto de dados:

- Modelo Digital do Terreno (MDT /DEM – *Digital Elevation Model*), usado para delinear as linhas de água e as bacias;
- cartografia, que descreve o uso do solo e tipo de solo, usado para definir as HRU;
- parâmetros para cada tipo de solo, usados para calcular o escoamento superficial e sub-superficial;
- parâmetros biofísicos para a vegetação associados a cada uso do solo, usados pelo modelo de crescimento vegetal;
- informação referente às práticas agrícolas associadas a cada tipo de uso de solo, usadas pelo modelo de crescimento vegetal;
- dados meteorológicos diários (precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, humidade relativa e velocidade do vento), usadas para calcular o balanço hidrológico e o crescimento da vegetação.

Em alternativa à introdução de dados meteorológicos diários, o SWAT pode gerar dados de clima com base em normais climáticas, recorrendo a métodos estocásticos.

No final da simulação o modelo SWAT fornece dados diários para:

- balanço hidrológico:
 - evapotranspiração;
 - recarga do aquífero;
 - escoamento superficial e sub-superficial.
- erosão do solo;
- produção de biomassa vegetal.

5 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Após a exposição, na secção 0, dos métodos utilizados apresentam-se, agora, os resultados alcançados. Mostram-se, primeiro, os dados climáticos obtidos, seguidos da calibração do Modelo SWAT. Depois, apresentam-se os valores calculados para a evapotranspiração potencial e recarga, através da aplicação dos métodos analíticos, e os resultados alcançados no modelo SWAT. Por fim, comparam-se os resultados referentes à recarga entre os vários métodos analíticos e o modelo SWAT (método numérico).

5.1 SÉRIES TEMPORAIS DE DADOS OBTIDOS

Pelos motivos já apresentados na secção 3.7, foi necessário completar os dados em falta para que fosse possível efectuar a modelação hidrológica proposta neste trabalho. Como tal, mostra-se, em seguida, os resultados obtidos a partir desta metodologia.

Devido ao grande volume de dados, apenas se apresentam, aqui, os resultados para a estação climatológica de Algoz, ficando os restantes dados disponíveis em Anexo.

5.1.1 Temperatura

Os dados obtidos para este parâmetro permitiram validar as referências existentes. Assim, as temperaturas máximas variam entre 15 e 30°C, ao longo dos meses do ano, e as temperaturas mínimas oscilam entre 7 e 15°C. As temperaturas máximas médias anuais situam-se entre 21 e 23°C e as mínimas entre 11 e 13°C. Estes valores estão de acordo com os valores referidos na caracterização climática da zona em estudo.

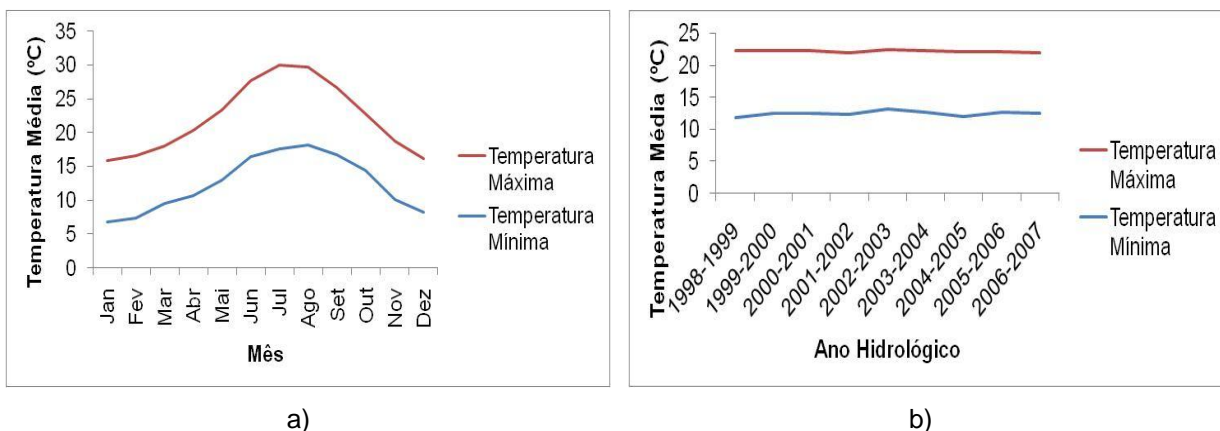


Figura 5.1 - a) Média mensal das temperaturas máxima e mínima na estação de Algoz (1998 a 2007); b) Média anual das temperaturas máxima e mínima

Ao nível anual não se observam variações significativas nos anos analisados.

No Anexo I encontra-se a informação relativa às restantes estações climáticas analisadas.

5.1.2 Humidade

Pela análise dos dados obtidos, verifica-se uma variação sazonal na humidade relativa. Os valores médios de humidade relativa variam entre os 82% no mês de Dezembro e os 59% no mês de Julho, tal como se observa na figura seguinte.

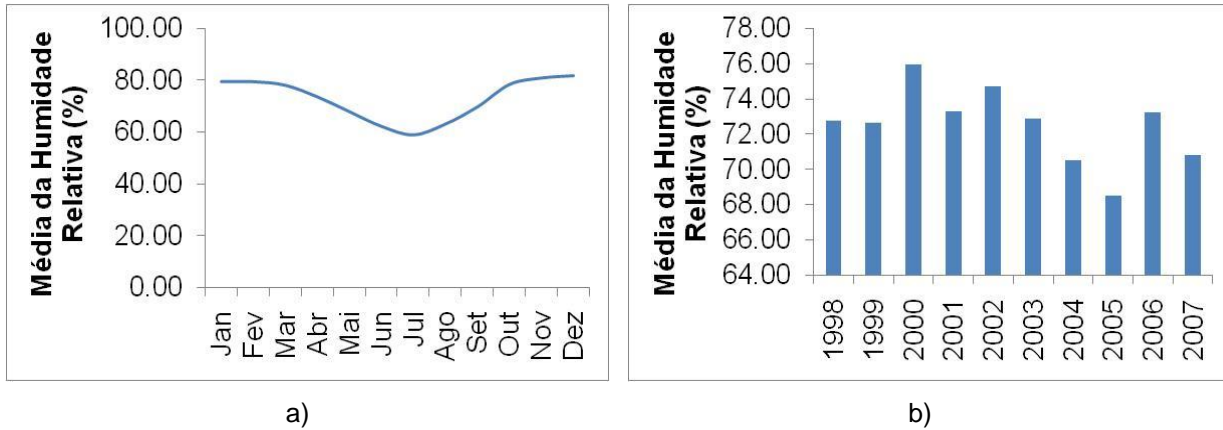


Figura 5.2 - a) Média mensal da humidade relativa na estação de Algoz (1998 a 2007); b) Média anual humidade relativa

Ao longo do período em análise não é possível identificar qualquer padrão existente na humidade relativa. No entanto, é possível verificar uma oscilação entre os diferentes anos analisados. É ainda de notar, que os valores mais baixos se verificam nos anos 2004 e 2005, coincidentes com a seca registada em Portugal neste período e já referida anteriormente.

Na Figura 5.3 podemos observar que a dispersão observada, na humidade relativa, é mais significativa ao nível intra-anual do que ao nível inter-anual.

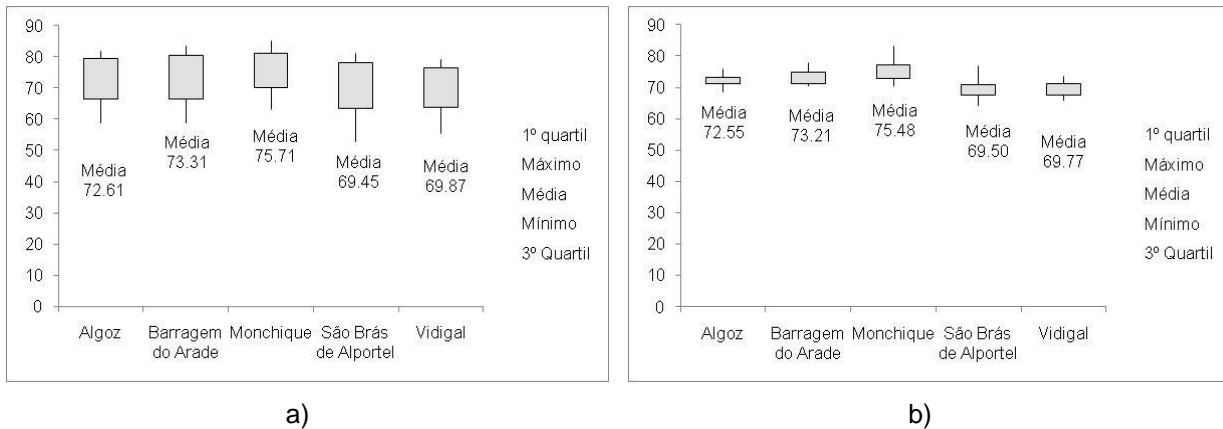


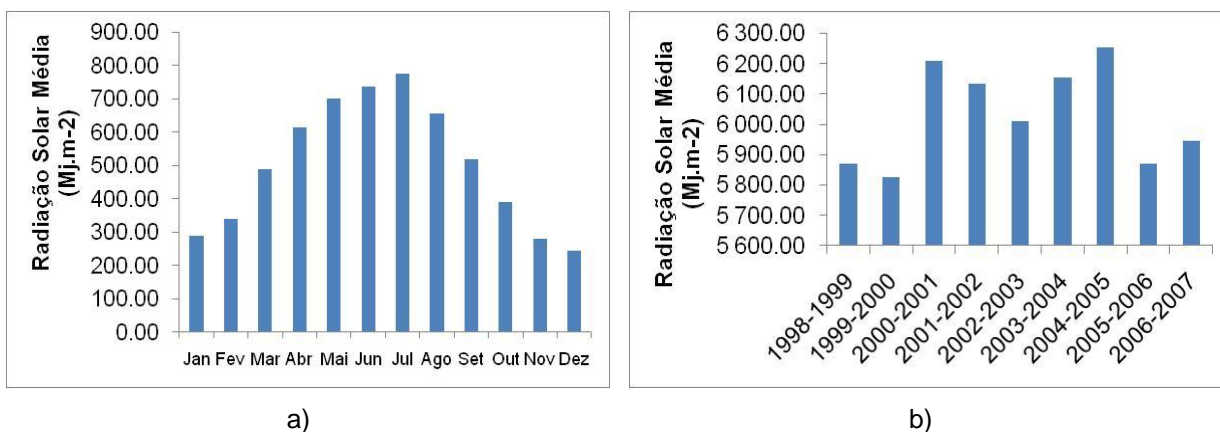
Figura 5.3 - Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil) a) ao nível mensal; b) ao nível anual

No Anexo II encontra-se a informação relativa às restantes estações climáticas analisadas.

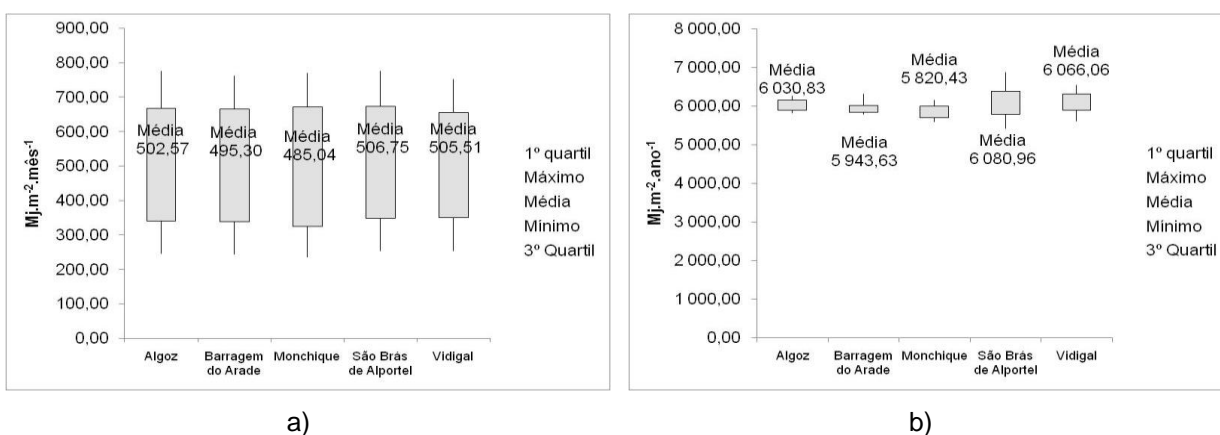
5.1.3 Radiação Solar

A análise da radiação solar permite verificar que os valores mais altos se registam nos meses de Verão, em especial no mês de Julho. Em concordância com o que se observa nos dados de humidade relativa, os valores mais elevados de radiação solar registam-se no ano hidrológico de 2004-2005 que, tal como já foi referido, foi um ano de seca em Portugal.

Na figura abaixo apresentam-se os resultados para a estação de Algoz.



Na Figura 5.5 podemos observar que a amplitude de valores registados, ao longo do ano, é semelhante em todas as estações estudadas. Podemos ainda verificar que, ao longo do período observado, a dispersão é pouco significativa.



No Anexo III encontra-se a informação relativa às restantes estações climáticas analisadas.

5.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT

A calibração dos modelos é uma fase crucial no processo de modelação e que se torna necessária para garantir uma modelação representativa da realidade.

Optou por se calibrar o modelo ao nível do caudal anual e com base em 3 estações hidrométricas, localizadas na zona Este da área de estudo. A escolha das três estações recai sobre a necessidade de calibrar o modelo de modo a que este representasse a recarga no aquífero. Assim, escolheram-se as estações Ponta da Ribeira do Rio Seco e Querença, por se encontrarem no mesmo curso de água, a montante e a jusante, respectivamente, do aquífero Querença-Silves, e a estação Quinta Passagem, pois, hidrologicamente, apresenta características da zona a Sul do aquífero Querença-Silves. Esta escolha permite ainda a calibração do modelo no que respeita à infiltração no leito dos rios, e que representa um contributo importante à recarga no aquífero de Querença-Silves. Na Figura 5.6 podemos verificar as respectivas posições em relação ao aquífero, bem como a sua localização na bacia em estudo.

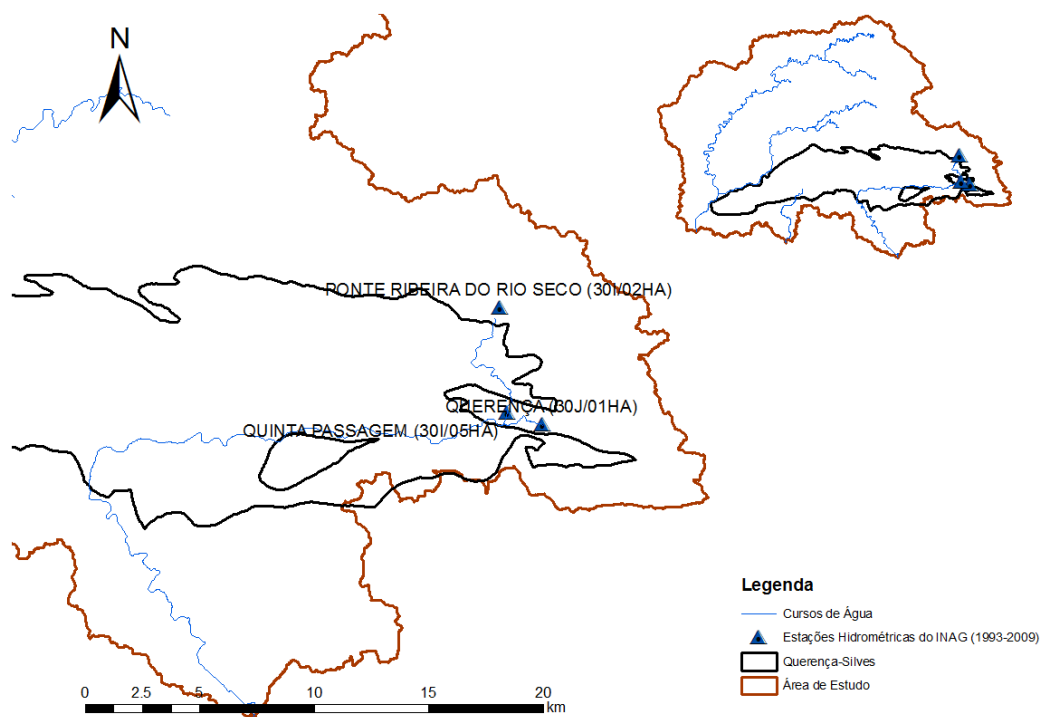


Figura 5.6 - Estações hidrométricas utilizadas para a calibração do modelo

5.2.1 Parâmetros Utilizados para Calibração

De modo a poderem-se calibrar os caudais obtidos no modelo, comparando com os valores reais, definiu-se um conjunto de parâmetros a alterar. Uma vez que o intuito deste estudo consiste no cálculo da recarga no aquífero Querença-Silves, os parâmetros que se fazem variar representam, essencialmente, as interligações água superficial/água subterrânea.

Nas tabelas seguintes apresentam-se os valores finais dos parâmetros utilizados na calibração, divididos consoante as relações que estão em causa no modelo.

O parâmetro Alpha_BF representa a velocidade a que o caudal de base decai. Assim, na presença de uma formação aquífera, espera-se que esta contribua de forma mais gradual no tempo para o caudal, e como tal o parâmetro Alpha_BF diminui.

CH_K representa a Condutividade Hidráulica no curso de água principal (mm.h^{-1}). Este parâmetro não é constante em todo o aquífero, e os valores de referência variam entre cerca de 2000 mm.h^{-1} (Lopes, et al., 2005) e cerca de 3600 mm.h^{-1} (INAG, 2005b).

Através do parâmetro GWQMN assume-se que o nível piezométrico é mais fundo na zona do aquífero. Este parâmetro implicará que na zona do aquífero, será necessário uma maior infiltração para que o aquífero contribua com caudal para os cursos de água. Por outro lado, nas restantes zonas será necessária menos água para que o solo contribua com água para o escoamento superficial.

O parâmetro GW_REVAP representa a comunicação entre o aquífero e o solo que se encontra imediatamente acima deste. Na zona do aquífero, como definimos que o nível piezométrico é mais baixo, menos água do aquífero entrará em contacto com o solo, e logo menor evapotranspiração no que diz respeito à água que se encontra no aquífero. Na zona a Sul, apesar de um valor de GWQMN igual, que as formações presentes não contribuem de forma tão significativa com as presentes a Norte do aquífero.

RCHGR_DP indica a quantidade de água que, após se infiltrar no solo, chega ao aquífero profundo. Uma vez que o aquífero Querença-Silves é um aquífero cársico, considerou-se que praticamente a totalidade da água que se infiltra no solo dá origem a recarga do aquífero profundo. Por outro lado, nas restantes zonas da área de estudo, consideraram-se valores inferiores.

Tabela 5.1 - Parâmetros que representam a relação água superficial/aquífero

| Parâmetro | Definição | Região | Valor Utilizado |
|-----------|---|----------------------|-----------------|
| ALPHA_BF | índice representativo da resposta de caudal em mudanças na recarga | Montante do Aquífero | 0.975 |
| | | Aquífero | 0.85 |
| | | Jusante do Aquífero | 0.925 |
| CH_K | Condutividade Hidráulica no curso de água principal (mm.h ⁻¹) | Montante do Aquífero | 200 |
| | | Aquífero | 2500 |
| | | Jusante do Aquífero | 50 |
| GWQMN | Altura de água necessária no aquífero superficial para o escoamento regressar à superfície (mm) | Montante do Aquífero | 200 |
| | | Aquífero | 500 |
| | | Jusante do Aquífero | 200 |

Tabela 5.2 - Parâmetros que representam a relação aquífero superficial/zona não saturada

| Parâmetro | Definição | Região | Valor Utilizado |
|-----------|--|----------------------|-----------------|
| GW_REVAP | Coeficiente representando a água que transita do aquífero superficial para a zona não saturada | Montante do Aquífero | 0.2 |
| | | Aquífero | 0.02 |
| | | Jusante do Aquífero | 0.02 |

Tabela 5.3 - Parâmetros que representam a relação aquífero superficial/aquífero profundo

| Parâmetro | Definição | Região | Valor Utilizado |
|-----------|---|----------------------|-----------------|
| RCHGR_DP | Fracção de água que se torna recarga no aquífero profundo | Montante do Aquífero | 0.60 |
| | | Aquífero | 0.90 |
| | | Jusante do Aquífero | 0.5 |

5.2.2 Resultados da Calibração do Modelo SWAT

Após a aplicação dos valores acima descritos, avaliou-se a adequação destes à área de estudo. Para tal, procedeu-se à análise qualitativa e quantitativa dos dados obtidos em função dos dados observados.

De modo a verificar quantitativamente a adequação da calibração efectuada recorreu-se a um número significativo de parâmetros estatísticos, que permitissem avaliar a adequação verificada. Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores obtidos para cada um dos métodos, bem como as definições de cada método e os valores significativos.

Considera-se valores obtidos adequam-se de forma bastante positiva aos valores observados para o caudal.

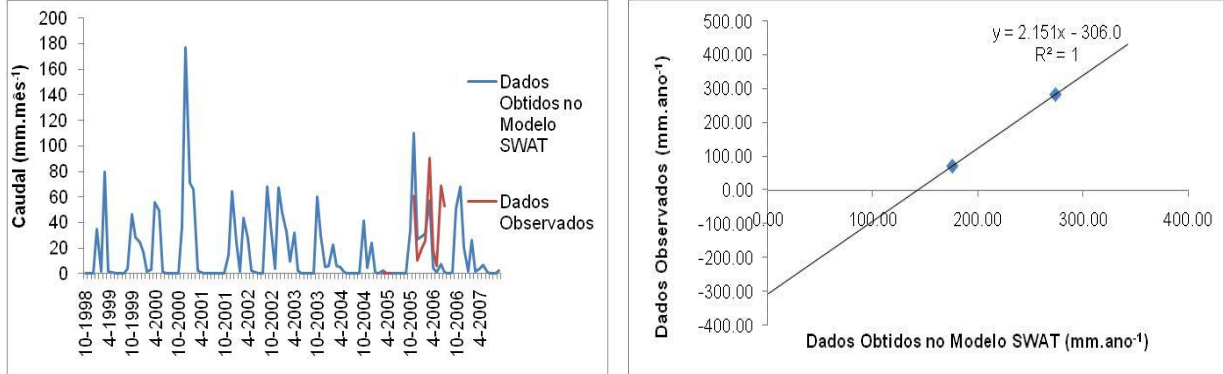
Tabela 5.4 - Parâmetros quantitativos de adequação dos resultados para as 3 estações

| Parâmetro | Definição | Ponte de Ribeira do Rio Seco | Quinta Passagem | Querença |
|-----------------------|---|------------------------------|-----------------|----------|
| R² | - | - ⁴ | 0.31 | 0.81 |
| Bias | Média da diferença entre os valores obtidos e reais (mm.ano ⁻¹) | 47.3 | 32.3 | 0.66 |
| Média | mm.ano ⁻¹ | 177.4 | 111.2 | 27.3 |
| RMSE | Raiz quadrada da soma ao quadrado da diferença entre valores obtidos e lidos a dividir pelo número de dados | 73.5 | 95.0 | 28.9 |
| Desvio Padrão | mm.ano ⁻¹ | 148.5 | 110.0 | 37.4 |
| Nash-Sutcliffe | Coefficiente de eficiência de modelos | 0.71 | 0.27 | 40.6 |

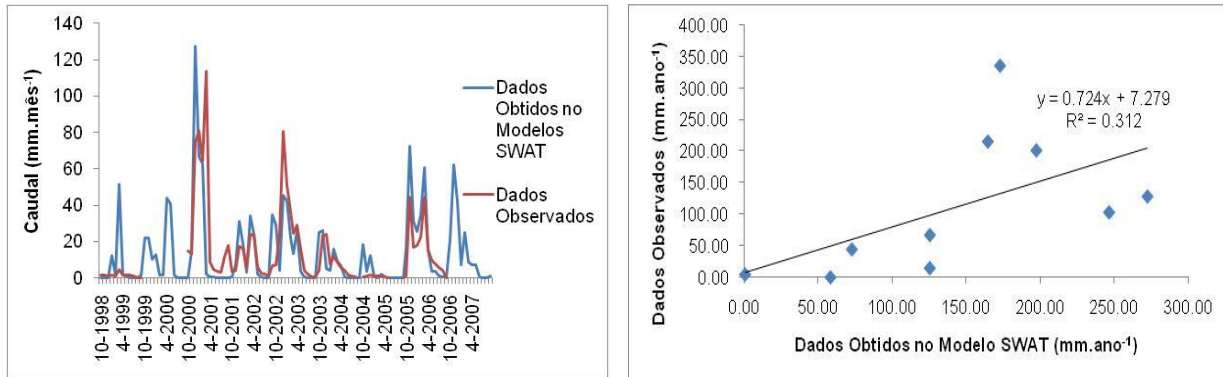
Como se verifica pelos dados acima, o SWAT simula de forma adequada a média anual das 3 estações analisadas. O modelo consegue ainda simular a variabilidade inter-anual do caudal em todas as estações (com excepção da estação do Rio Seco, onde os dados apesar de promissores, não permitem ainda qualquer tipo de conclusão).

⁴ Apenas dois valores, pelo que o R² não tem significado

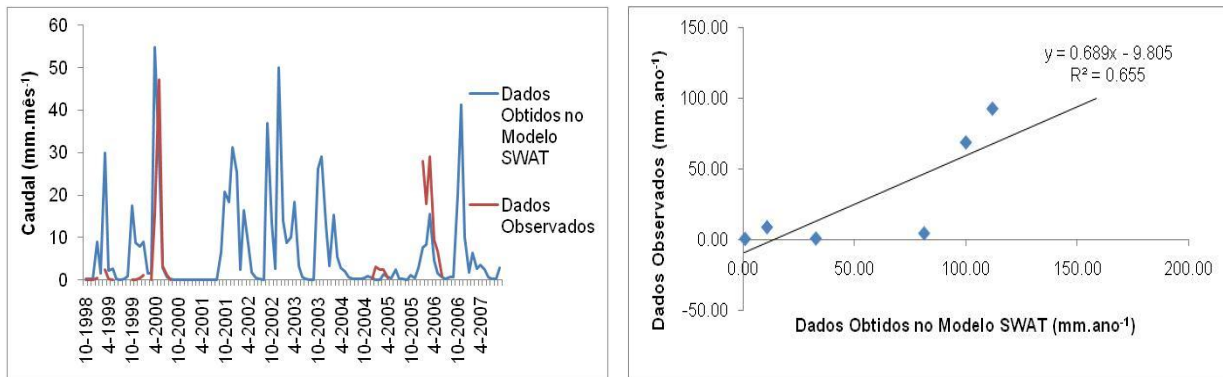
Na Figura 5.7 pode ver-se a relação entre os valores observados e os valores obtidos no modelo SWAT.



a)



b)



c)

Figura 5.7 - Comparação dos valores obtidos no modelo SWAT com os dados observados. a) Estação de Ponte da Ribeira do Rio Seco; b) Estação da Quinta Passagem; c) Estação de Querença.

Verificou-se, ainda, a correspondência da totalidade dos dados (*vide* Figura 5.8), agregando as estações em que se efectuou a calibração. Na Tabela 5.5 pode ver-se a adequação de todos os dados.

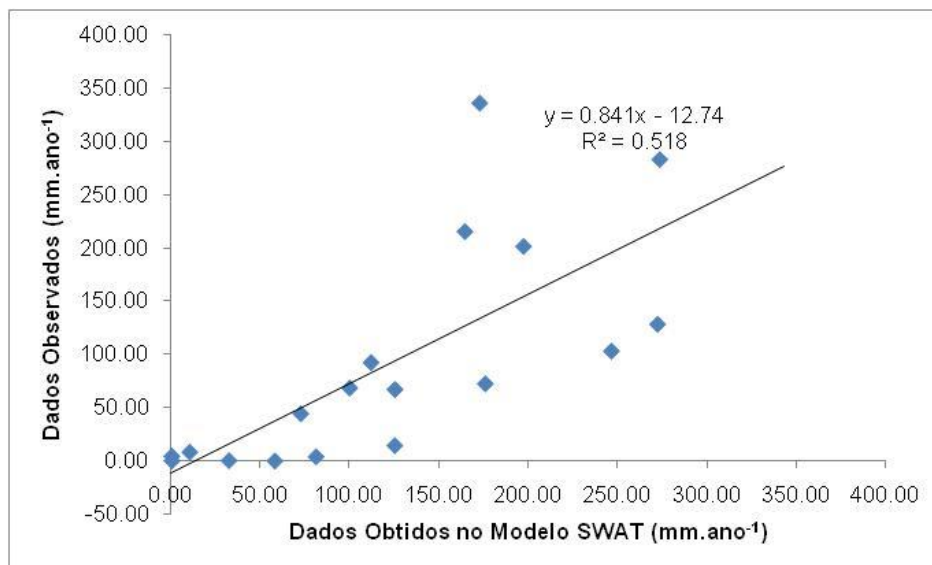


Figura 5.8 - Adequação da totalidade dos dados (observados vs. simulados)

Usando os parâmetros que se definiram anteriormente, também para a totalidade dos dados, foi possível verificar uma boa adequação.

Tabela 5.5 - Parâmetros quantitativos de adequação dos resultados para a totalidade dos gráficos

| Parâmetro | Definição | Totalidade dos Dados |
|----------------|---|----------------------|
| R^2 | - | 0.52 |
| Bias | Média da diferença entre os valores obtidos e reais (mm.ano^{-1}) | 32.3 |
| Média | mm.ano^{-1} | 91.1 |
| RMSE | Raiz quadrada da soma ao quadrado da diferença entre valores obtidos e lidos a dividir pelo número de dados | 78.0 |
| Desvio Padrão | mm.ano^{-1} | 103.3 |
| Nash-Sutcliffe | Coeficiente de eficiência de modelos | 0.50 |

Os resultados obtidos denotam uma sistemática sobrevalorização da estimativa de caudal por parte do modelo como tal, fica, ainda, algum trabalho por realizar, com vista a uma melhor otimização do modelo. No entanto, os resultados obtidos permitem depositar confiança nos restantes dados que serão analisados.

5.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

Após a obtenção das séries climáticas necessárias, torna-se possível calcular a evapotranspiração potencial para a zona em estudo. Tal como já referido, utilizam-se três métodos distintos. Apresentam-se, em seguida, os resultados e discutem-se os valores obtidos.

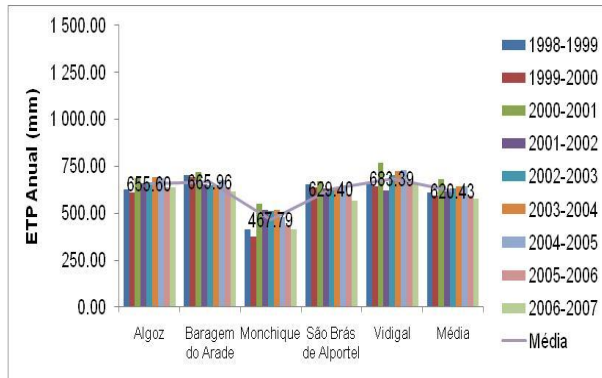
5.3.1 Método de Hargreaves

Este método manifestou os valores mais baixos de ETP, para a área de estudo. No entanto, este foi, também, o método onde se notou uma maior diferença entre as estações, em especial entre a estação de interior montanhoso (Monchique) e as estações localizadas em zonas mais planas, junto à costa.

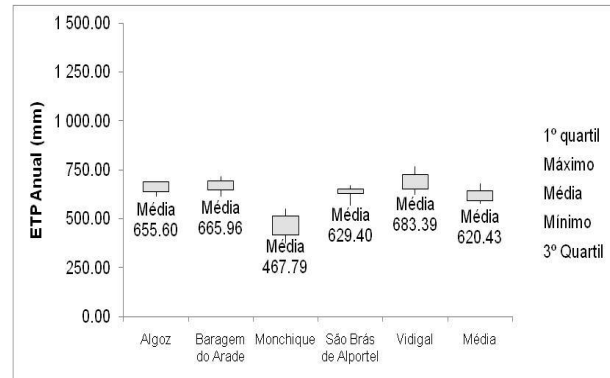
Na Tabela 5.6 podem observar-se os valores obtidos para as 5 estações, aplicando o método de Hargreaves. Na Figura 5.9 analisam-se os resultados para as diferentes estações e representam-se os valores máximo, mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil e média.

Tabela 5.6 – ETP (mm) calculada pelo método de Hargreaves

| Ano Hidrológico | Algoz | Barragem do Arade | Monchique | São Brás de Alportel | Vidigal |
|-----------------|--------|-------------------|-----------|----------------------|---------|
| 1998-1999 | 624.48 | 702.39 | 414.92 | 652.96 | 656.46 |
| 1999-2000 | 612.62 | 692.76 | 373.44 | 635.23 | 642.69 |
| 2000-2001 | 687.08 | 716.91 | 549.64 | 671.00 | 767.47 |
| 2001-2002 | 660.96 | 654.18 | 519.45 | 633.23 | 622.21 |
| 2002-2003 | 663.67 | 647.52 | 509.67 | 628.61 | 701.05 |
| 2003-2004 | 689.61 | 647.52 | 514.83 | 627.54 | 723.45 |
| 2004-2005 | 687.73 | 678.22 | 478.40 | 649.44 | 731.26 |
| 2005-2006 | 637.58 | 637.50 | 434.38 | 597.40 | 654.70 |
| 2006-2007 | 636.68 | 616.61 | 415.36 | 569.16 | 651.23 |



a)



b)

Figura 5.9 – ETP (mm) calculada pelo método de Hargreaves a) Valores calculados para os anos em análise e média; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil)

Em suma, este método apresenta uma ETP média para a área de estudo de 620.43mm, o que, comparando com a literatura para a zona em estudo, é ligeiramente baixo. Pode, ainda, ver-se na Figura 5.9 b), que este método apresenta uma dispersão significativa de resultados ao longo dos anos.

5.3.2 Método de Thornthwaite

O método de Thornthwaite apresenta os valores intermédios entre os três métodos utilizados. Tal como o método de Hargreaves, também apresenta uma diferença entre a estação de Monchique e as restantes, no entanto, não apresenta uma variação tão significativa.

Na Tabela 5.7 podem ver-se os valores obtidos para as 5 estações aplicando o método de Thornthwaite. Na Figura 5.10 estão comparados os valores para as diferentes estações e apresentam-se os valores máximo, mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil e média.

Tabela 5.7 – ETP (mm) calculada pelo método de Thornthwaite

| Ano Hidrológico | Algoz | Barragem do Arade | Monchique | São Brás de Alportel | Vidigal |
|-----------------|--------|-------------------|-----------|----------------------|---------|
| 1998-1999 | 834.59 | 879.45 | 724.52 | 821.35 | 834.28 |
| 1999-2000 | 773.99 | 893.79 | 732.02 | 834.19 | 846.05 |
| 2000-2001 | 776.08 | 861.05 | 753.44 | 836.17 | 834.20 |
| 2001-2002 | 763.64 | 832.80 | 741.40 | 812.70 | 814.11 |
| 2002-2003 | 789.36 | 882.86 | 776.31 | 856.25 | 862.42 |
| 2003-2004 | 781.39 | 887.64 | 774.19 | 853.29 | 875.00 |
| 2004-2005 | 769.71 | 871.38 | 705.66 | 844.73 | 851.89 |
| 2005-2006 | 779.66 | 883.32 | 700.25 | 852.61 | 864.04 |
| 2006-2007 | 769.98 | 851.39 | 678.43 | 822.23 | 835.78 |

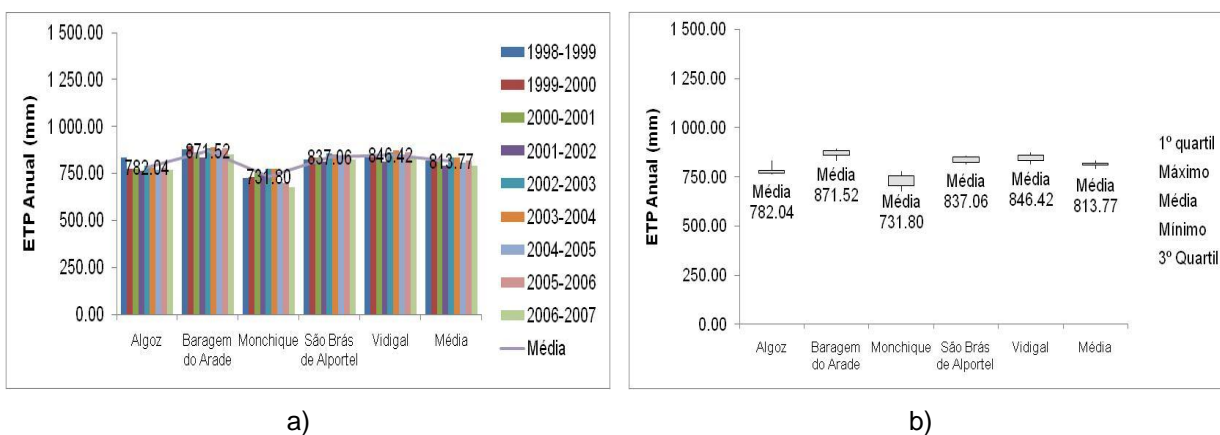


Figura 5.10 - ETP (mm) calculada pelo método de Thornthwaite a) Valores calculados para os anos em análise e média; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil)

O método de Thornthwaite, com um valor de ETP média de 813.77mm, é o que mais se aproxima dos valores esperados. Este método apresenta, ainda, uma semelhança significativa entre os diferentes anos.

5.3.3 Método de Turc

Este método é o que apresenta valores de ETP mais elevados. Os valores calculados são bastantes superiores aos obtidos nos métodos anteriores. Com este método obtêm-se valores superiores em cerca de 300mm anuais para as estações analisadas.

Os resultados são ainda mais díspares no caso da estação de Monchique. Para os métodos anteriores esta é a estação com o menor valor de ETP, já a aplicação do método de Turc colocou esta estação como a segunda com uma maior ETP.

Na Tabela 5.8 podem auferir-se os resultados obtidos para as 5 estações, aplicando o método de Turc. Na Figura 5.11 comparam-se os valores para as diferentes estações e encontram-se evidenciados os valores máximo, mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil e média.

Tabela 5.8 - ETP (mm) calculada pelo método de Turc

| Ano Hidrológico | Algoz | Barragem do Arade | Monchique | São Brás de Alportel | Vidigal |
|-----------------|----------|-------------------|-----------|----------------------|----------|
| 1998-1999 | 1 086.23 | 1 124.26 | 1 309.95 | 1 275.59 | 1 237.25 |
| 1999-2000 | 1 085.53 | 1 123.82 | 1 234.61 | 1 262.83 | 1 223.37 |
| 2000-2001 | 1 171.87 | 1 205.81 | 1 294.22 | 1 250.82 | 1 354.09 |
| 2001-2002 | 1 143.79 | 1 134.30 | 1 233.84 | 1 180.19 | 1 163.78 |
| 2002-2003 | 1 148.12 | 1 118.71 | 1 211.04 | 1 153.78 | 1 264.11 |
| 2003-2004 | 1 167.77 | 1 134.26 | 1 229.24 | 1 161.36 | 1 308.18 |
| 2004-2005 | 1 164.44 | 1 152.93 | 1 309.52 | 1 106.56 | 1 338.22 |
| 2005-2006 | 1 112.87 | 1 117.72 | 1 234.42 | 1 022.89 | 1 208.22 |
| 2006-2007 | 1 117.26 | 1 104.50 | 1 215.43 | 973.86 | 1 212.46 |

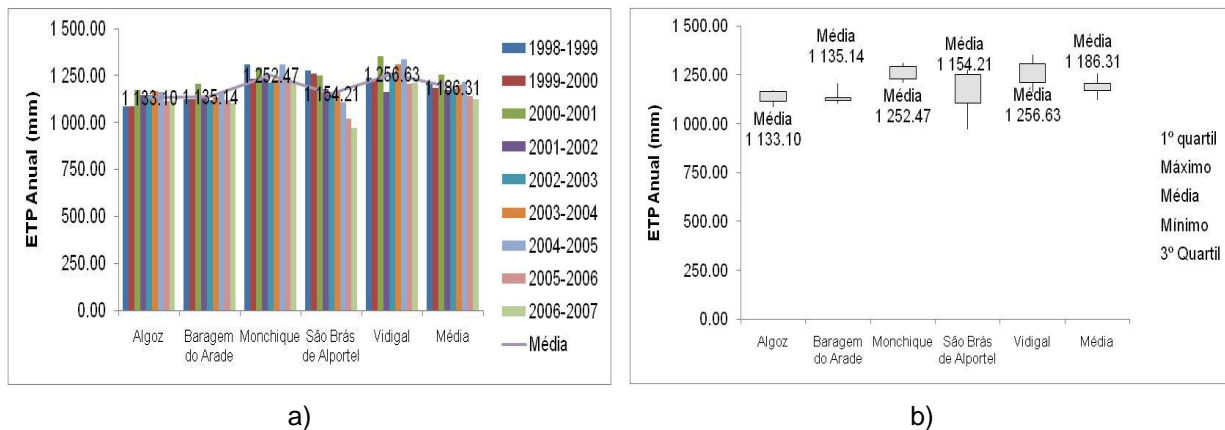


Figura 5.11 - ETP (mm) calculada pelo método de Turc a) Valores calculados para os anos em análise e média; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil)

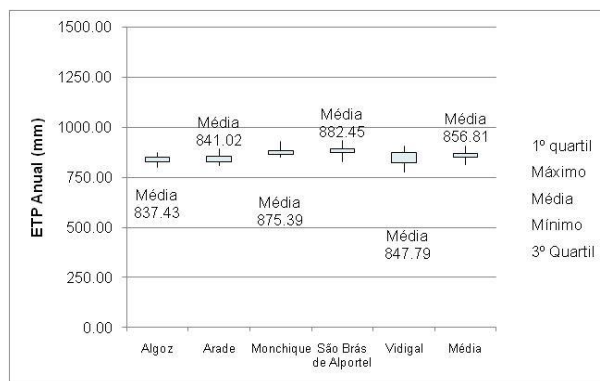
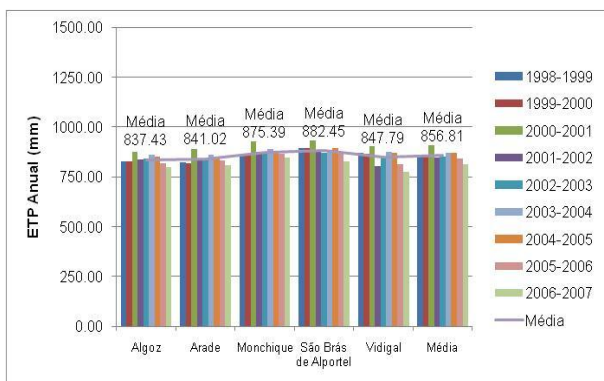
Este é o método que mais se afasta dos dados da literatura, com uma ETP média de 1 186.31mm por ano. Este método parece sobrestimar a ETP para a área de estudo.

5.3.4 Método de Penman-Monteith

O método de Penman-Monteith (aplicado através do modelo SWAT e que em diante se refere como modelo SWAT), que difere dos métodos anteriores por se tratar de um método numérico, apresenta resultados consentâneos com os três métodos analíticos utilizados. Na Tabela 5.9 podem observar-se os resultados do modelo SWAT para as 5 estações. Na Figura 5.12 apresentam-se os valores para as diferentes estações e encontram-se representados os valores máximo, mínimo, primeiro quartil, terceiro quartil e média.

Tabela 5.9 - ETP (mm) resultado do modelo SWAT

| Ano Hidrológico | Algoz | Barragem do Arade | Monchique | São Brás de Alportel | Vidigal |
|-----------------|--------|-------------------|-----------|----------------------|---------|
| 1998-1999 | 826.55 | 822.98 | 861.68 | 894.13 | 870.33 |
| 1999-2000 | 825.72 | 818.32 | 861.94 | 894.09 | 867.42 |
| 2000-2001 | 875.36 | 890.11 | 929.34 | 934.32 | 905.04 |
| 2001-2002 | 836.70 | 842.17 | 875.28 | 877.80 | 802.00 |
| 2002-2003 | 843.48 | 839.73 | 864.28 | 872.09 | 847.96 |
| 2003-2004 | 860.02 | 859.81 | 888.90 | 880.80 | 874.09 |
| 2004-2005 | 850.74 | 853.18 | 880.98 | 895.15 | 873.22 |
| 2005-2006 | 819.76 | 832.29 | 867.92 | 864.80 | 814.86 |
| 2006-2007 | 798.50 | 810.57 | 848.17 | 828.84 | 775.17 |



a)

b)

Figura 5.12 - ETP (mm) resultante do modelo SWAT a) Valores calculados para os anos em análise e média; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil)

5.3.5 Comparação de Resultados

Os resultados obtidos pelo modelo SWAT aproximam-se dos resultados obtidos pelo método de Thornthwaite.

Já tinha sido feita menção que este era o método que mais se aproximava dos resultados referenciados nos diferentes estudos, que têm sido levados a cabo nesta zona. Assim, consegue-se demonstrar que o modelo SWAT representa, de forma satisfatória, a evapotranspiração potencial.

O SWAT aplicado aproxima-se, não só dos valores médios obtidos para a zona, como demonstra, ainda, uma adequação às diferenças já referenciadas entre a zona de Monchique, serra, e a zona sobre influência das restantes estações, com características costeiras.

Na Figura 5.13 constata-se as semelhanças de resultados através da aplicação do modelo analítico de Thornthwaite e o modelo numérico SWAT.

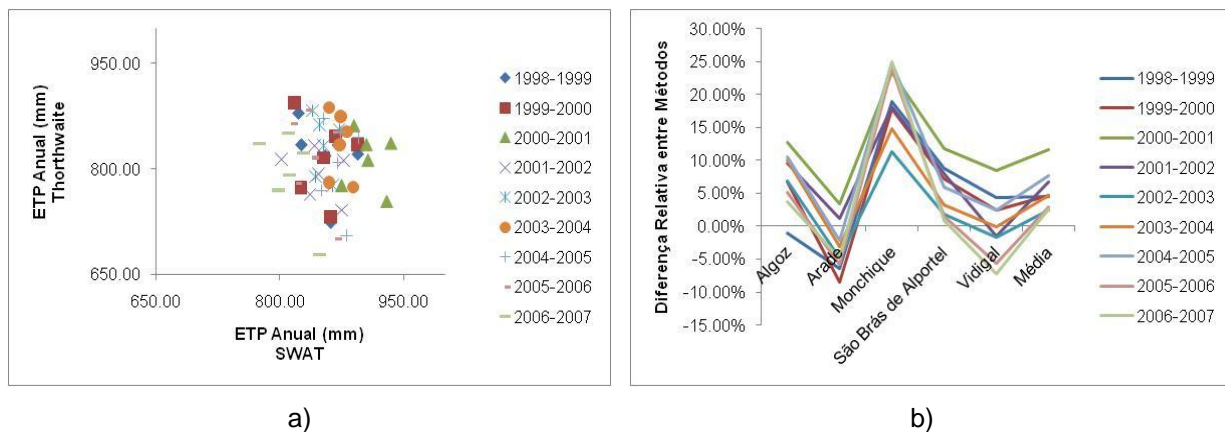


Figura 5.13 – Comparação entre os resultados do Modelo de Thornthwaite e o Modelo SWAT a) Dispersão de resultados obtidos entre os dois modelos; b) Diferenças relativas entre os dois modelos

A distribuição obtida na Figura 5.13 a) levou à necessidade de verificação dos valores obtidos nas diferentes estações. Esta verificação evidenciou que os resultados obtidos pelo modelo SWAT são mais semelhantes entre estações do que os resultados do método Thornthwaite – *vide* Figura 5.14 e Tabela 5.10.

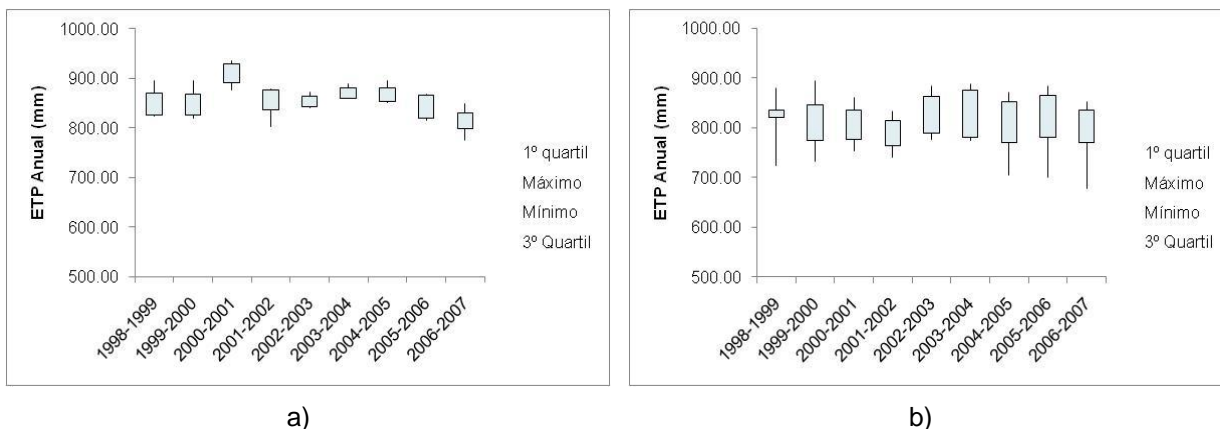
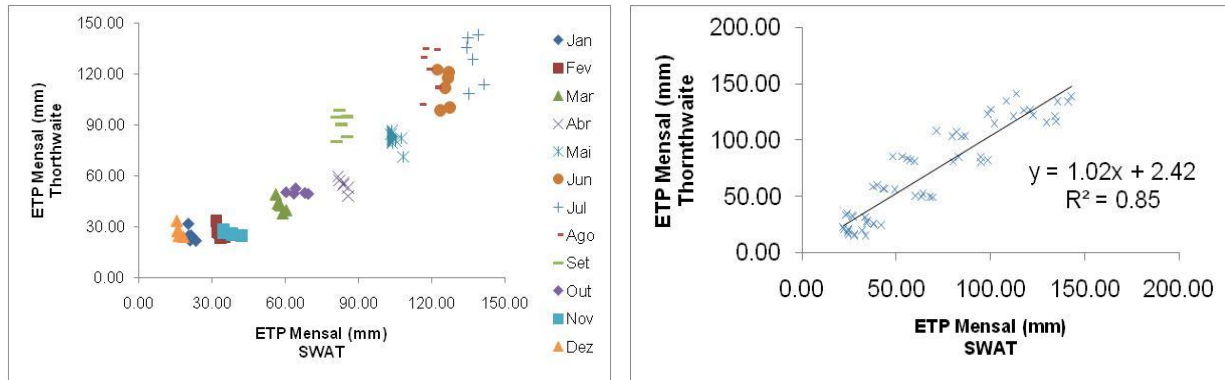


Figura 5.14 - Variação dos valores de ETP anual nas estações em estudo; a) Modelo SWAT; b) Método Thornthwaite

Tabela 5.10 - Desvio padrão dos valores obtidos para a ETP anual

| Ano Hidrológico | Modelo SWAT | Método Thornthwaite |
|-----------------|-------------|---------------------|
| 1998-1999 | 30.19 | 57.14 |
| 1999-2000 | 31.31 | 63.45 |
| 2000-2001 | 25.17 | 45.28 |
| 2001-2002 | 31.23 | 38.54 |
| 2002-2003 | 13.99 | 47.46 |
| 2003-2004 | 12.82 | 53.09 |
| 2004-2005 | 18.81 | 69.33 |
| 2005-2006 | 24.98 | 75.66 |
| 2006-2007 | 27.98 | 70.25 |

Efectuou-se ainda uma comparação dos dados a nível mensal. Os resultados mostram, uma vez mais, concordância entre o método de Thornthwaite e o modelo SWAT. Na Figura 5.17 apresentam-se a comparação dos resultados obtidos.

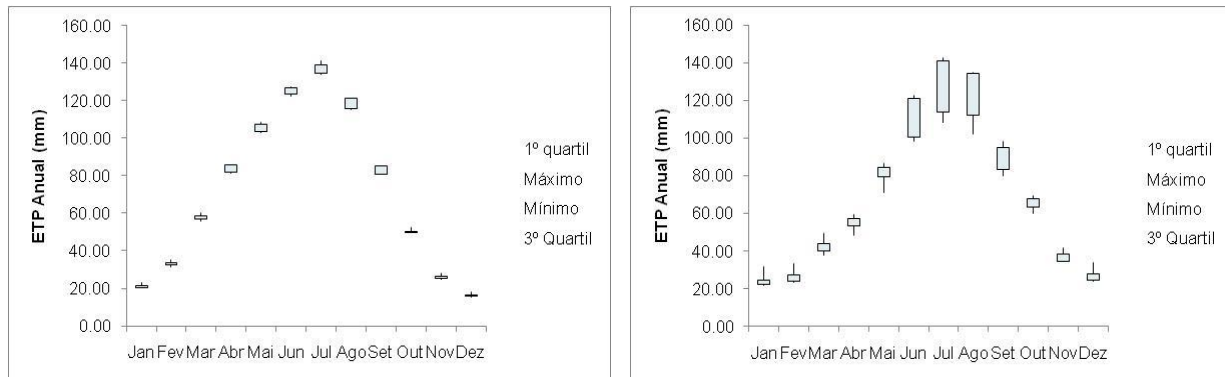


a)

b)

Figura 5.15 – Comparação entre os resultados do Modelo de Thornthwaite e o Modelo SWAT a) Dispersão de resultados obtidos entre os dois modelos; b) Relação entre os dados obtidos para os dois modelos

Tal como já referido para os valores anuais, analisando os valores de ETP mensais, é também perceptível uma menos variação dos valores do modelo SWAT. Essa variação é ainda menor quando nos aproximamos dos meses de Verão, onde o método de Thornthwaite apresenta diferenças significativas, o modelo SWAT apresenta valores bastante semelhantes entre estações. Na Figura 5.16 apresenta-se a dispersão de valores entre as diferentes estações entre o método de Thornthwaite e o modelo SWAT



a)

b)

Figura 5.16 - Variação dos valores de ETP mensal nas estações em estudo; a) Modelo SWAT; b) Método Thornthwaite

5.4 RECARGA

No que respeita à análise da recarga, e cumprindo os objectivos definidos, comparam-se, em seguida, os diferentes métodos, apresentados na secção 4. A análise dos dados será efectuada tendo por base anos civis e não anos hidrológicos, uma vez que o método de Kessler calcula a recarga como a percentagem de precipitação de determinado ano civil. Desta forma analisam-se os anos civis de 1999 a 2006, uma vez que os anos 1998 e 2007 estão incompletos.

5.4.1 Método de Penman-Grindley

Este método é o que apresenta os valores mais elevados de recarga. Anualmente, a recarga varia entre 167.84mm no ano de 2005 (ano de seca extrema em todo o território nacional) e os 629.13mm no ano 2001. A Figura 5.17 mostra a variação na recarga calculada pelo método Penman-Grindley ao longo dos anos.

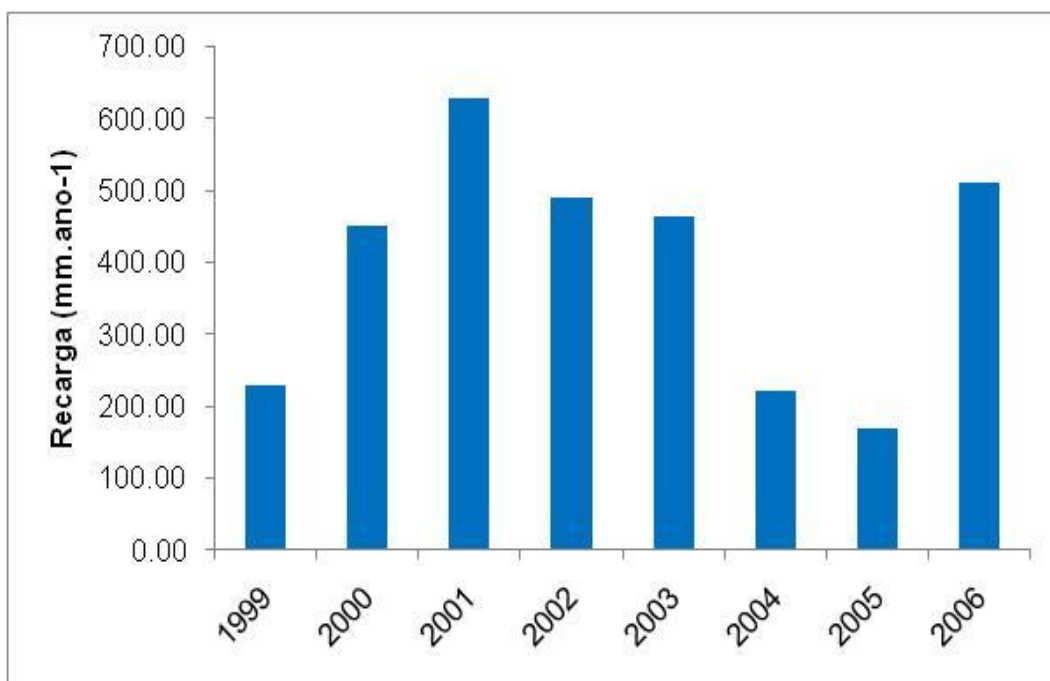


Figura 5.17 - Recarga calculada com o método Penman-Grindley

5.4.2 Método de Kessler

O método de Kessler apresenta valores de recarga, com um comportamento ao longo dos anos, semelhante ao observado no método anterior. Os valores são, com excepção do primeiro ano, inferiores aos calculados pelo método de Penman-Grindley. Mais uma vez, o valor mais baixo de recarga, 108.75mm, coincide com o período de seca e o valor mais elevado de recarga, 510.93mm, coincide com o ano de 2001.

O caso de, apenas no primeiro ano, a recarga calculada pelo método de Kessler ser superior à calculada pelo método de Penman-Grindley, é facilmente explicado pelo facto de, no primeiro instante, no método de Penman-Grindley, se considerar um determinado teor de água no solo (neste caso considerou-se que no instante 0 o teor de água no solo é igual à constante de raiz): Após este instante inicial o método indica qual o teor de água no solo a cada instante, não se voltando a verificar a situação inicial.

A Figura 5.18 mostra a variação na recarga calculada pelo método Kessler ao longo dos anos.

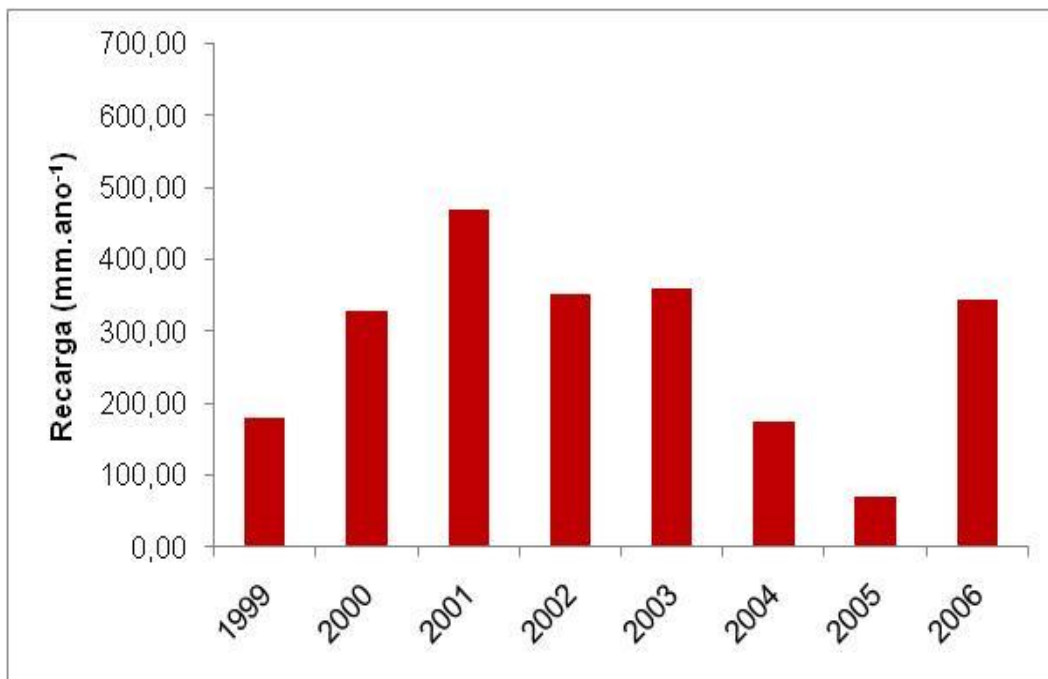


Figura 5.18 - Recarga calculada com o método Kessler

5.4.3 Modelo SWAT

Tal como descrito na secção anterior, e da mesma forma que o método de Penman-Grindley, também o SWAT necessita de um período inicial para que o solo estabilize o seu teor em água. Assim, mais uma vez no primeiro ano, nota-se um valor inferior aos restantes anos, com excepção do ano de 2004 e 2005 onde se reflectem os resultados da seca. O valor mais elevado de recarga situa-se, ao

contrário dos restantes métodos, no ano 2006., com 425.62mm. O modelo SWAT apresenta valores de recarga semelhantes aos do método Kessler.

A Figura 5.19 mostra a variação na recarga simulada no modelo SWAT ao longo dos anos.

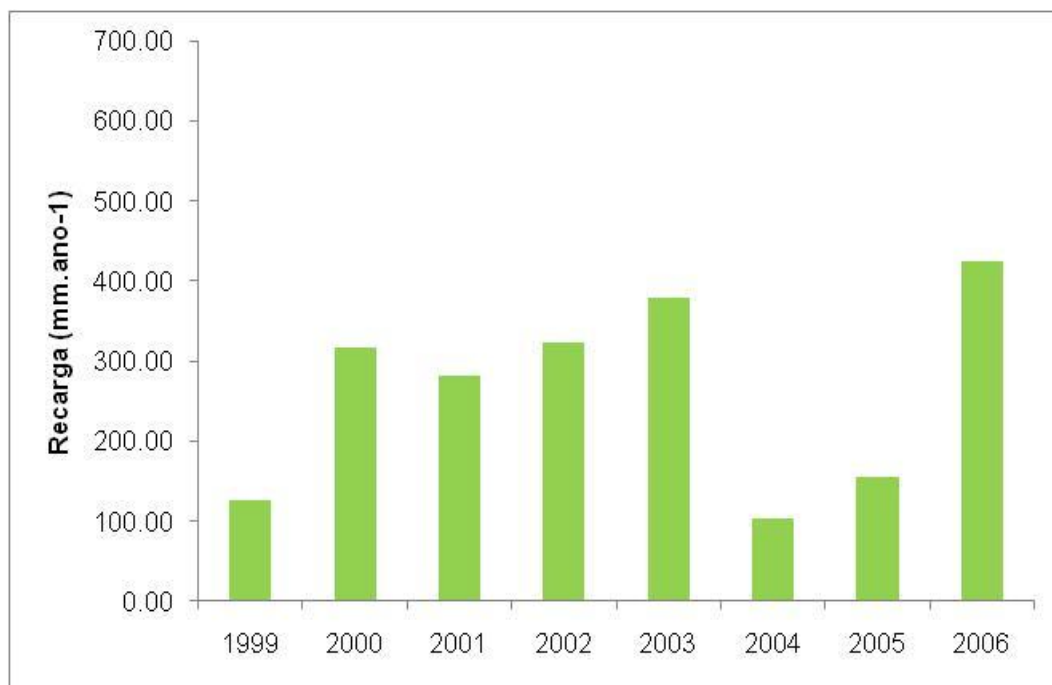


Figura 5.19 - Recarga simulada pelo modelo SWAT

5.4.4 Comparação de Resultados

As três metodologias para cálculo da recarga usadas neste estudo apresentam comportamentos semelhantes, mostrando, no entanto, valores distintos entre elas. Na Tabela 5.11 mostra-se os valores de recarga obtidos pelos diferentes métodos, apresentados em mm e em hm³.

Tabela 5.11 - Valores de recarga obtidos pelos diferentes métodos

| Ano Civil | Método de Penman –Grindley | | Método de Kessler | | Modelo SWAT | |
|-----------|----------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| | mm.ano ⁻¹ | hm ³ .ano ⁻¹ | mm.ano ⁻¹ | hm ³ .ano ⁻¹ | mm.ano ⁻¹ | hm ³ .ano ⁻¹ |
| 1999 | 225.44 | 71.25 | 180.28 | 56.98 | 126.71 | 40.05 |
| 2000 | 451.77 | 142.78 | 329.21 | 104.05 | 316.76 | 100.11 |
| 2001 | 629.13 | 198.84 | 468.27 | 148.00 | 281.36 | 88.92 |
| 2002 | 490.10 | 154.90 | 351.64 | 111.14 | 322.29 | 101.86 |
| 2003 | 463.62 | 146.53 | 358.23 | 113.22 | 379.64 | 119.99 |
| 2004 | 220.67 | 69.74 | 173.07 | 54.70 | 103.18 | 32.61 |
| 2005 | 167.84 | 53.05 | 70.59 | 22.31 | 154.56 | 48.85 |
| 2006 | 509.75 | 161.11 | 343.24 | 108.48 | 425.62 | 134.52 |

Pela análise da tabela acima e comparando os valores obtidos com os valores de referência, é o método de Kessler que mais se aproxima dos valores obtidos por Monteiro, et al (2006b) de 90 hm³ e por Mendes Oliveira, et al. de 100hm³. Os valores obtidos pelo modelo SWAT também se aproximam bastante deste número. Por comparação, os valores do método Penman-Grindley parecem sobrestimados.

A Figura 5.20 a) mostra a variação na recarga anual dos diferentes métodos utilizados e a Figura 5.20 b) mostra como se distribuem os valores obtidos para cada um dos métodos.

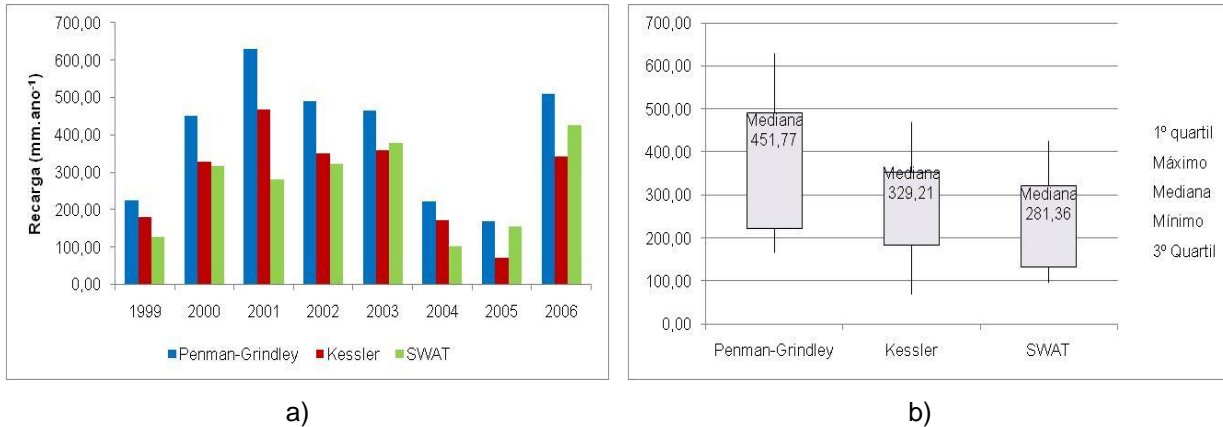


Figura 5.20 – Recarga (mm) calculada pelos diferentes métodos a) Valores anuais de recarga; b) Dispersão de valores (máxima, mínima, mediana, primeiro quartil e terceiro quartil)

Como se pode observar, os valores obtidos pelo método de Penman-Grindley são os que apresentam uma maior dispersão, em oposição do modelo SWAT, que apresenta a menor dispersão dos três, mas mais uma vez semelhante aos valores obtidos pelo método de Kessler.

Verificou-se, ainda, a adequação entre os métodos propostos para este estudo, analisando o comportamento do modelo SWAT, em comparação com os outros dois métodos. Apesar da análise visual à Figura 5.20 a) indicar que o modelo SWAT se aproxima mais do método de Kessler, o índice de eficiência de modelos de Nash-Sutcliffe indica que o modelo SWAT se comporta de forma semelhante ao método de Penman-Grindley. Este resultado era, no entanto, expectável, uma vez que, quer o método de Penman-Grindley, quer o modelo SWAT, são metodologias baseadas no balanço hídrico, ao contrário do método de Kessler, que é um método empírico. Na Figura 5.21 observa-se a adequação entre o modelo SWAT e os dois métodos analíticos usados e na Tabela 5.12 apresentam-se alguns dados estatísticos para comparação das três metodologias.

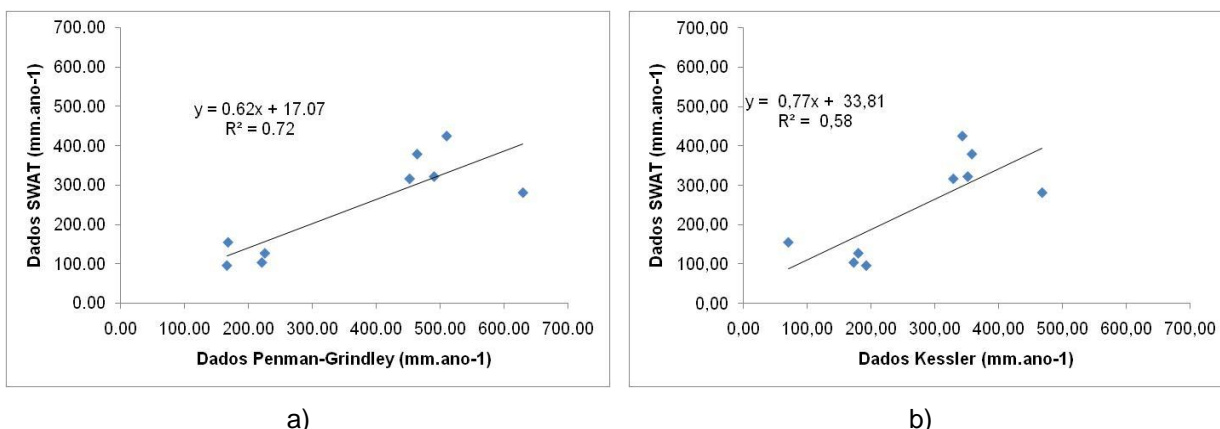


Figura 5.21 - Semelhança entre a recarga dos diferentes métodos por comparação dos valores anuais. a) Recarga de Penman-Grindley vs. recarga SWAT; b) Recarga Kessler vs. recarga SWAT

Tabela 5.12 - Parâmetros quantitativos de adequação entre o modelo SWAT e o método de Penman-Grindley, entre o método de Kessler e entre os métodos de Kessler e Penman-Grindley

| Parâmetro | Definição | Penman-Grindley Vs SWAT | Kessler Vs SWAT | Penman-Grindley Vs Kessler |
|-----------------------|---|-------------------------|-----------------|----------------------------|
| R² | - | 0.72 | 0.58 | 0.93 |
| Bias | Média da diferença entre os valores obtidos e reais (mm.ano ⁻¹) | -124.32 | -29.08 | 95.25 |
| RMSE | Raiz quadrada da soma ao quadrado da diferença entre valores obtidos e lidos a dividir pelo número de dados | 152.82 | 86.58 | 112.24 |
| Nash-Sutcliffe | Coefficiente de eficiência de modelos | 0.71 | 0.52 | 0.87 |

Após a análise da recarga obtida pela aplicação dos diversos modelos, verificou-se qual o peso relativo da infiltração no leito dos cursos de água. Pela análise destes valores, constata-se que este factor tem uma importância significativa na recarga total do aquífero, em especial em anos pouco húmidos. Na Figura 5.22 pode ver-se a contribuição deste factor para a recarga total no aquífero.

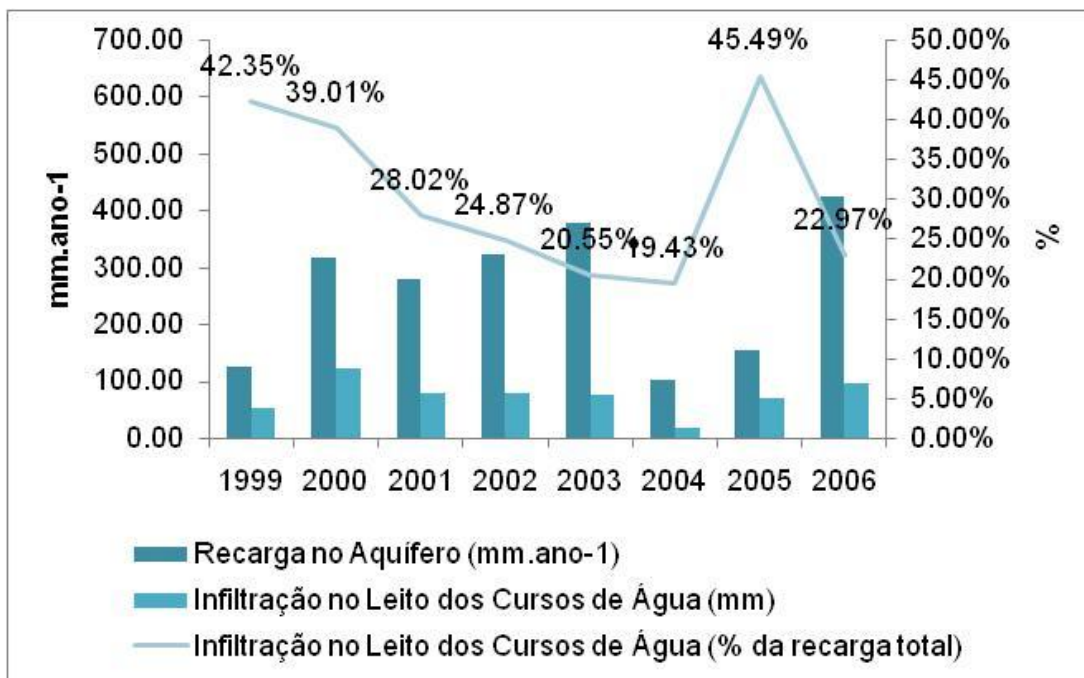


Figura 5.22 - Contribuição da infiltração nos cursos de água para a recarga no aquífero

5.5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No que diz respeito aos dados climáticos, tornou-se necessário recorrer a metodologias que permitissem um adequado preenchimento dos dados em falta. Para tal, propôs-se diferentes formas de solucionar a questão, consoante o tipo de dados, e que tal como se pode demonstrar, se aplicam de forma bastante positiva ao caso de estudo.

Ficou, assim, demonstrado que é possível a aplicação de metodologias simples e expeditas, para o preenchimento de lacunas de dados, referentes a temperatura, radiação solar e humidade relativa. No que respeita à velocidade do vento, fica a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia que se adequa melhor ao preenchimento das falhas existentes nos dados disponíveis.

No que respeita aos dados de parametrização do modelo SWAT, este estudo contribui para aumentar o número de dados disponíveis, no que diz respeito às culturas tipo do território nacional. Uma vez que este modelo é desenvolvido nos Estados Unidos da América, a sua base de dados reporta-se a esse país. Como tal, e partindo do trabalho desenvolvido por Nunes, et al. (2008), fez-se uma evolução, parametrizando as principais culturas da região algarvia, e que poderá servir de base a futuros estudos hidrológicos, ou agrícolas, desenvolvidos nesta região.

Em relação aos resultados do modelo SWAT, grande parte do sucesso da sua aplicação resulta de uma calibração adequada e, Segundo Janssen & Heuberger (1995), o sucesso de uma calibração assenta, essencialmente, na qualidade e acessibilidade dos dados bem como no tempo disponível.

Estes dois factores tornaram-se limitantes na execução deste estudo. Devido ao tempo que foi necessário para uma correcta parametrização dos dados de entrada no modelo SWAT, na fase de calibração tornou-se imperativo diminuir o rigor, de forma a conseguir concluir todas as metas propostas inicialmente para este estudo, no tempo existente.

Por outro lado, a quantidade dos dados disponíveis revelou-se um problema para a calibração do modelo. Mesmo tendo sido escolhido o período com maior número de dados disponíveis, os dados existentes nas estações localizadas a montante e a jusante do aquífero, e que permitem a calibração dentro deste, são, em tudo, escassos.

Relativamente aos resultados de ETP, e após aplicadas as quatro metodologias propostas, poder-se-ão retirar diversas conclusões.

Tendo em conta que, segundo o balanço hídrico e de uma forma simplista, a recarga passa pelo valor da precipitação ao qual é retirada a evapotranspiração e o escoamento, tornou-se evidente a importância de uma análise aos valores de evapotranspiração potencial calculados com recurso a métodos analíticos e ao método numérico SWAT.

Daqui se pode concluir que os valores obtidos, por simulação no modelo SWAT, são bastante semelhantes aos obtidos pelo método de Thornthwaite. No entanto, os valores de ETP obtidos pelo SWAT apresentam uma muito menor variabilidade geográfica, que os obtidos pelo método de Thornthwaite.

Este facto demonstra que, para a ETP, não contribuem apenas a precipitação e a radiação solar, tal como descrito por modelos mais simplistas. Variáveis como a velocidade do vento e a humidade relativa, contribuem, também, para este parâmetro de uma forma importante. Ficou ainda por verificar, e tal é possível no modelo SWAT, a influência que a altitude, e mais propriamente a variação de temperatura e precipitação com a altitude, poderão representar para a ETP.

É, no entanto, de salientar que sendo o método de Thornthwaite um método muito mais expedito e simples para o cálculo da ETP, apresenta resultados que, em tudo, se podem comparar com os valores obtidos por métodos mais complexos, como o método de Penman-Monteith utilizado no SWAT.

No que concerne mais especificamente à recarga, e tendo como principal fonte de validação dos dados, os valores de referência de diversos estudos efectuados no aquífero Querença-Silves, constata-se que o método de Kessler apresenta valores bastante semelhantes aos expectáveis.

Já o método de Penman-Grindley apresenta valores demasiado elevados. Estes valores poderão resultar do facto de que este método depende significativamente das constantes de raiz usadas para o cálculo da evapotranspiração. Os valores utilizados foram retirados do método original, optimizado para o Reino Unido, e não foram alvo de calibração. Como tal, os valores aqui obtidos para a recarga, com a aplicação deste método, poderão ser alvo de correcção, através da calibração das constantes de raiz, conferindo uma maior confiança nos resultados.

Fica, assim, por analisar qual o impacto que a alteração das constantes de raiz poderá ter neste método, e quais as constantes de raiz que melhor se adequam ao território nacional e, mais concretamente, à região do Algarve.

Em relação ao modelo SWAT, os resultados obtidos foram, ainda que não tanto como o método de Kessler, bastante semelhantes aos valores de referência. Pressupõem-se, que uma melhor calibração do modelo, resultaria numa melhor adequação dos valores de recarga no aquífero. Apesar desta limitação os resultados obtidos permitem retirar algumas conclusões.

É de salientar que os resultados do modelo SWAT permitem referir que, ao distinguir a recarga média anual nas três estações calibradas, este conseguiu simular correctamente a infiltração sobre o aquífero e a infiltração no fundo das linhas de água. O modelo permitiu ainda simular a variabilidade do caudal inter-anual para as estações de Querença e Quinta Passagem, indicando uma boa capacidade de simular a variabilidade da recarga inter-anual em bacias como as aqui estudadas.

O modelo SWAT apresenta ainda uma vantagem significativa em relação aos restantes métodos, o cálculo da infiltração nos cursos de água. Este é um valor que se sabe ser importante para o cálculo da recarga no aquífero Querença-Silves, e que nenhum dos outros dois métodos tem em conta. Os resultados aqui analisados revelam ainda que este valor se torna mais importante em anos secos, revelando a sua importância quer em situações como a da seca de 2005-2006, como em possíveis cenários de alterações climáticas.

Tendo em conta a vocação maioritariamente agrícola e superficial deste modelo é, em tudo, normal que se encontrem dificuldades em simular ambientes tão particulares como uma região sobre um aquífero cársico. É, no entanto, de salientar que não possuindo as ferramentas que lhe poderiam conferir uma maior adequabilidade a este tipo de cenários, não são, em nada, anormais os resultados obtidos pelo modelo. Este modelo apresenta ainda outras vantagens, como por exemplo a

determinação das perdas de águas para o aquífero ao longo dos cursos de água. Este é um valor que os restantes modelos não apresentam, e que em aquíferos desta natureza são extremamente importantes.

Se, a uma calibração menos exaustiva, aliarmos o facto de este estudo se ter baseado em apenas 10 anos de dados disponíveis, fica a dúvida se os resultados obtidos não poderiam ser ainda melhores se se tivesse um período mais abrangente de dados.

Esta dissertação vem abrir um caminho para um aprofundar das capacidades do modelo SWAT em regiões cársticas. Constitui, ainda, uma boa aproximação, de quais os parâmetros a considerar para a calibração do modelo, em condições semelhantes às que se verificam sobre o aquífero Querença-Silves.

6 CONCLUSÕES

Este estudo apresentou, como objectivo principal, o cálculo da recarga no aquífero Querença-Silves. Para tal, considerou-se o uso de dois métodos analíticos e um método numérico. Os métodos analíticos seleccionados diferem entre si, visto que um deles, o método de Kessler, é um método empírico e o outro, o método de Penman-Grindley, é um método baseado no balanço hídrico.

Por outro lado, o método numérico, modelo SWAT, é um método determinístico usado, em especial, para a modelação hidrológica superficial e uma excelente ferramenta de apoio à agricultura.

Para a aplicação das três metodologias seleccionadas, tornou-se necessário compilar um número significativo de dados, em que a quantidade/qualidade nem sempre foi a desejada.

No que diz respeito aos dados climáticos, salienta-se que os métodos escolhidos, e que se revelaram bastante expeditos, são adequados para a zona em estudo.

Refere-se, ainda, que o cálculo da ETP apresenta valores semelhantes entre os métodos de Thornthwaite e Penman-Monteith. Esta constatação permite concluir, que o método de Thornthwaite, de aplicação mais simples que o método Penman-Monteith, se revela um excelente método de cálculo da ETP sempre que o tempo ou a quantidade de dados não permitir o uso de um método mais consistente.

Relativamente à recarga, o modelo SWAT mostrou ser capaz de simular uma zona com características cársicas. Tal como já referido, este modelo apresentou valores que em tudo se assemelham a valores de referência para o aquífero Querença-Silves, demonstrando uma adequabilidade inter-anual para com as estações calibradas. Resta concluir que se considera o modelo SWAT como um modelo adequado, com respectivas restrições, à simulação de bacias sobre aquíferos cársicos. Este apresenta ainda uma vantagem significativa em relação aos restantes métodos, a infiltração nos leito dos cursos de água, onde o modelo revelou ser capaz de prever este cenário obtendo-se resultados que demonstra a importância deste factor no aquífero Querença-Silves.

No que respeita ao modelo Penman-Grindley, verificou-se que a sua aplicação, em Portugal, carece de uma validação dos valores de constante de raiz. Apenas após a adopção de valores que se adequem ao nosso país, este método deverá ser aplicado com vista a resultados de confiança.

Por fim, falta referir que a utilização de modelos hídricos integrados, como o SWAT, evidencia a necessidade de uma mudança de paradigma. Atendendo a que, numa primeira época, e centrando o pensamento no Algarve, se explorou de forma preferencial as águas subterrâneas e, posteriormente, se mudou completamente o modo de actuar, e passou-se a usar, de forma quase exclusiva, fontes

superficiais para o abastecimento de água, encontramos-nos, nesta altura, num momento em que o recurso água começa a ser encarado de forma integrada.

Torna-se, por de mais, evidente a necessidade de avaliação, não dos recursos superficiais ou subterrâneos, mas do recuso água, como um todo. É chegado o momento de os estudos científicos seguirem o caminho já demonstrado pelo *Projecto Algarve* e por Stigter et al. (2008), onde se evidenciam as vantagens de uma abordagem integrada na gestão da água. Está na altura de se pôr em prática a gestão integrada das bacias hidrográficas, considerando, com igual importância, a sua componente superficial e a sua componente subterrânea.

BIBLIOGRAFIA

Agência Lusa. (6 de Janeiro de 2006). *Dossier Seca em Portugal - Jornal Público*. Obtido em 10 de Agosto de 2010, de Jornal Público: <http://dossiers.publico.clix.pt/noticia.aspx?idCanal=1405&id=1212465>

Almeida, C. A. (1985). *Hidrogeologia do Algarve Central*. Lisboa: Departamento de Geologia da FCUL.

Arnold, J. G., & Allen, P. M. (1996). Estimating Hydrologic Budgets for three Illinois Watersheds. *Journal of Hydrology* , 57-77.

Bombelli, A., & Gratani, L. (2003). Interspecific differences of leaf gas exchange and water relations of three evergreen Mediterranean shrub species. *Photosynthetica* 41 (4) , 619-625.

Bosh, D. D., Sheridan, J. M., Batten, H. L., & Arnold, J. G. (2004). Evaluation of the SWAT Model on a Costal Area. In *Transactions of the ASAE* (pp. 1493-1506). American Society of Agricultural Engineers.

Bussotti, F., Borghini, F., Celesti, C., Leonzio, & C. (2003). Leaf shedding, crown condition and element return in two mixed holm oak forests in Tuscany, central Italy. *Forest Ecology and Management* , 273-285.

CCDR Algarve. (2004). *Plano Regional de Ordenamento do Território (Anexo H) - Recursos Hídricos, Planeamento e Gestão do Recurso Água*. Faro: MAOTDR - Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

Degushi, A., Hatori, S., & Ho-Teak, P. (2006). The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology* , 80-102.

Do Ó, A., & Monteiro, J. P. (2005). Diagnóstico do Risco de Secas no Algarve – uma abordagem geográfica. *X Colóquio Ibérico de Geografia*. Évora: Associação Portuguesa de Geografia.

Do Ó, A., & Monteiro, J. P. (2006). *Estimação da Procura Real de Água no Algarve por Sectores*.

FISRWG. (1998). *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes and Practices*. Federal Agencies of US gov't.

Garcia, R. (6 de Janeiro de 2005). *Dossier Seca em Portugal*. Obtido em 10 de Agosto de 2010, de Jornal Público: <http://dossiers.publico.clix.pt/noticia.aspx?idCanal=1405&id=1212408>

Grcía-Mozo, H., Galán, C., Aira, M. J., Días de la Guardia, C., Fernández, D., Gutierrez, A. M., et al. (2002). Modelling start of oak pollen season in different climatic zones in Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 110 , 247-257.

Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., & Riley, J. P. (1985). Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. and Drain. Engr* 111 , 113-124.

Hoff, C., Rambal, S., & Joffre, R. (2002). Simulating carbon and water flows and growth in a Mediterranean evergreen *Quercus ilex* coppice using the FOREST-BGC model. *Forest Ecology and Management* 164 , 121-136.

IGM. (2004). *Léxico de Termos Hidrogeológicos*. Obtido em 11 de Setembro de 2010, de Instituto Geológico e Mineiro: http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/lexico.htm

INAG. (2000). *Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Algarve*. Lisboa: MAOT - Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território.

INAG. (2005). *Plano Nacional da Água*. Lisboa: MAOTDR - Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

INAG. (2005b). *Relatório Síntese Sobre a Caracterização das Regiões Hidrográficas Prevista na Directiva-Quadro da Água*. Lisboa: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

Janssen, P. H., & Heuberger, P. S. (1995). Calibration of Process-Oriented Models. *Ecological Modelling* , 55-66.

Kopp, E. (2000). *Os Solos do Algarve e as Suas Características*. Faro: Direcção Regional de Agricultura do Algarve.

Lencastre, A., & Franco, F. M. (1992). *Lições de Hidrologia*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.

Lhomme, J. P., Rocheteau, A., Ourcival, J. M., & Rambal, S. (2001). Non-steady-state modelling of water transfer in a Mediterranean evergreen canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 108 , 67-83.

Lopes, A. R., Rodrigues, R., & Orlando, M. (2005). *O Aproveitamento Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Sistema Aquífero Querença-Silves na Seca de 2004/2005*. Lisboa: INAG.

Mendes Oliveira, M., Oliveira, L., & Lobo Ferreira, J. P. (2008). Estimativa da Recarga Natural no Sistema Aquífero de Querença-Silves (Algarve) pela Aplicação do Modelo BALSEQ_MOD. 9º Congresso da Água. Lisboa: APRH.

Monteiro, J. P. (2007). *Mudanças no Uso, Gestão e Conhecimento da Água na Segunda Metade do Séc. XX - O Caso do Algarve*. Faro: Universidade do Algarve.

Monteiro, J. P., Matos Silva, J., Guerreiro, P., Martins, J., & Reis, E. (2006a). Modelação de Relações entre Águas Superficiais e Subterrâneas nos Aquíferos do Algarve Central. APRH .

Monteiro, J. P., Vieira, J., Nunes, L., & Younes, F. (2006b). Inverse Calibration of a Regional Flow Model for the Querença-Silves Aquifer System. *Integrated Water Resources Management and Challenges of the Sustainable Development*.

Monteith, J. L. (1965). Evaporation and the environment. *The state and movement of water in living organisms, XIXth Symposium Soc. for Exp. Biol Swansea* (pp. 205-234). Cambridge: Cambridge University Press.

Muleta, M. K., & Nicklow, J. W. (2005). Sensitivity and Uncertainty Analysis Coupled with Automatic Calibration for a Distributed Watershed Model. *Journal of Hydrology*, 127-145.

Naburs, G. J., Ravindranath, N. H., Paustian, K., Hohenstein, W., & Makundi, W. (2003). *Chapter 3: LUCF Sector Good Practice Guidance*.

Naves, F. (20 de Janeiro de 2005). *Diário de Notícias*. Obtido em 19 de Agosto de 2010, de dn.sapo: http://dn.sapo.pt/inicio/interior.aspx?content_id=606576

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Texas: USDA Agricultural Research Service.

Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., & Williams, J. (2004). *Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation*. Texas: USDA Agricultural Research Service.

Nicolau, M. (2002). *Modelação e Mapeamento da Distribuição Espacial de Precipitação. Uma Aplicação a Portugal Continental. PhD thesis*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.

Nunes, J. P. (2007). *Vulnerability of Mediterranean Watersheds to Climate Change: The Desertification Context*. Lisbon: Faculty of Science and Technology - New Faculty of Lisbon.

Nunes, J. P., Seixas, J., & Pacheco, N. R. (2008). Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds. *Hydrological Processes* 22, 3115-3134.

Nunes, J., Seixas, J., & Pacheco, N. (2008). Vulnerability of Water Resources, Vegetation Productivity and Soil Erosion to Climate Changes in Mediterranean Watersheds. *Hydrological Processes*, 3115-3134.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., et al. (2009). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Peñuelas, J., Lusia, J., Piñol, J., & Filella, I. (1997). Photochemical reflectance index and leaf photosynthetic radiation-use-efficiency assessment in Mediterranean trees. *Int. J. Remote Sensing* 18 , 2863-2868.

Pereira, T. C., Seabra, T., Maciel, H., & Torres, P. (2009). *Portuguese national inventory report on greenhouse gases, 1990-2007*. Amadora: Agência Portuguesa do Ambiente.

Peréz, A. V., & Cabezudo, B. (2002). Use of monocharacteristic growth forms and phenological phases to describe and differentiate plant communities in Mediterranean-type ecosystems. *Plant Ecology* 161 , 231-249.

Priestley, C. H., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100 , 81-92.

Rapp, M., Regina, I. S., Rico, M., & Gallego, H. A. (1999). Biomass, nutrient content, litterfall and nutrient return to the soil in Mediterranean oak forests. *Forest Ecology and Management* 119 , 39-49.

Ribeiro, L. (2009). *Recarga, Métodos e Conceitos - Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Ribeiro, L. (2004). *Recursos Hídricos Subterrâneos de Portugal Continental*. Lisboa: Instituto da Água.

Ribeiro, L., & Braga dos Santos, J. (2006). O Projecto Algarve revisitado 25 anos depois. 8º Congresso da Água. APRH.

Ribeiro, R. V., & Machado, E. C. (2007). Some aspects of citrus ecophysiology in subtropical climates: re-visiting photosynthesis under natural conditions. *Braz. J. Plant Physiol.* 19 .

Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* .

Sandhu, C. S. (2003). *A Sensitivity Analysis of Factors Affecting the Hydrological Atmosphere-Plant-Soil Cycle in a Semi-Arid Region*. Applied Environmental Geoscience Master. Tuebingen: Centre for Applied Geoscience, Eberhard-Karls Universitaet.

Stenzel, N. M., Neves, C. S., Marur, C. J., Scholz, M. B., & Gomes, J. C. (2006). Maturation curves and degree-days accumulation for fruits of 'Folha Murcha' orange trees. *Sci. Agric.* 63 (3) .

Stigter, T. Y., Monteiro, J. P., Nunes, L. M., Vieira, J., Cunha, M. C., Ribeiro, L., et al. (2008). Strategies for integrating alternative groundwater sources into the water supply system of the Algarve, Portugal. *Water Asset Management International* , 19-24.

Stigter, T. Y., Ooijen, S. v., Post, V., Appelo, C., & Dill, A. C. (1998). A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal. *Journal of Hydrology* , 262-279.

Tenreiro, R., C. Cunha, M., Monteiro, J. P., & Vieira, J. (2009). *Modelos de Apoio à Decisão para a Gestão de Águas Subterrâneas*.

Thornthwaite, C. (1948). An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review* 38 , 55-94.

Tognetti, R., Johnson, J. D., Michelozzi, M., & Raschi, A. (1998). Response of foliar metabolism in mature trees of *Quercus pubescens* and *Quercus ilex* to long-term elevated CO₂. *Environmental and Experimental Botany* 39 , 233-245.

Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., & Arnold, J. (2007). *ArcSWAT Interface for SWAT2005*. Texas: USDA Agricultural Research Service.

ANEXOS

ANEXO I - DADOS DE TEMPERATURAS

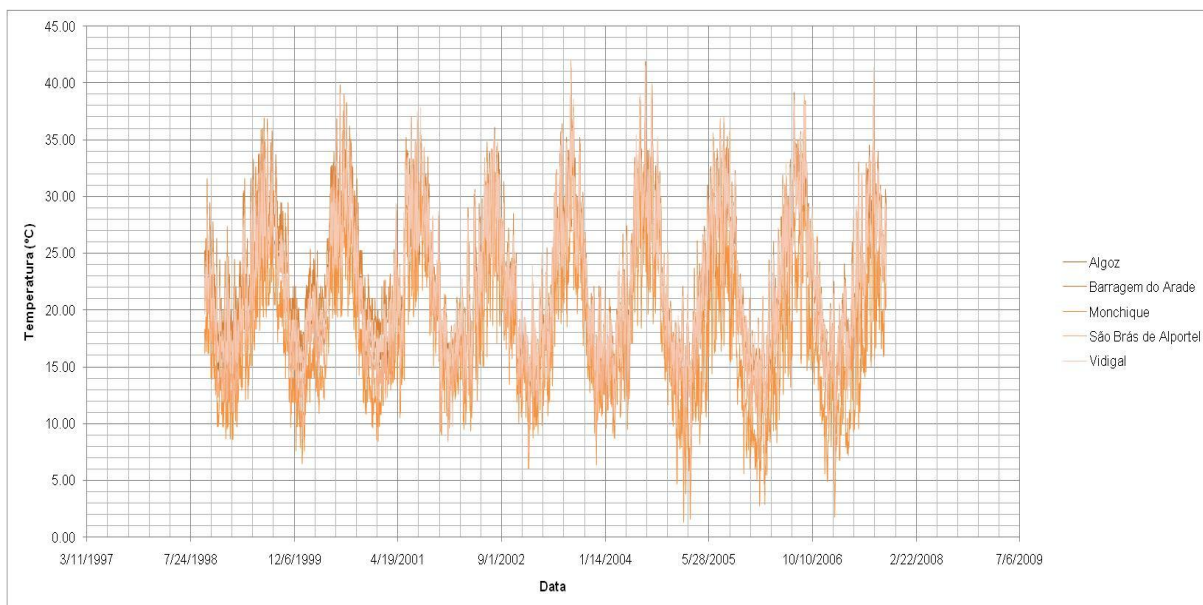


Figura I.1- Temperatura máxima diária

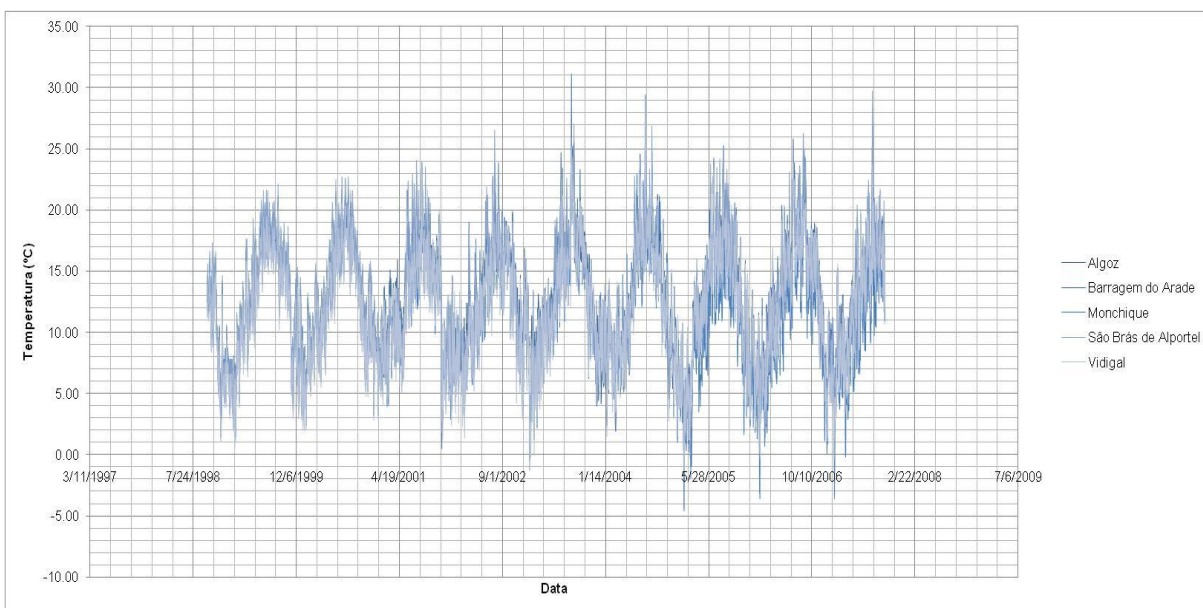
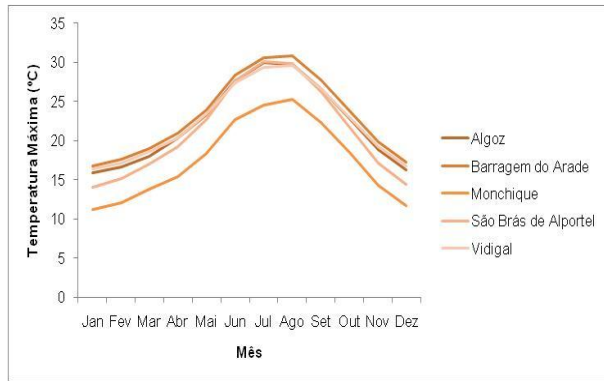
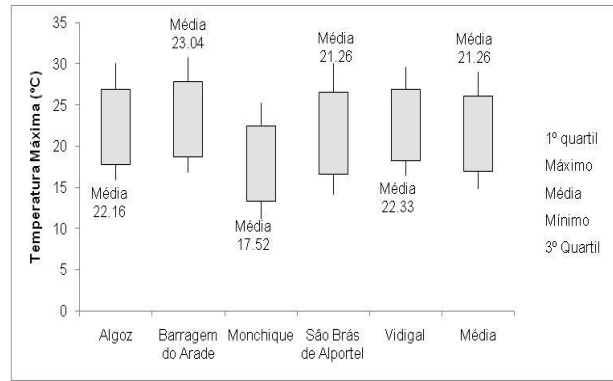


Figura I.2 - Temperatura mínima diária

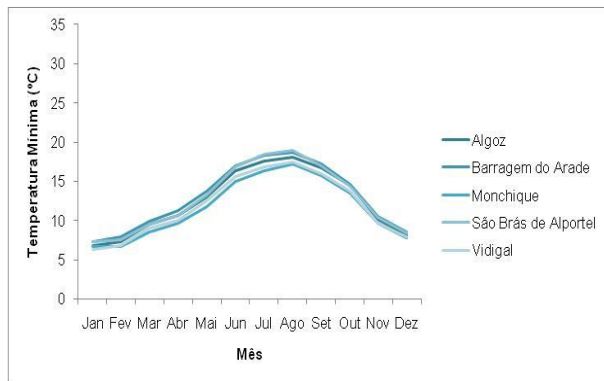


a)

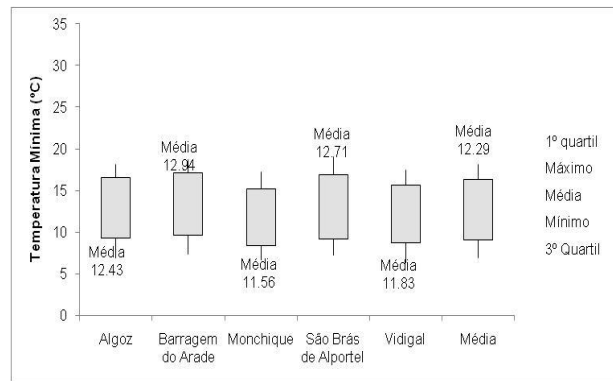


b)

**Figura I.3 - a) Média mensal das temperaturas máximas nas estações em estudo (1998 a 2007);
b) dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil)**



a)



b)

**Figura I.4- a) Média mensal das temperaturas mínimas nas estações em estudo (1998 a 2007);
b) Dispersão de valores (máxima, mínima, média, primeiro quartil e terceiro quartil)**

ANEXO II - DADOS DE HUMIDADE RELATIVA

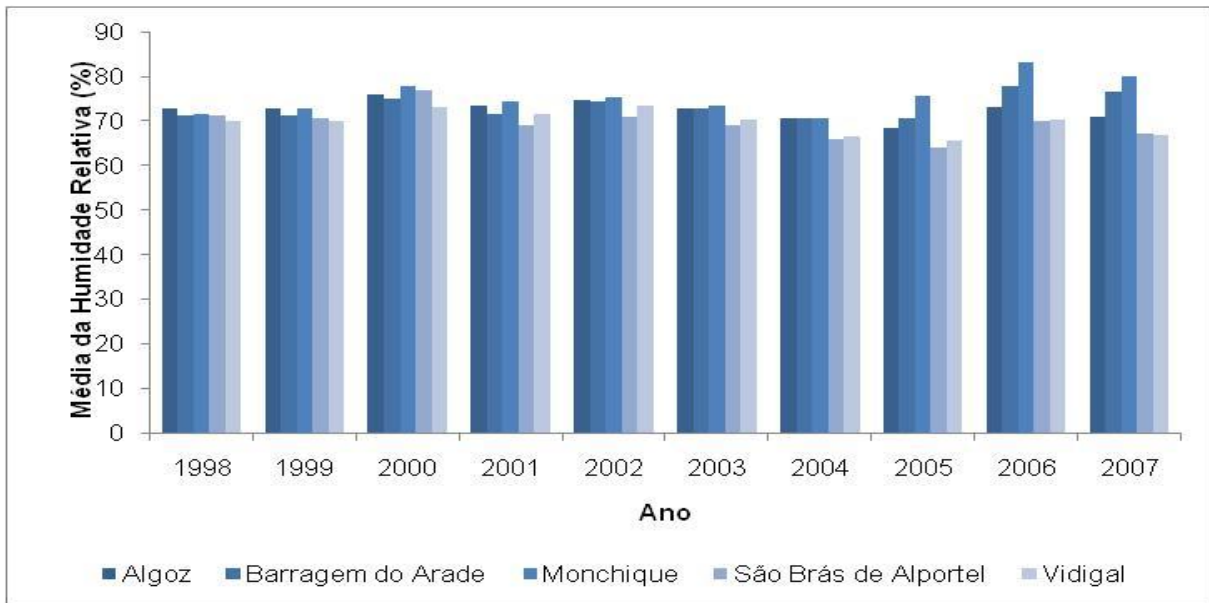


Figura II.1 - Média da humidade relativa anual para as diferentes estações analisadas

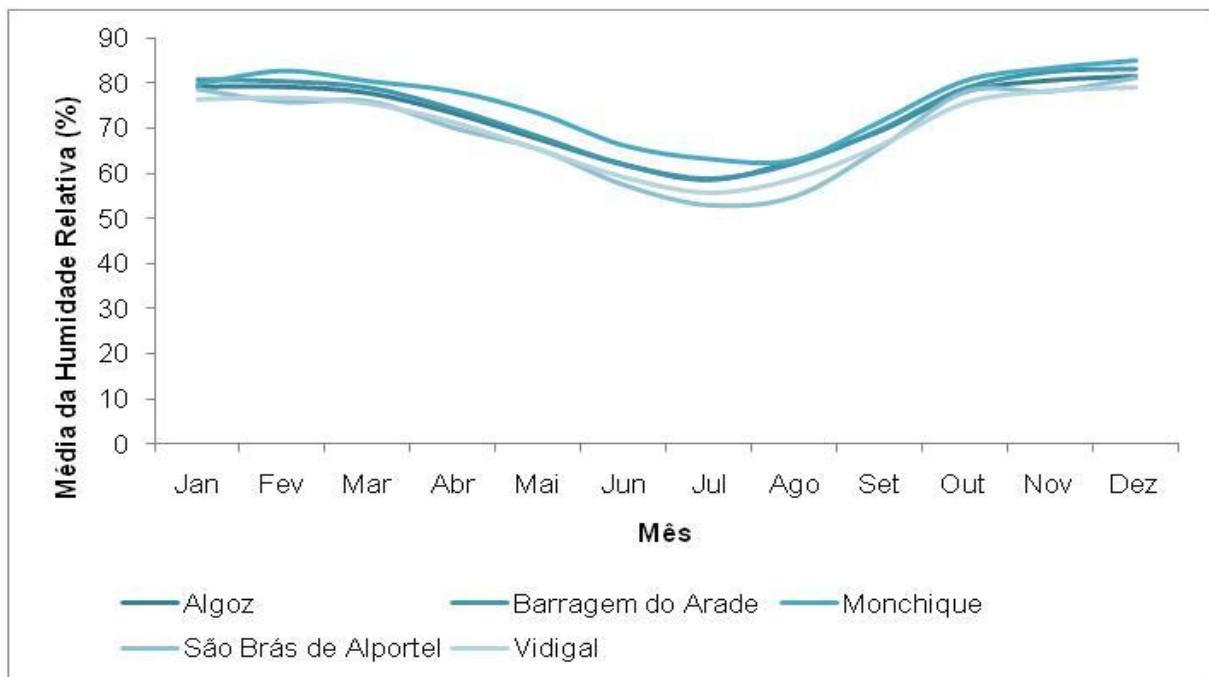


Figura II.2 - Média da humidade relativa mensal para as diferentes estações analisadas

ANEXO III - DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR

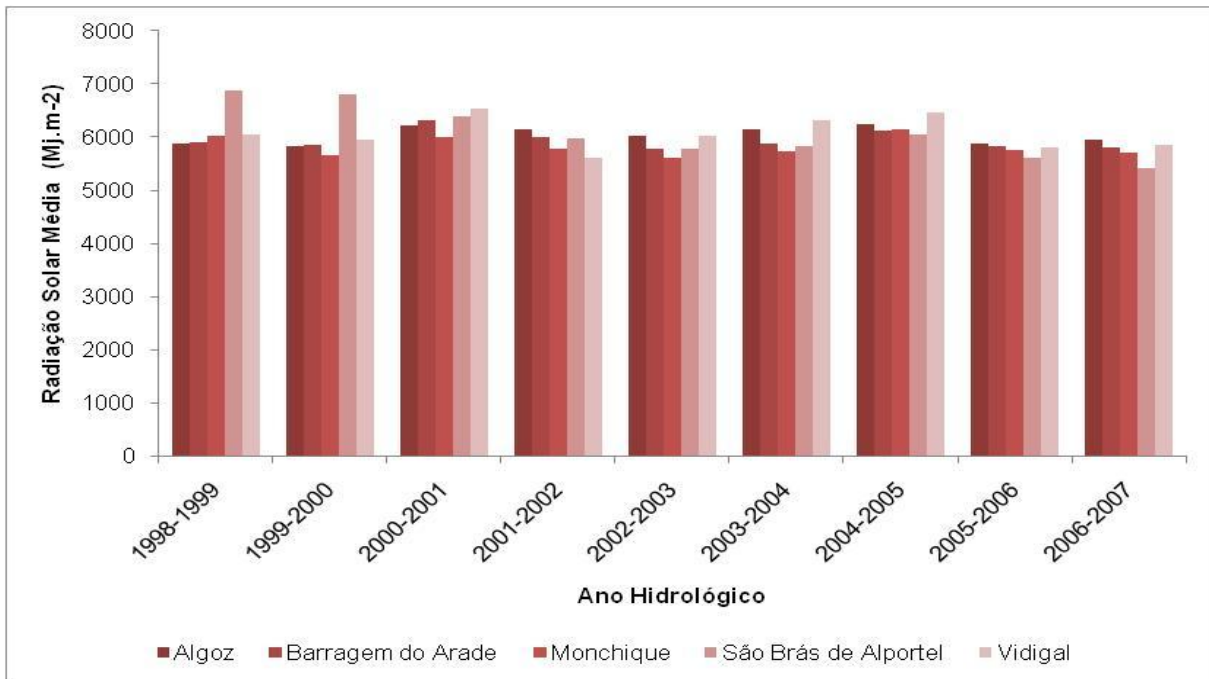


Figura III.1 - Radiação solar média anual para as diferentes estações analisadas

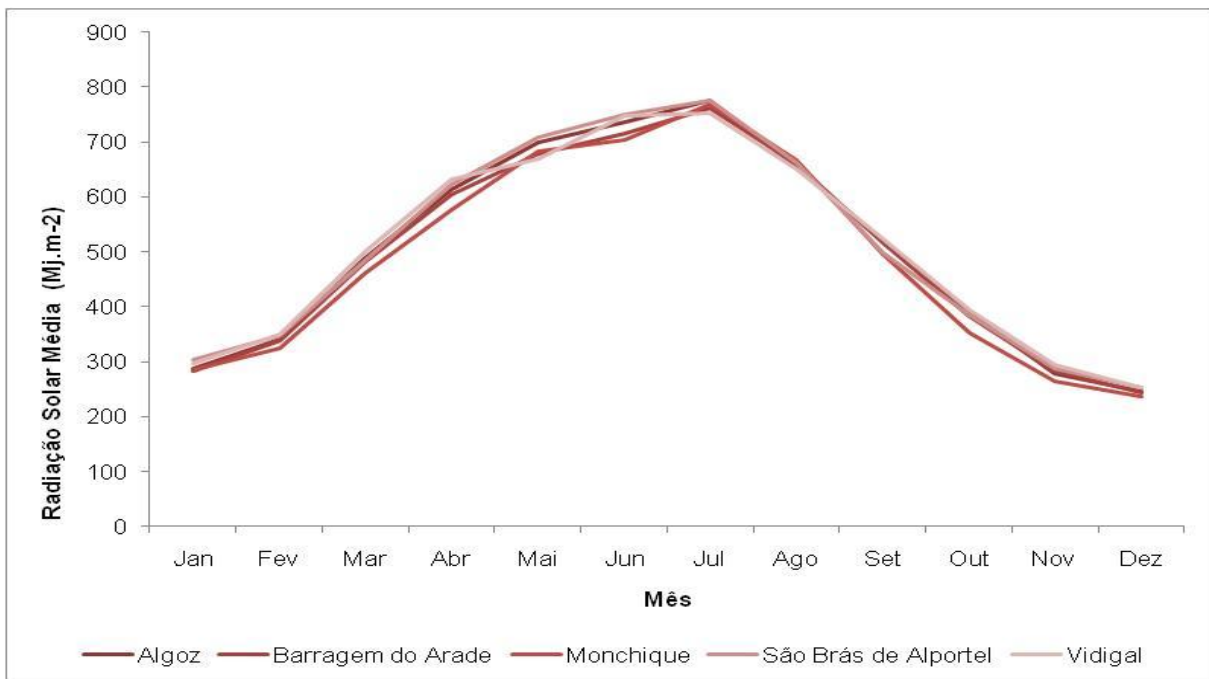


Figura III.2 – Radiação solar média mensal para as diferentes estações analisada

