



Sofia Alexandra da Silva Guerreiro

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

Impacte das Alterações Climáticas na Albufeira de Santa Clara

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente

Orientador: Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos
Coelho, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e
Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues
Vogal(ais): Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho
Prof. Doutor Paulo Alexandre Marques Diogo

Sofia Alexandra da Silva Guerreiro

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

Impacte das Alterações Climáticas na Albufeira de Santa Clara

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente

Orientador: Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos
Coelho, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e
Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues

Vogal(ais): Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho

Prof. Doutor Paulo Alexandre Marques Diogo

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade Nova de Lisboa

Novembro 2013

Impacte das Alterações Climáticas na Albufeira de Santa Clara.

Sofia Alexandra da Silva Guerreiro

Statement of Copyright

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

Agradecimentos

Ao Professor Pedro Coelho, o meu profundo agradecimento pela oportunidade, apoio, disponibilidade, incentivo contínuo, pela paciência e por ter acreditado em mim não só na realização deste trabalho mas durante todo o meu percurso académico na FCT.

Ao Mestre Manuel Almeida por toda a disponibilidade concedida, mesmo nos momentos de mais trabalho.

Aos meus amigos de longa data, Marta, Filipa, Micaela, Daniela, Joana, Valter e Francisco que estiveram sempre presentes na minha vida, nos melhores e nos piores momentos, pelo apoio constante mesmo seguindo caminhos e ideologias diferentes.

Às grandes amizades realizadas na Universidade e em Erasmus por fazerem parte deste percurso e por me deixarem fazer parte do vosso, por todos os momentos passados, lanches e jantares, sempre muito didáticos. Em especial às minhas grandes amigas Maria, Neuza, Carla, Mariana e ao Nuno pela presença constante e pelos momentos de confiança e de distração durante este percurso que sem vocês teria sido muito diferente e muito mais aborrecido.

E finalmente à minha família, avós, tios e primos que sempre estiveram presentes. Um muito obrigado aos meus pais, a quem dedico este trabalho, pelo apoio incondicional, por toda a ajuda para ultrapassar todas as etapas da minha vida, nem sempre concordando mas sempre apoiando e que sem eles nada teria sido possível.

Ao meu irmão, Leonardo (Nardo), a minha grande companhia nos passeios de bicicleta, sempre a reclamar. Por toda a paciência, confidências, apoio, e também por todos os desentendimentos e brincadeiras passadas que foram essenciais à minha sanidade.

Resumo

A albufeira de Santa Clara é uma albufeira que abastece dois concelhos no Alentejo. O seu principal uso é o abastecimento, quer a nível de rega, quer a nível industrial e doméstico. É também utilizada como local de recreio, principalmente nos meses de Verão.

Com as alterações climáticas que se fazem sentir cada vez mais no planeta, as massas de água estão a sofrer mudanças ao nível da qualidade da água, principalmente na temperatura da água e no oxigénio dissolvido. A precipitação é outro parâmetro importante, para as disponibilidades de água, sendo dela, em grande parte decorrente, o escoamento de superfície. Este trabalho utiliza dois cenários simulados por dois modelos climáticos, o modelo KNMI e o modelo ETHZ, para dois períodos diferentes, 2021-2040 e 2081-2100, respetivamente. Os dados obtidos por estes modelos são simulados pelo modelo unidimensional de qualidade da água WQRRS, de forma a prever o comportamento do sistema em estudo face aos diferentes cenários.

Os valores retirados dos modelos climáticos permitem concluir que existe uma redução na precipitação e no escoamento de superfície; a temperatura média global e a temperatura da água irão aumentar, principalmente para o último período simulado (2081-2100). Na água estas novas condições irão ter impactes negativos, principalmente ao nível da temperatura que irá sofrer aumentos em cada um dos períodos simulados. Ao nível dos valores de oxigénio dissolvido, a tendência será para a sua diminuição nos meses de inverno e para o seu aumento nos meses de verão, nomeadamente nas camadas superficiais, sendo o período majorante (2081-2100), o período com valores de OD mais elevados.

Palavras-chave: Albufeira Santa Clara, alterações climáticas, modelação, WQRRS, qualidade da água.

Abstract

The lake of Santa Clara is a reservoir that supplies three counties in Alentejo. Its main objective is to supply water for irrigation, industrial and domestic uses. It is also used as a place of recreation, especially during the summer.

The Climate Change is being felt increasingly on the Planet, the watersheds are undergoing changes at the level of water quality, mainly in the water temperature and dissolved oxygen. The precipitation is another important parameter for the availability of water, such as surface runoff. This study uses two scenarios simulated by two climate models, model KNMI and model ETHZ, for two different periods, 2021-2040 and 2081-2100, respectively. The data obtained by these models are simulated by one-dimensional model of water quality WQRRS, to predict the behavior of the system in relation to different scenarios.

The values taken from climate models allow us to conclude that there is a reduction in rainfall and flow rates and the average global temperature and the water temperature will increase, especially for the last simulated period (2081-2100). In water these new conditions will have negative impacts, especially in the temperatures which will suffer increases in each simulated period. The dissolved oxygen values, will tend to decrease in the winter months and increase during the summer months, namely at surface levels, and the upper bound period (2081-2100), will be the period with the highest OD values.

Keyword: Albufeira Santa Clara, climate change, modelling, WQRRS, water quality.

Índice de Matérias

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento do tema.....	1
1.2.	Objetivos	3
1.3.	Estrutura do trabalho	4
2.	Pesquisa bibliográfica	5
2.1.	Modelação.....	5
2.2.	Modelos unidimensionais.....	6
2.3.	WQRRS.....	8
2.4.	Estratificação térmica.....	9
2.5.	Limnologia	11
2.5.1.	Efeitos da Alterações Climáticas na Limnologia	11
2.6.	Poluição.....	11
2.7.	Eutrofização	14
2.8.	Qualidade da água	16
2.9.	Alterações Climáticas.....	18
2.10.	AC a nível Internacional	20
2.11.	AC a nível nacional	22
2.12.	AC e os Recursos hídricos	23
2.13.	Modelação Climática.....	25
2.13.1.	Modelos Climáticos Regionais.....	28
3.	Descrição dos modelos.....	31
3.1.	WQRRS.....	31
3.1.1.	Representação conceptual	33
3.1.2.	Alocações das afluências e tomadas de água	34
3.1.3.	Advecção vertical	37
3.1.4.	Difusão efetiva	37
3.1.5.	Relações de temperatura e qualidade da água	39
3.1.6.	Análise térmica.....	42
3.1.8.	Constituintes biológicos e químicos considerados pelo WQRRS	45

3.2.	Modelos Climáticos.....	46
4.	Principais características da Albufeira de Santa Clara	49
4.1.	Características da Albufeira	49
4.2.	Qualidade da água	52
4.3.	Clima da Albufeira de Santa Clara.....	56
4.3.1.	Precipitação	57
4.3.2.	Temperatura média do ar.....	58
4.3.3.	Temperatura à superfície da água.....	59
4.3.5.	Temperatura do Ponto de Orvalho	60
4.3.6.	Radiação	61
4.3.7.	Nebulosidade	62
4.3.8.	Humidade Relativa do Ar.....	63
4.3.9.	Velocidade do vento.....	63
5.	Caso de estudo. Implementação dos modelos	65
5.1.	Introdução.....	65
5.2.	Definição dos cenários	65
5.3.	Dados necessários ao Funcionamento do modelo	66
5.3.1.	Período de simulação.....	66
5.3.2.	Representação Conceptual.....	66
5.3.3.	Caudais	68
5.3.4.	Qualidade das Afluências	69
5.3.5.	Dados meteorológicos	71
6.	Resultados obtidos e Discussão.....	75
6.1.	Situação A	75
6.1.1.	Temperatura.....	75
6.1.2.	Oxigénio Dissolvido.....	79
6.2.	Situação B - Avaliação da Temperatura e do OD a partir do aumento da temperatura média anual	83
6.2.1.	Temperatura.....	83
6.2.2.	Oxigénio Dissolvido.....	86
6.3.	Discussão dos Resultados.....	89
7.	Conclusão e perspectivas de desenvolvimentos futuro	93
8.	Referências	95

Índice de Figuras

Figura 2.1: Alternância das fases de estratificação térmica e de mistura completa (Fonte: Coelho, 2009)	10
Figura 2.2: Evolução das concentrações dos GEE nas últimas décadas. (Fonte: Sousa, 2009)	19
Figura 2.3: Médias globais do aquecimento da superfície produzidas por vários modelos. (Fonte: IPCC).....	21
Figura 2.4: Representação esquemática dos cenários (Fonte: adaptado do SIAM II in Sousa, 2009)	26
Figura 3.1: Representação Conceptual de uma albufeira estratificada (Fonte: Coelho, 2009)	33
Figura 4.1: Albufeira de Santa Clara: localização e área drenante (fonte: INAG, 2011).....	49
Figura 4.2: Fotografia da Barragem de Santa Clara (fonte: http://cnpgb.inag.pt).....	52
Figura 4.3: Identificação da estação de monitorização de qualidade da água (Fonte: SNIRH)	53
Figura 4.4: Classificação disponível para a albufeira de Santa Clara (Fonte: SNIRH).....	53
Figura 4.5: Evolução da precipitação média mensal ao longo do ano (mm)	57
Figura 4.6: Evolução da temperatura média mensal (°C) ao longo do ano	58
Figura 4.7: Evolução dos valores médios mensais para a temperatura da água (°C)	60
Figura 4.8: Evolução da temperatura média do ponto de orvalho (°C)	61
Figura 4.9: Evolução dos valores médios mensais da radiação solar (W/m ²).....	62
Figura 4.10: Evolução dos valores médios mensais de nebulosidade (0-10)	62
Figura 4.11: Evolução dos valores médios mensais da Humidade Relativa (%)	63
Figura 4.12: Evolução dos valores médios mensais da Velocidade do Vento (m/s).....	64
Figura 5.1: Curvas características da albufeira de Santa Clara. A: Volumes Armazenados; B: Áreas Inundadas	67
Figura 6.1: Perfis de Temperatura. A: Janeiro; B: Fevereiro	76
Figura 6.2: Perfis de Temperatura. A: Março; B: Abril	76
Figura 6.3: Perfis de Temperatura. A: Maio; B: Junho	77
Figura 6.4: Perfis de Temperatura. A: Julho; B: Agosto.....	77
Figura 6.5: Perfis de Temperatura. A: Setembro; B: Outubro	77
Figura 6.6: Perfis de Temperatura. A: Novembro; B: Dezembro	78
Figura 6.7: Perfis de OD. A: Janeiro; B: Fevereiro.....	80
Figura 6.8: Perfis de OD. A: Março; B: Abril.....	80
Figura 6.9:Perfis de OD. A: Maio; B: Junho.....	80
Figura 6.10: Perfis de OD. A: Julho; B: Agosto	81
Figura 6.11: Perfis de OD. A: Setembro; B: Outubro	81
Figura 6.12: Perfis de OD. A: Novembro; B: Dezembro	81
Figura 6.13: Perfis de Temperatura. A: Janeiro; B: Fevereiro	84

Figura 6.14: Perfis de Temperatura. A: Março; B: Abril	84
Figura 6.15: Perfis de Temperatura. A: Maio; B: Junho	84
Figura 6.16: Perfis de Temperatura. A: Julho; B: Agosto.....	85
Figura 6.17: Perfis de Temperatura. A: Setembro; B: Outubro.....	85
Figura 6.18: Perfis de Temperatura. A: Novembro; B: Dezembro	85
Figura 6.19: Perfis de OD. A: Janeiro; B: Fevereiro.....	87
Figura 6.20: Perfis de OD. A: Março; B: Abril.....	87
Figura 6.21: Perfis de OD. A: Maio; B: Junho.....	87
Figura 6.22: Perfis de OD. A: Julho; B: Agosto.....	88
Figura 6.23: Perfis de OD. A: Setembro; B: Outubro	88
Figura 6.24: Perfis de OD. A: Novembro; B: Dezembro	88

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação do estado trófico nas albufeiras.....	16
Tabela 2.2: Classes de qualidade da água	16
Tabela 2.3: Categorias de qualidade da água	17
Tabela 3.1: Modelos Climáticos Regionais – ENSEMBLES	47
Tabela 4.1: Características da barragem de Santa Clara	50
Tabela 4.2: Parâmetros responsáveis pela classificação da qualidade da água entre 1995 e 2011, na estação albufeira de Santa Clara.....	54
Tabela 4.3: Valores médios dos parâmetros da qualidade da água	55
Tabela 4.4: Valores máximos dos parâmetros da qualidade da água	55
Tabela 4.5: Valores mínimos dos parâmetros da qualidade da água.....	55
Tabela 4.6: Descrição das estações meteorológicas.....	57
Tabela 5.1: Caudais médios mensais afluentes para os três cenários simulados.....	69
Tabela 5.2: Qualidade média das afluências utilizadas nos três cenários	70
Tabela 5.3: Dados Meteorológicos para o período 1989-2008	71
Tabela 5.4: Dados Meteorológicos para o período 2021-2040 simulado pelo MCR KNMI	72
Tabela 5.5: Dados Meteorológicos para o período 2081-2100 - MCR ETHZ.....	73

Lista de Abreviaturas

AC – Alterações Climáticas

CH₄ – Metano

CO₂ – Dióxido de Carbono

CQO – Carência Química de Oxigénio

GEE – Gases com Efeito de Estufa

HFC – Hidrofluorcarbonetos

INAG – Instituto Nacional da Água

IPCC – Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas

MCG – Modelo Climático Global

MCR – Modelo Climático Regional

N₂O – Óxido Nitroso

NMC – Nível de Máxima de Cheia

Nme – Nível Mínimo de Exploração

NPA – Nível de Pleno de Armazenamento

OMM – Organização Mundial Meteorológica

OD – Oxigénio Dissolvido

P – Fósforo total

PFC – Perfluorcarbonetos

PNAC – Plano Nacional das Alterações Climáticas

PNUA – Programa das Nações Unidas para o Ambiente

POASC – Plano de Ordenamento da Albufeira de Santa Clara

RQA – Rede de Qualidade da Água

SF₆ – Hexafluoreto de enxofre

SIAM – Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

SST – Sólidos Suspensos Totais

WQRRS – *Water Quality for River – Reservoir Systems*

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Na década de 1960, em resultado do aumento das preocupações ambientais nos países desenvolvidos, surgiram também as preocupações em relação à qualidade da água disponível. Desta forma, a atenção dos países desenvolvidos focou-se no objetivo de dispor de água em quantidade e com a qualidade adequadas aos fins a que se destina (Coelho, 2009).

Atualmente, a água e os recursos hídricos são considerados um fator de desenvolvimento sustentável (Coelho, 2009), para o qual é necessária uma gestão integrada do recurso. O conceito de desenvolvimento sustentável tem vindo a ter várias definições ao longo dos anos. Numa primeira fase foi definido que “para o desenvolvimento ser sustentável tem de ter em conta fatores sociais e ecológicos, assim como os fatores económicos” (IUCN, UNEP and WWF, 1980 in Moldan *et al.*, 2012). Em 1987 o relatório de Brundtland fornece outra definição, que é ainda a utilizada na atualidade, e que refere o seguinte: “O desenvolvimento sustentável satisfaz as necessidades das gerações presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” (WCED, 1987 in Moldan *et al.*, 2012).

Existem muitas evidências de que o clima está a mudar no nosso planeta, causando eventos extremos como as secas e as cheias agravando a escassez e deterioração dos recursos hídricos, uma situação de seca pode intensificar situações onde exista um desequilíbrio entre a disponibilidade natural e utilização (Coelho, 2009; Vivas, 2010). Diversos especialistas referem que estes eventos se devem, pelo menos em parte, às Alterações Climáticas (AC) que, por sua vez parecem ter uma forte ligação à poluição antropogénica, através da emissão dos gases com Efeito de Estufa (GEE) que afetam todo o planeta, influenciando os processos hidrológicos e biogeoquímicos nas bacias hidrográficas e, por isso, a correspondente qualidade da água (Sousa, 2009).

As AC têm tido consequências à escala global, nacional e local, pelo que as bacias hidrográficas, independente da sua dimensão, estão sujeitas a esses efeitos, nomeadamente em função da alteração das zonas inundadas, dos valores de escoamento e da capacidade de transporte sólido, determinando potenciais alterações sobre as espécies dependentes desses sistemas. Ao nível da qualidade das massas de água também são expectáveis alterações, nomeadamente ao nível da temperatura, parâmetro que influencia muitos outros descritores dessa qualidade (Sousa, 2009). Assim, os estudos do efeito das AC sobre os recursos hídricos deverão ser aprofundados, nomeadamente para suportarem a definição de medidas de adaptação, para o que é essencial a utilização de modelos de simulação, que permitam quantificar a magnitude das expectáveis alterações.

Na ajuda ao combate destes desequilíbrios é necessário a aplicação de vários métodos e programas de diferentes áreas científicas. Desta forma, numa tentativa de mitigar e prever estas repercussões, recorre-se aos modelos matemáticos, que permitem uma maior análise dos recursos hídricos e uma consequente compreensão dos seus estados, bem como uma previsão do seu futuro que permita encontrar soluções mais eficazes ao combate da deterioração da qualidade da água (Silva *et al.*, 2002; Coelho, 2009).

Os modelos de qualidade da água devidamente ajustados, calibrados e validados para o sistema em que vão ser aplicados constituem uma ferramenta muito útil na avaliação das massas de água e na análise da variação dos parâmetros descritores da qualidade da água das massas de água em estudo (Silva *et al.*, 2002).

Esta dissertação foi desenvolvida para a obtenção do grau de mestre em engenharia do ambiente pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e consiste na aplicação de modelos matemáticos de previsão da qualidade da água na Albufeira de Santa Clara no Rio Mira.

Esta albufeira está distribuída por dois concelhos do Alentejo (Odemira e Ourique) e tem como finalidade a rega, abastecimento industrial e abastecimento à população. Tem tido uma grande procura para fins recreativos e de lazer desde o início da década de oitenta e, da mesma forma, durante todo o ano serve de lugar para a pesca, banhos e natação, navegação recreativa a remo e à vela, navegação a motor e competições recreativas (INAG, 2006). Uma vez das principais origens de água destes concelhos, há uma grande preocupação em saber se a qualidade da água da Albufeira da Santa Clara irá ser alterada pelo agravamento das alterações climáticas e qual a magnitude dessas alterações.

As albufeiras são lagos de origem artificial que têm como principal objetivo o armazenamento de água para diversos fins. Contudo, cada vez mais tem aumentado o número de albufeiras com problemas relacionados com a qualidade de água, função da afluência de cargas poluentes de origem tónica e de origem difusa. Estes problemas podem ser agravados pelo comportamento típico de albufeiras em regimes temperados, nomeadamente durante os períodos de estratificação térmica. A degradação da qualidade da água pode causar problemas quer na própria albufeira quer no rio a jusante da mesma (Coelho, 2009).

Esta Dissertação foi desenvolvida com base na utilização de um modelo matemático unidimensional de simulação de qualidade da água de albufeiras, contribuindo para prever as mudanças que as Alterações Climáticas poderão provocar nas massas de água lenticas.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é avaliar a qualidade da água da Albufeira de Santa Clara através da previsão, identificação e compreensão dos impactos das alterações climáticas sobre esse sistema de recursos hídricos, através dos descritores precipitação e temperatura. A gama de variação da temperatura foi escolhida de acordo com "Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II". Foi escolhido o ano de 2100 como ano limite da modelação do impacto das alterações climáticas, uma vez que é o ano que o IPCC (Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas) utiliza nos seus estudos e previsões sobre as alterações climáticas.

Para tal foi necessário avaliar três cenários com diferentes temperaturas e diferentes regimes de escoamento para a bacia hidrográfica em estudo, para três períodos distintos, utilizando dois modelos climáticos diferentes e avaliar as suas potenciais consequências. Para a realização desta simulação foi utilizado o modelo unidimensional de simulação da qualidade da água WQRRS (Water Quality for River Reservoir Systems), desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC). Os dados climáticos utilizados para alimentar a simulação são resultado de uma média dos últimos 20 anos e foram produzidos pelo Instituto Dom Luiz da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Os parâmetros descritores mais importantes neste tipo de análise são a temperatura e o oxigénio dissolvido (OD). A temperatura das massas de água é um parâmetro que influencia todas as reações químicas e, direta e indiretamente, todos os outros descritores. Consequentemente, diversas transformações ou efeitos que ocorrem no meio aquático vão ser alterados pelo aumento da sua temperatura, tais como as capacidades de dissolução, de solubilização, de evaporação e o potencial de depuração.

O oxigénio dissolvido é um parâmetro com muita relevância na análise da qualidade da água uma vez que a concentração de OD nas massas de água, sendo o resultado de várias fontes e sumidouros, é um bom indicador do seu estado de qualidade.

A metodologia utilizada nesta dissertação, de forma a atingir os objetivos do estudo em causa, passou pela caracterização de várias fases:

- Seleção do caso de estudo e do modelo a utilizar tendo em conta o objetivo do trabalho.
- Obtenção e cálculo dos dados necessários à aplicação do modelo, bem como a calibração e validação dos respetivos resultados.

- Definição de diferentes cenários a estudar e respetivos dados, assim como o tratamento dos resultados obtidos pelo programa de simulação.
- Análise dos dados e obtenção de conclusões extraídas através do estudo realizado.

1.3. Estrutura do trabalho

A estrutura adotada neste trabalho é constituída por vários capítulos e subcapítulos em que cada um contém os seus respetivos gráficos, figuras e tabelas. Esta dissertação foi dividida em sete capítulos, que foram definidos de forma a facilitar a leitura e em que ao longo dos quais se faz uma síntese das conclusões obtidas.

O capítulo 1 é constituído pela presente introdução, que contém o enquadramento do tema em estudo, o objetivo do trabalho realizado e uma apresentação de como o texto se encontra organizado.

O capítulo 2 consiste na pesquisa bibliográfica sobre o funcionamento e evolução da modelação matemática unidimensional e sobre o modelo utilizado - WQRRS. Realizou-se uma breve revisão sobre estratificação térmica, os estudos limnológicos, tipos de poluição, eutrofização, qualidade da água e fez-se também uma revisão bibliográfica de publicações relacionadas com alterações climáticas, nomeadamente sobre as previsões relativas ao aumento da temperatura, até ao ano 2100 e em Portugal continental, e sobre os modelos climáticos utilizados em vários estudos.

No capítulo 3 procedeu-se a uma descrição sobre o modelo utilizado no trabalho desenvolvido, ao nível das simulações realizadas sobre a qualidade da água na albufeira, e sobre os modelos climáticos utilizados na produção de novos cenários.

No capítulo 4 são apresentadas as características da bacia hidrográfica do rio Mira e a descrição da albufeira selecionada para a realização do caso de estudo, assim como as condições da qualidade da água e condições meteorológicas consideradas.

No capítulo 5 é realizada a descrição sobre os dados de entrada necessários ao funcionamento do modelo e a sua obtenção. Descrevem-se também os cenários analisados.

No capítulo 6 são analisados os resultados obtidos através da simulação e são discutidos os resultados.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais do trabalho e a perspetiva futura para de forma a enriquecer outros trabalhos que apresentem o mesmo âmbito e ainda apresentando algumas possibilidades de estudos a realizar

2. Pesquisa bibliográfica

2.1. Modelação

Os modelos matemáticos são uma ferramenta muito útil na área da qualidade dos recursos hídricos (Duarte *et al.*, 2000). Esta ferramenta de engenharia pode ser utilizada nos mais variados projetos e tem sido utilizada em vários casos de estudo por todo o mundo na avaliação da qualidade dos recursos hídricos.

A modelação matemática permite identificar e simular diferentes cenários. Assim sendo, é possível proceder à realização de uma avaliação entre cenários, que permite um melhor conhecimento das massas de água e a formulação de previsões mais credíveis dos efeitos da potencial degradação da qualidade da água. Em alguns casos, pode contribuir para analisar e perceber o resultado das soluções a implementar ou já implementadas. A modelação pode ser considerada como uma ferramenta que fornece a informação que os dados existentes sobre caso de estudo em análise não fornecem (Bola, 2009).

Estes modelos da qualidade da água são ferramentas que permitem a representação de processos que gerem a evolução do tempo ou a variabilidade espacial de diferentes variáveis, como é o caso das características físicas, nomeadamente o pH, a temperatura e a condutividade, assim como outras substâncias, como poluentes químicos ou microbiológicos (Silva *et al.*, 2002).

O bom uso dos modelos matemáticos implica uma correta utilização por parte do utilizador assim como alguma experiência e conhecimento sobre o seu funcionamento. Os modelos corretamente calibrados e validados, e tendo em atenção as suas limitações, podem ser uma ferramenta muito útil na avaliação das massas de água a vários níveis, como prevenção da poluição e da eutrofização, combate à sobre-exploração do recurso e formulação de novas medidas corretivas (Duarte *et al.*, 2000).

Permitem avaliar a eficiência de programas para o combate da poluição e a previsão do estado das massas de água após implementação das medidas aplicadas, tanto para o controlo de fontes difusas ou de fontes tóxicas, assim como as determinadas por efluentes urbanos e industriais (Silva *et al.*, 2002).

A Diretiva Quadro da Água introduziu um novo conceito de qualidade ecológica, de forma a ter uma avaliação mais abrangente para os recursos, uma vez que as águas superficiais apresentam valores elevados de poluição (Diretiva 2000/60/CE de 22 de Dezembro).

As exigências de qualidade e de quantidade de água numa bacia hidrográfica conduziram à necessidade de um novo sistema de avaliação de qualidade da água superficial que levou à adoção de uma nova abordagem “*state – pressure - response*”, que permite avaliar o impacto das atividades humanas na qualidade da água (Oliveira *et al.*, 2006).

As massas de água superficiais de uma bacia hidrográfica são submetidas a várias pressões resultantes das atividades antropogénicas, o que implica a necessidade de metodologias que permitam a monitorização da qualidade da água para uma avaliação do seu estado e a previsão das futuras pressões que poderão vir a afetar a bacia (Oliveira *et al.*, 2006; Bola, 2009).

Grande parte dos atuais modelos conceptuais para a construção de sistemas de indicadores são baseados no modelo “*Pressure – State - Response*” que foi também adotado pela OCDE. Este modelo permite explicar as relações causa-efeito entre as atividades humanas que exercem pressões sobre as massas de água e consequentes alterações e a respetiva resposta da sociedade a essas alterações (Oliveira *et al.*, 2006).

Esta abordagem é composta por três partes com diferentes tipos de indicadores: de pressão, de estado e de resposta. Os indicadores de pressão avaliam e descrevem as pressões de origem humana sobre o ambiente e as alterações que provocam na qualidade da água. Os indicadores de estado têm como finalidade a caracterização dos recursos e do ambiente a nível global e imediato. Os indicadores de resposta têm como objetivo verificar os esforços feitos pela sociedade sobre as alterações no ambiente (Oliveira *et al.*, 2006).

O principal objetivo da utilização de qualquer modelo matemático de simulação da qualidade da água é o de produzir um instrumento que tenha a capacidade de descrever o comportamento do sistema, em termos de hidrodinâmica e de qualidade da água (Coelho, 2009).

Os modelos permitem simular o comportamento físico, químico ou biológico das albufeiras, e podem ser modelos a zero, uma, duas ou três dimensões. Os modelos bidimensionais e tridimensionais são mais complexos e requerem uma vasta gama de dados, comparativamente aos modelos unidimensionais, que são mais simples e permitem prever a evolução, ao longo do tempo e da coluna de água, da albufeira ou lago que apresente estratificação térmica estável, embora não disponham da capacidade de discretização espacial associada aos modelos bidimensionais ou tridimensionais (Silva *et al.*, 2002; Coelho, 2009).

2.2. Modelos unidimensionais

O grande desenvolvimento da modelação matemática está relacionado com o aumento da preocupação ambiental, por volta da década de 1960. Quando os lagos e albufeiras começaram a

apresentar grandes níveis de eutrofização, devido ao grande aumento de nutrientes nas massas de água degradando-a, esta passou a ser vista como algo a combater, sendo necessário encontrar formas de atingir esse objetivo. Posteriormente, de forma a avaliar a eficiência destas soluções foi necessário investir em técnicas e metodologias de simulação, que permitissem analisar o comportamento dos sistemas (Coelho, 2009).

Uma dessas técnicas é a modelação matemática unidimensional, que tem a capacidade de prever a evolução do regime térmico ao longo do tempo e da coluna de água de um lago ou albufeira (Coelho, 2009).

No início começaram por existir duas abordagens diferentes de modelação, que se foram unindo ao longo do tempo, suportadas na avaliação da qualidade da água e da ecologia da massa de água (HEC, 1978).

A WRE (“*Water Resources Engineers*”) e o MIT (“*Massachusetts Institute of Technology*”) desenvolveram modelos unidimensionais de massas de água estratificadas, para descrever o seu regime térmico e, posteriormente, a sua qualidade. Os modelos de Vollenweider incidiram primeiramente sobre o balanço de nutrientes na massa de água ao nível ecológico. Estas duas abordagens foram-se unindo dando origem a uma terceira mais completa utilizando as características de um e de outro modelo, dando origem assim a um modelo mais eficaz na descrição do comportamento das massas de água (Coelho, 2009).

Para lagos ou albufeiras com um tamanho inferior a 50 km de comprimento a aplicação dos modelos unidimensionais para a estrutura térmica é satisfatória, desde que a massa de água seja bem estratificada (Coelho, 2009). O critério mais indicado para fornecer alguma informação sobre a aplicabilidade da aproximação unidimensional é o número de Froude densimétrico. Para massas de água profundas bem estratificadas, para as quais esse tipo de modelos são mais indicados, $Fr \ll 1/\pi$, para massas de água com fraca estratificação, $0,1 < Fr < 1,0$, para massas de água em que há mistura completa, $Fr > 1,0$ (HEC, 1978) (ver página 32).

Os modelos unidimensionais demonstram capacidade para descrever as características térmicas anuais, incluindo a estratificação de inverno em lagos dimícticos, mas apresentam algumas dificuldades na descrição do arrefecimento das massas de água que ocorre no outono, prevendo um arrefecimento mais cedo do que aquele que ocorre na realidade. Estes modelos também não são os mais corretos para lagos ou albufeiras com fraca ou nenhuma estratificação (Coelho, 2009).

A conceptualização dos modelos da qualidade da água é igual à dos modelos unidimensionais térmicos, que consiste numa sucessão unidimensional dos elementos de volume de água limitados por planos horizontais e pelos limites da albufeira (Coelho, 2009).

2.3. WQRRS

O *Hydrologic Engineering Center* (HEC) pertencente ao *U.S Army Corps of Engineers*, em conjunto com o *Water Resources Engineers* (WRE) juntaram dois modelos, o modelo de simulação de reservatórios e o modelo de simulação de rio, para formar um modelo capaz de simular a qualidade da água ao nível de uma bacia hidrográfica. Este modelo é capaz de avaliar 18 parâmetros da qualidade da água, químicos, físicos e biológicos em três módulos diferentes, tendo sido designado como *Water Quality for River-Reservoir Systems* (WQRRS) (HEC, 1978).

Em 1976, o HEC em conjunto com a *Resource Management Associates* e *Tetra Tech, Inc*, adicionaram ao WQRRS a capacidade de análise de sistemas de fluxo ramificado e a capacidade de análise da qualidade da água através de novos componentes biológicos. Em 1978 sofreu novamente alterações no seu pré-processador (HEC, 1978).

O WQRRS é constituído por três módulos: o módulo de albufeira, o módulo hidráulico do rio e o módulo da qualidade de água no rio. Os dois primeiros módulos são independentes, podem ser executados, analisados e interpretados de forma autónoma, sendo o último dependente do módulo hidráulico do rio uma vez que não efetua cálculos hidráulicos. Entre o módulo de albufeira e os dois módulos de rio existem muitos subcomandos idênticos ou até mesmos iguais. Os três módulos em conjunto podem ser integrados numa simulação de análise da qualidade da água de uma bacia hidrográfica (HEC, 1978).

O modelo WQRRS em Portugal tem sido aplicado em vários casos de estudos, como por exemplo no estudo realizado para as albufeiras da Bemposta, Vilar e Torrão na bacia do rio Douro (Rodrigues, 1992 in Coelho, 2009) e na albufeira de Cabril na bacia hidrográfica do rio Tejo (Silva, Quadrado e Rodrigues, 1994 in Coelho, 2009). Pelo Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa foi realizado um estudo de simulação, também através da utilização do modelo WQRRS, para a qualidade da água das albufeiras de Castelo Bode, Odeleite, Beliche, Roxo e Alvito, no âmbito do Plano Nacional da Água. Na simulação das diferentes albufeiras o modelo WQRRS mostrou grande capacidade de simulação, obtendo-se bons ajustamentos entre os resultados do modelo e os dados de amostragem disponíveis (Coelho, 2009).

2.4. Estratificação térmica

A qualidade da água de um lago ou albufeira é condicionada pela alternância de períodos de estratificação térmica e por períodos de homogeneização, que são influenciados pelas condições meteorológicas (Fontes, 2010).

O peso específico da água é condicionado pela temperatura e encontra-se no seu máximo quando a água apresenta uma temperatura de 4°C. As temperaturas superiores ou inferiores a 4°C verifica-se uma diminuição do peso específico da água (Coelho, 2009).

Em Portugal, os lagos apresentam estratificação térmica nos meses quentes, uma vez que com o aumento de energia solar recebida à superfície da água a temperatura desta aumenta. Este fenómeno leva a uma diminuição do peso específico da água, dando assim início ao processo de estratificação térmica (Coelho, 2009).

Os lagos em Portugal são designados por lagos monomícticos quentes, que apresentam estratificação térmica durante os meses quentes e homogeneização nos meses frios, e a temperatura da água nunca é inferior a 4°C (Coelho, 2009).

Com o aumento da temperatura nos meses de verão, a estratificação vai-se acentuando dando origem a três camadas distintas, o epilímnio, o metalímnio e o hipolímnio. O epilímnio é a camada mais à superfície da massa de água, que sofre um aumento de temperatura e que por consequência diminui o seu peso específico. O hipolímnio é a camada mais profunda e mais fria com um peso específico maior e menos oxigenada. O metalímnio corresponde à chamada termoclina, que é a camada a que corresponde o gradiente de temperatura mais acentuado com a profundidade, e que normalmente se encontra entre os 5 e os 15 metros de profundidade (Laborde *et al.*, 2012).

O epilímnio é a camada mais arejada uma vez que se mantém sempre em circulação devido ao arejamento natural, tendo também em abundância oxigénio dissolvido. O maior gradiente vertical de oxigénio dissolvido encontra-se mesmo antes da termoclina (Coelho, 2009; Fontes, 2010).

O hipolímnio é a camada mais profunda e fria, e ao longo do tempo pode evoluir no sentido de condições de anoxia, uma vez que não há a renovação de oxigénio. O oxigénio existente nesta camada é consumido na oxidação da matéria orgânica, que vai aumentando e acumulando no fundo da camada. Estas condições ocorrem nas camadas mais profundas dos lagos e albufeiras, mas em condições extremas de matéria orgânica, temperatura e duração da estratificação estas condições podem mesmo chegar até às camadas superiores, como a termoclina (Fontes, 2010).

A termoclina também funciona como uma barreira, impedindo a mistura entre a camada mais à superfície e a camada mais profunda, impedindo a passagem do oxigênio para o hipolímnio.

No outono, com a diminuição de energia solar recebida pela superfície da água, a temperatura do epilímnio começa a diminuir e, também por efeito do vento, a estratificação começa a desvanecer levando a um processo de homogeneização. No final do outono o processo de homogeneização normalmente já está concluído, e o peso específico da água tem valores iguais ao longo de toda a coluna de água. Quanto maior forem as turbulências meteorológicas e as turbulências determinadas pelas afluências naturais, mais depressa as condições de homogeneidade serão restabelecidas. Nessa situação, os níveis de oxigênio dissolvido começam a repor-se ao longo de toda a coluna de água, permitindo a entrada de nutrientes nas camadas superficiais e possibilitando o aparecimento do fitoplâncton (Fontes, 2010).

Na figura 2.1 pode-se observar as diferenças entre as duas fases distintas referidas acima, a fase de estratificação térmica e a fase de homogeneização térmica, ao nível dos parâmetros temperatura e oxigênio dissolvido, ao longo da coluna da água.

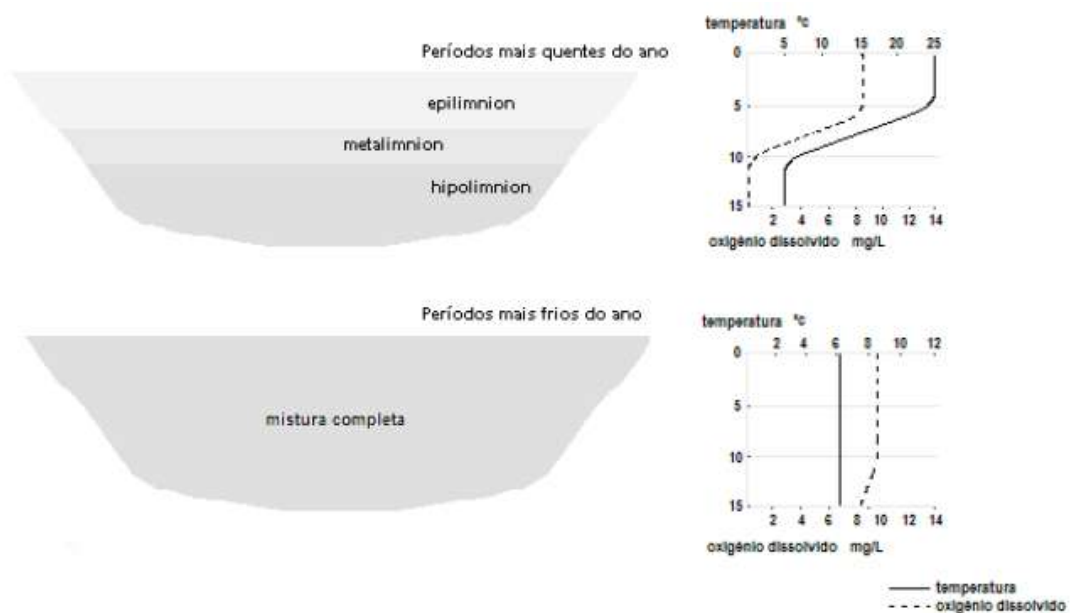


Figura 2.1: Alternância das fases de estratificação térmica e de mistura completa (Fonte: Coelho, 2009)

Na Figura 2.1 pode ser observada a diminuição acentuada do oxigênio dissolvido e da temperatura ao longo da coluna de água, nomeadamente ao longo da camada da termoclina (dos 5 m aos 10 m de profundidade), mantendo-se relativamente constante nas outras duas camadas, epilímnio e hipolímnio. Na mesma Figura, verifica-se que a temperatura se mantém constante para toda a coluna de água, e que o oxigênio dissolvido mantém-se constante durante os 10 primeiros metros de profundidade, apresentando uma pequena diminuição da sua concentração nos últimos 5 metros (10 m aos 15 m).

2.5. Limnologia

A limnologia é definida como a ciência que estuda as águas doces ou salinas dentro das fronteiras continentais (Goldman e Horne, 1983 in Coelho, 2009). É o estudo de todas as características das massas de água consideradas interiores ou continentais. A limnologia abrange as três áreas principais dos ecossistemas aquáticos: física, química e biologia.

As massas de água consideradas interiores ou continentais são os lagos, os rios ou/e os estuários, podendo ser consideradas massas de água lóticicas (águas correntes) ou lênticas (águas paradas). As principais massas de água lóticicas estudadas são os rios e as principais massas de água lênticas são os lagos e albufeiras, que são consideradas lagos artificiais, resultando da construção de aproveitamentos hidráulicos, que determinam a passagem de regime lótico para regime lêntico (Coelho, 2009).

2.5.1. Efeitos da Alterações Climáticas na Limnologia

Com o aumento da temperatura provocado pelas AC, a temperatura média da água deverá subir e perspectiva-se períodos mais longos de estratificação térmica. No que diz respeito às mudanças biológicas, pode ocorrer uma diminuição em relação à quantidade da comunidade algal presente e um aumento do fitoplâncton e no zooplâncton. Estas alterações são observadas cada vez mais nos lagos por todo o mundo, causando mudanças no paradigma da limnologia (Silow, 2009).

A temperatura da água dos oceanos aumentou em média cerca de 0,5°C desde de 1980. A década de 1998-2007, foi a década em que se registou o maior aumento da temperatura da água (Nodvin, 2009 in Silow, 2009). Ao aumentar a temperatura da água, o volume e a temperatura do epilímnio também irão aumentar, e conseqüentemente haverá um aumento na profundidade da termoclina. A concentração de nutrientes também deverá aumentar e, por outro lado, a concentração de oxigénio dissolvido deverá diminuir. Por conseqüência destas alterações, a produção de fitoplâncton irá aumentar e as comunidades de zooplâncton sofrerão alterações na sua composição, o que levará a mudanças no estado trófico dos lagos e albufeiras (Silow, 2009).

2.6. Poluição

As fontes de poluição podem ter duas origens: tópica (pontual) ou difusa. As fontes que têm origem tópica são originadas por descargas em locais específicos, gerando plumas de contaminação, que são facilmente monitorizáveis e onde é possível identificar as cargas de poluentes envolvidas. Este tipo de poluição é geralmente conseqüência das práticas antropogénicas (Patrício, 2008; Reis, 2010).

A poluição de origem difusa é caracterizada pelo tipo de poluição incerta relacionada com as alterações provocadas pelo homem e por fenómenos naturais, como é o caso das primeiras chuvas. Neste caso é difícil identificar o local de emissão, assim como a realização da sua monitorização. Este tipo de poluição está a assumir grande importância na preservação da qualidade dos recursos hídricos superficiais, sendo mesmo considerado como um dos principais fatores impeditivos para a obtenção da qualidade ambientalmente desejável (Castro, 1986; Lourenço 2002 in Diogo *et al.* 2004a). Isto pode ser explicado pelo facto de ser difícil identificar a sua fonte e, conseqüentemente, complexo separá-la da qualidade natural da água (Diogo *et al.*, 2004a).

A área de intervenção do POASC (Plano de Ordenamento da Albufeira de Santa Clara) abrange a superfície do plano de água da albufeira à cota do NPA e a faixa terrestre de 500m de largura que serve de proteção, contada a partir do NPA em projeção horizontal (INAG, 2006; INAG 2011).

As cargas poluentes descarregadas na Albufeira de Santa Clara podem ser de fontes tóxicas ou de fontes difusas. Tendo-se considerado as cargas de origem urbana e industrial como fonte tóxica e como fonte difusa as cargas poluentes de origem agrícola e florestal, as cargas poluentes afluentes à albufeira foram divididas em vários grupos: sector industrial, prática agropecuária e prática agroalimentar, sector urbano e turístico e sector agrícola e florestal (INAG, 2006; INAG 2011).

No POASC foram identificadas várias fontes de poluição pontuais, num total de cerca de 86. A maioria das fontes de poluição pontuais pertence ao sector industrial e são descarregadas diretamente na linha de água, representando cerca de 76% do total de cargas poluentes de origem tóxica afluentes à albufeira, sendo que os restantes 24% pertencem ao sector urbano (INAG, 2006).

O sector industrial nesta zona consiste essencialmente na prática pecuária e na prática agroalimentar. O sector pecuário divide-se em suiniculturas e boviniculturas, enquanto o sector agroalimentar consiste essencialmente em lagares de azeite e fábricas de conserva animal. Existem também padarias, confeitarias, carpintarias e serralharias, apesar de algumas já se encontrarem ligadas aos sistemas de águas residuais, a maioria, cerca de 63%, ainda descarrega diretamente nas linhas de água (INAG, 2006).

Segundo os dados do IV Relatório de Modelação da Albufeira de Santa Clara retirados do estudo “Identificação e caracterização das fontes poluidoras de carácter pontual localizadas em bacias hidrográficas das albufeiras destinadas à produção de água para o consumo e em bacias drenantes para zonas balneares (levantamento realizado entre Agosto e Dezembro de 1999 pela DRAOT Alentejo)”¹ existem 44 origens de poluição industrial, 40 suiniculturas, três boviniculturas e uma

¹ Dos estudos analisados referentes à Albufeira de Santa Clara, os dados do IV Relatório de Modelação da Albufeira de Santa Clara são os mais recentes.

instalação que contém as duas práticas, suinicultura e bovinicultura, sendo que nenhuma das unidades contempla tratamento de águas residuais, assumindo-se assim que todas as cargas poluentes originadas afluem na albufeira (INAG, 2011).

A nível do sector urbano, pelo levantamento realizado pelo POASC, existem 222 estruturas de habitação, tanto isoladas como em núcleos populacionais, inventariadas no concelho de Odemira e no conselho de Ourique, em que 56 delas se situam a menos de 50 m do NPA, zona em que apenas são permitidas infraestruturas que servem de apoio à albufeira. Em mais de 95% destas estruturas não se conseguiu identificar o tipo de tratamento das águas residuais, assumindo-se que são descarregadas diretamente na albufeira (INAG, 2006).

São também identificados no IV Relatório de Modelação da Albufeira de Santa Clara, empreendimentos turísticos na área de intervenção do POASC, e nenhum destes empreendimentos tem tratamento de águas residuais, admitindo-se mais uma vez a entrada das cargas poluentes na albufeira. Estas fontes pontuais têm diferentes dinâmicas de descarga. O sector agropecuário e o sector urbano realizam descargas de forma contínua e apresentam um caudal quase uniforme; no caso do sector agroalimentar as descargas são feitas de forma sazonal (INAG, 2011).

A poluição de origem pecuária, de boviniculturas e suiniculturas, assim como as explorações de ovinos e caprinos, pode também ser considerada uma fonte de poluição difusa. Isto deve-se ao facto do pastoreio que os animais realizam durante o período diurno, de forma livre numa faixa até 500m da massa de água. Estas cargas orgânicas descarregadas na bacia são consideradas um dos principais poluentes que afluem à albufeira (INAG, 2006).

A poluição difusa é essencialmente de origem agrícola, através do escoamento superficial da água proveniente das áreas com produtividade agrícola que contém fertilizantes utilizados em grandes extensões do solo, aumentando assim o número de cargas poluentes afluentes à albufeira e potenciando a eutrofização dessa massa de água. A aplicação de estrume de origem pecuária nos solos, rico em azoto, é outra forma de poluição de origem agrícola (INAG, 2006; Bola, 2009).

A poluição com origem nas atividades de recreio e lazer também afeta a albufeira de Santa Clara. A utilização de motas de água e de barcos a motor libertam hidrocarbonetos e metais pesados diretamente na água, causam turbulência através do funcionamento das hélices, e esta turbulência conduz a uma maior oxigenação da água (INAG, 2006).

A qualidade da água da Albufeira de Santa Clara, segundo o PGBH do Mira, tem uma classificação A3, sendo considerada boa (como pode ser observado na tabela 2.2, secção 2.8). Os parâmetros analisados têm conta os diferentes usos, o consumo humano e a rega (RH6, 2011).

A albufeira em estudo abastece grande parte dos concelhos de Odemira, Ourique tanto no consumo humano, como na rega. É muito importante ter em atenção as várias fontes de poluição, quer difusas, quer pontuais que drenam para a albufeira, e encontrar soluções para o efetivo controlo da qualidade da água. Com o aumento das cargas poluentes sem controlo, a albufeira pode começar a apresentar sinais de eutrofização a médio prazo devido a uma elevada entrada de nutrientes (INAG, 2006).

2.7. Eutrofização

A ocorrência de “*blooms*” de cianobactérias tóxicas em massas de água eutróficas, tem vindo a tornar-se um problema a nível mundial (Carmichael, 2001; Song *et al.*, 2007 in Cao *et al.*, 2011). Nos países em desenvolvimento a eutrofização e a proliferação de algas está a afetar grande parte das albufeiras. Estudos realizados indicam que cerca de 45 000 albufeiras estão afetadas pela eutrofização (Zeng *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2008; Cao *et al.*, 2008a in Cao *et al.*, 2011).

As principais fontes antropogénicas responsáveis pela eutrofização das massas de água são a pecuária, o escoamento de origem urbana e de origem agrícola, os resíduos industriais e os efluentes domésticos. Como resultado de um aumento significativo na concentração de nutrientes (azoto, fósforo) e a abundância de produtores primários, como por exemplo, o fitoplâncton, algas betónicas e macrófitas, a eutrofização ocorreu em muitos ecossistemas de água doce em todo o mundo (Harper, 1992; Biggs, 2000; Wetzel, 2001 in Camargo *et al.*, 2005). Alterações nas condições da qualidade da água como na temperatura, no OD ou no pH, afetam diretamente a abundância dos organismos aquáticos (Camargo *et al.*, 2005).

O fósforo é um dos parâmetros normalmente utilizado para a avaliação do nível trófico das massas de água, sendo considerado um dos principais responsáveis pela eutrofização (Diogo *et al.*, 2004a; Diogo *et al.*, 2008).

O estudo dos fatores que influenciam as descargas de nutrientes nas massas de água é fulcral para a compreensão do fenómeno da eutrofização nos lagos e albufeiras, que tem vindo a aumentar não só nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento (Diogo *et al.*, 2004b).

A eutrofização consiste no envelhecimento das massas de água através da proliferação e do crescimento algal, como consequência da entrada de nutrientes. A eutrofização ocorre como consequência da alteração de um conjunto de fatores como é o caso da temperatura e a luminosidade, tendo em conta a concentração de nutrientes. As causas podem ser naturais ou antropogénicas, embora seja difícil quantificar ao certo a sua origem, devendo-se à dificuldade em contabilizar as afluências naturais de nutrientes, embora a origem mais comum seja a

antropogénica, como os efluentes domésticos, urbanos e industriais e o escoamento de origem agrícola (Diogo *et al.*, 2008).

Nas massas de água, quando há uma descarga de nutrientes, a produtividade primária aumenta, assim como o crescimento algal, sendo muitas vezes um fenómeno irreversível. Normalmente, quando ocorre a entrada de uma significativa descarga de nutrientes, esta é de origem antropogénica, difusa ou pontual (Diogo *et al.*, 2008).

Em Portugal, a poluição difusa é um dos principais fatores que influencia a qualidade das massas de água, embora ainda não existam dados de campo suficientes para uma análise mais detalhada (Lourenço, 2002 in Diogo *et al.*, 2008). No que diz respeito à poluição de origem tónica a sua quantificação é mais fácil de avaliar comparativamente à de origem difusa, cujas fontes ainda estão pouco caracterizadas em Portugal (Diogo *et al.*, 2008). Por outro lado, as emissões difusas são determinadas pela quantidade e distribuição das fontes e pelas condições que afetam o transporte de azoto e fósforo para as massas de água (Wit e Behrendt, 1999 in Diogo *et al.*, 2004b) como visto anteriormente (secção 2.6).

A eutrofização manifesta-se pelo grande crescimento de plantas aquáticas, sendo resultado da concentração de nutrientes presentes no meio. É um processo natural de envelhecimento das massas de água muito lento, quer nos nutrientes disponíveis quer no crescimento algal (Diogo *et al.*, 2008).

A eutrofização não tem repercussões apenas a nível ambiental, tem também a nível da saúde pública, principalmente quando este fenómeno interfere nas variadas utilizações das massas de água, como no abastecimento para o consumo humano. As massas de água eutrofizadas que são utilizadas para o abastecimento urbano necessitam de um tratamento mais dispendioso, de forma a que seja possível cumprir as normas respetivas em termos de qualidade (INAG, 2006).

A eutrofização causa o desaparecimento da fauna existente e o aparecimento de algas e de microrganismos anaeróbios, devido à diminuição de oxigénio dissolvido na água e ao aumento da temperatura. A qualidade da água diminui com o aumento da eutrofização, sendo necessário investir em operações de tratamento complexos com elevados custos de investimento e de operação, para que esta cumpra os requisitos para o consumo humano. Além deste fator, é necessário ter em consideração que a recuperação de um lago ou albufeira eutrofizada é um processo lento (INAG, 2006).

Na tabela 2.1 pode-se observar a classificação do estado trófico nas albufeiras através da avaliação dos parâmetros fosforo total (P), clorofila-a e oxigénio dissolvido (OD), desenvolvido pelo INAG para as massas de água doce superficiais.

Tabela 2.1: Classificação do estado trófico nas albufeiras

Parâmetro	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
Fósforo Total (mgP/m3)	< 10	10 - 35	> 35
Clorofila-a (mg/m3)	< 2.5	2.5 - 10	> 10
OD % de sat.	-	-	< 40

Fonte: INAG

2.8. Qualidade da água

A Diretiva 75/440/CEE transposta para o normativo nacional através do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto fixa, no Anexo I, três níveis de qualidade: A1, A2 e A3 a que correspondem processos distintos para o tratamento de água destinada ao consumo humano.

Tabela 2.2: Classes de qualidade da água

ESQUEMAS DE TRATAMENTO TIPO	
A1	Tratamento físico e desinfeção
A2	Tratamento físico, químico e desinfeção
A3	Tratamento físico, químico, de afinação e desinfeção

Fonte: SNIRH

Os parâmetros que deverão ser analisados para verificação da qualidade da água para produção de água para abastecimento estão agrupados em três categorias:

Tabela 2.3: Categorias de qualidade da água

Categoria		
I	II	III
Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros
pH	Ferro dissolvido	Fluoretos
Cor	Manganês	Boro
Sólidos Suspensos Totais	Cobre	Arsénio
Temperatura	Zinco	Cádmio
Condutividade	Sulfatos	Crómio total
Cheiro	Agentes de Superfície	Chumbo
Nitratos	Fenóis	Selénio
Cloretos	Azoto kjeldahl	Mercurio
Fosfatos	Coliformes totais	Bário
Carência química de oxigénio	Coliformes fecais	Cianeto
Taxa saturação de OD		Hidrocarbonetos dissolvidos ou emulsionados
Carência bioquímica de oxigénio		Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
Azoto amoniacal		Pesticidas – total
		Detergente aniónicos
		Estreptococcus fecais
		Salmonelas

Fonte: SNIRH

Segundo o Anuário de Qualidade Superficial disponibilizado pelo Instituto da Água no SNIRH (2008), a classificação da água tem em conta 14 parâmetros em que é atribuída uma classe de parâmetro a parâmetro. A classificação final de cada parâmetro é determinada pelo segundo valor mais desfavorável (Patrício, 2008).

O INAG, em colaboração com as Direções Regionais, tem vindo a adequar as suas redes de monitorização às novas pressões e exigências. Para isso, foi implementada a rede automática de monitorização da qualidade da água que permite conhecer o estado das massas de água através de cinco parâmetros, nomeadamente, da temperatura, oxigénio dissolvido, pH, condutividade e turvação (SNIRH). A classificação utilizada permite obter informações sobre a potencialidade da água, em que A é a melhor e E a pior:

A
Excelente

Águas com qualidade equivalente às condições naturais, satisfazem potencialmente as utilizações mais exigentes em termos da qualidade.

B
Boa

Águas com qualidade ligeiramente inferior à classe A, e podem satisfazer potencialmente todas as utilizações.

C
Razoável Água com qualidade aceitável, suficiente para irrigação, para usos industriais e produção de água potável após tratamento rigoroso. Permite a existência de vida piscícola mas com reprodução aleatória, e apta para atividades de recreio sem contacto direto.

D
Má Água com qualidade medíocre, apenas potencialmente apta para irrigação, arrefecimento e navegação. A vida piscícola pode subsistir mas de forma aleatória.

E
Muito Má Águas extremamente poluídas e inadequadas para a maioria dos usos.

2.9. Alterações Climáticas

As Alterações Climáticas (AC) podem ser definidas como as alterações das características climáticas (precipitação e temperatura) de uma determinada região, de forma persistente, por um período prolongado (décadas ou superior) (IPCC, 2007).

As AC têm sido um tema amplamente analisado e discutido nos últimos anos, quer ao nível dos meios de comunicação social mais comuns, quer ao nível científico e governamental. Todos os anos são publicados inúmeros livros e artigos, são realizados projetos de investigação e são também cada vez mais as campanhas de sensibilização dedicadas a este assunto. As Alterações Climáticas são consideradas a maior ameaça ambiental do século XXI (Vivas, 2010). Assim sendo, ao nível governamental é exigido às empresas responsabilidade ambiental, para tal são realizados relatórios de sustentabilidade e relatórios para a mitigação das AC.

As AC de origem antropogénica são cada vez mais um problema global, que podem ser originadas por inúmeras atividades de origem humana em todo o mundo, como o transporte, a geração e consumo de eletricidade, a indústria, a desflorestação e o tratamento de resíduos. Os gases com efeito de estufa (GEE) que são produzidos nessas atividades contribuem para um aumento da temperatura em todos os continentes, tendo impactos tanto a nível ecológico como a nível social (Dryzek *et al.*, 2011 in IPCC, 2007; Schmidt *et al.*, 2013).

Os GEE são um dos principais fatores que contribuem para o aumento do aquecimento global do planeta, em que o dióxido de carbono e o metano apresentam os valores mais elevados dos últimos 650 000 anos.

O aquecimento global pode ser explicado pelo efeito de estufa. No sistema climático há um equilíbrio entre a energia emitida e a energia recebida do espaço, e quando há uma libertação em excesso de gases que aumentam a absorção de radiação infravermelha por parte da atmosfera (dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrofluorcarbonetos (HFC), Perfluorcarbonetos

(PFC), hexafluoreto de enxofre (SF_6) e dióxido de azoto (N_2O)) há uma retenção de calor que faz com que exista um aumento na temperatura média do ar, que contribui para o desequilíbrio da energia terrestre (SIAM, 2001).

Por observação ao gráfico da Figura 2.2 depreende-se um aumento significativo das concentrações de GEE nas últimas décadas, e por consequência mudança climática e um aumento da temperatura média global.

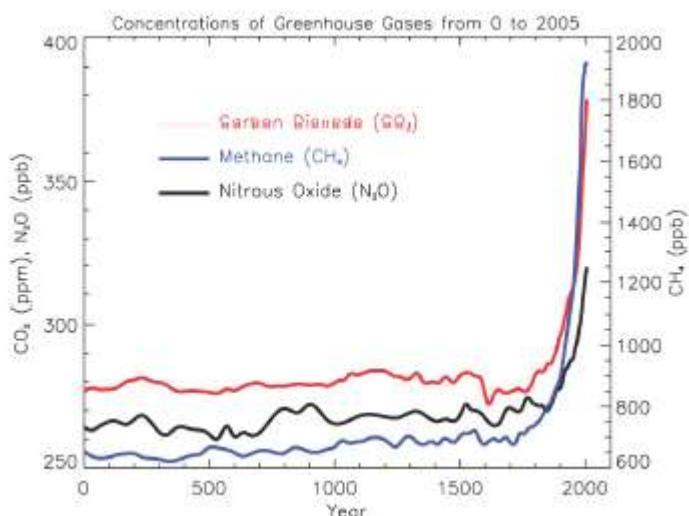


Figura 2.2: Evolução das concentrações dos GEE nas últimas décadas. (Fonte: Sousa, 2009)

As AC são definidas por uma diferença entre os valores observados durante uma longa série temporal (mais de 150 anos) de alguns parâmetros descritores do clima, como a temperatura, precipitação, velocidade do vento, humidade, entre outros, e dos valores médios num determinado intervalo de tempo (algumas décadas). Segundo o Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas (*in* IPCC, 2007) (secção 2.10) alteração climática é: "qualquer mudança no clima durante um período de tempo, independente de ser uma variação natural ou o resultado de atividade humana".

O estudo dos sedimentos no fundo dos rios e oceanos, bem como o estudo e datação de fósseis possibilitou-nos o conhecimento relativo à constante mudança geofísica a que o nosso planeta está sujeito, em escalas de milhares ou milhões de anos. Assim sendo, foi possível distinguir épocas glaciares no passado, da mesma forma que se prevê que estas poderão vir igualmente a ocorrer no futuro. Um dos principais fatores que acelera este processo é a emissão de CO_2 , cujo valor tem vindo a aumentar ao ponto de nunca ter sido registado um valor tão alto desde há 15 milhões de anos atrás.

Os efeitos das AC serão sentidos com mais intensidade nos ecossistemas naturais do que pela sociedade em si (Smith and Tripark, 1989; NAS, 1992 in Smith, 1997). Prevê-se que as espécies migrem, mudem o seu comportamento ou até mesmo mudem geneticamente de forma a se adaptarem às AC que podem ter consequências na vegetação terrestre, sendo crucial para muitas espécies (Smith, 1997).

As AC são ainda referidas pela comunidade científica como sendo responsáveis por episódios extremos, como o caso de alguns desastres naturais que se fazem sentir por todo o mundo, nomeadamente, os tornados, os tsunamis, as cheias e as secas extremas, assim como outros eventos naturais como a mudança dos padrões climáticos e a diminuição dos glaciares. A Antártica é um dos exemplos destes desequilíbrios, que apresentou os maiores valores de sempre de degelo em 2012. Da mesma forma, a Patagónia sofreu uma perda, em 12 anos, de 50% dos campos de gelo por degelo e, conseqüentemente, um aumento do nível das águas do mar.

Desde o início da discussão da problemática relativa às AC, reconheceu-se a possibilidade de alteração dos recursos hídricos, essencialmente, a nível da disponibilidade e da qualidade. Esta alteração faz-se sentir principalmente através da alteração dos fatores climáticos, como por exemplo o aumento da temperatura média do ar e a mudança nos padrões de precipitação, nomeadamente, a diminuição da precipitação anual e a diminuição do número de dias de chuva com um aumento de intensidade (Sousa, 2009).

2.10. AC a nível Internacional

Em 1998, foi criado o Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC), pela Organização Mundial Meteorológica (OMM) em conjunto com o Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA), com o objetivo de avaliar as informações científicas, técnicas e socioeconómicas relevantes para o estudo das AC, como consequência da poluição antropogénica, assim como os seus impactos e novas formas de mitigação e adaptação (IPCC, 2000).

Segundo o relatório publicado em 2000 pelo IPCC, o clima está a mudar em consequência das emissões dos GEE resultantes das atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e a mudança do uso do solo, nomeadamente, a desflorestação. A temperatura média dos últimos 100 anos aumentou cerca de 0,6°C, o que excede a variação observada dos últimos 1000 anos (IPCC in Sousa, 2009). Em relação à precipitação, registou-se uma diminuição da precipitação anual, embora se tenha registado um aumento da precipitação no Hemisfério Norte nas latitudes médias e altas (Sousa, 2009)

As previsões científicas para o clima da Terra no futuro são elaboradas a partir de modelos matemáticos. As previsões que se encontram no IPCC sobre as variações da temperatura dependem da quantidade de GEE que serão emitidos. Os cenários simulados projetam um aumento de GEE nos próximos 100 anos, em que o aumento da temperatura média superficial da terra será de cerca de 1,4 a 5,8° C entre os anos 1900 e 2100. A precipitação irá ter alguns decréscimos locais e aumento de episódios de precipitação intensa, aumento de episódios de fenómenos climáticos extremos e aumento no nível médio do mar entre 1990 e 2100 (Sousa, 2009)

Em 2007 o IPCC lançou o seu quarto Relatório de Avaliação, onde evidência um aumento de temperaturas médias globais do ar e dos oceanos. Na figura 2.3 estão representados vários cenários simulados para o aquecimento superficial do planeta por vários modelos de simulação, para alguns modelos de emissões do *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) (secção 2.13), que se encontram no quarto relatório do IPCC.

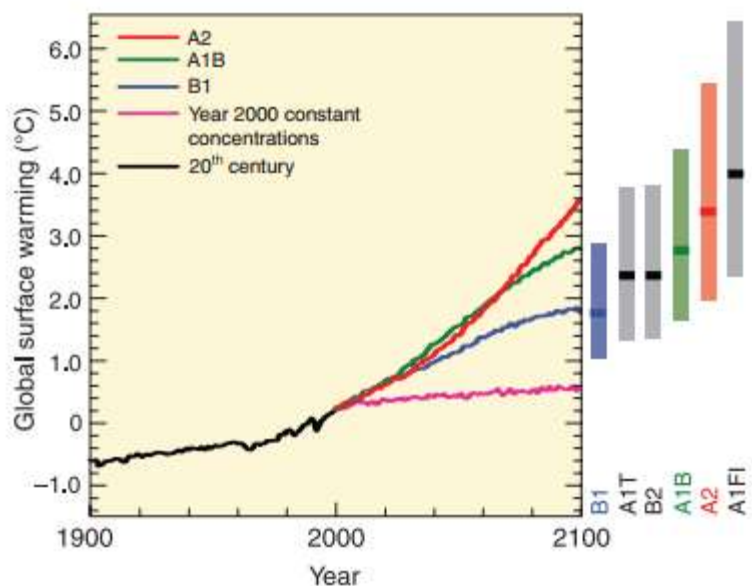


Figura 2.3: Médias globais do aquecimento da superfície produzidas por vários modelos. (Fonte: IPCC)

As linhas sólidas são médias globais, resultantes de multi-modelos, do aquecimento superficial relativo ao período decorrente entre 1980 e 1999, para os cenários A2, A1B e B1 do SRES, mostradas como continuações das simulações do século XX. A linha rosa é correspondente ao ensaio onde foram mantidas constantes as concentrações do ano 2000. As barras no lado direito da figura indicam a melhor estimativa (linha sólida dentro de cada barra) e a faixa provável avaliada para os seis cenários em 2090 - 2099 em relação a 1980-1999 (IPCC, 2007).

Segundo o quarto relatório do IPCC (*in* IPCC, 2007) os sistemas naturais irão ser afetados por mudanças climáticas regionais, principalmente pelo aumento da temperatura, que irá afetar a temperatura da água, o OD e a fauna existente nos recursos hídricos.

Laurence C. Smith, no livro *Novo Norte 2050*, diz que o norte da Europa virá a ser o atual sul, uma vez que se prevê um aumento da temperatura média do ar e uma diminuição da precipitação média anual nesta região, as condições serão mais propícias tanto para as espécies de origem vegetal e animal como para o Homem. Inversamente ao que ocorrerá na Europa do Norte, o sul da Europa assistirá uma diminuição das condições favoráveis ao crescimento da fauna e da flora, devido a um aumento de temperatura e diminuição da precipitação (Laurence, 2011).

2.11. AC a nível nacional

Em Portugal no ano de 1999 foi desenvolvido o projeto SIAM I (*Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*) com a finalidade de avaliar a vulnerabilidade e a adaptação dos sistemas naturais e sociais assim como as medidas de mitigação e adaptação às AC em Portugal no séc. XXI. Este projeto realizou estudos com base nos dados dos Modelos Climáticos Globais (MCG) (secção 2.13) que incidiram sobre vários sectores, nomeadamente recursos hídricos, energia, floresta, zonas costeiras e agricultura (SIAM, 2001).

Relativamente ao clima, os estudos realizados durante o período 1931 a 2000 registaram um aumento da temperatura média do ar a partir do ano de 1976. Este aumento foi resultado do aumento da temperatura mínima, o que resultou numa diminuição da amplitude térmica em muitas regiões do país. Em relação à precipitação durante o mesmo período, verificou-se uma diminuição a partir do ano de 1976. Os dados climáticos registados sugerem a tendência para eventos extremos (Sousa, 2009).

No projeto SIAM, para Portugal Continental, a partir da utilização de Modelos Climáticos Globais (MCG) para a previsão das AC até 2100, os dados registados sobre a temperatura mostram um aumento de 4°C a 7°C. No que diz respeito à precipitação, há uma diminuição de cerca de 100 mm, ocorrendo na Primavera, correspondente a Abril e Maio (SIAM, 2001).

Uma vez que os MCG são insuficientes, realizaram-se novos cenários com os Modelos Climáticos Regionais (MCR), HadRM (de acordo com o referido na secção 2.13), tendo-se estimado que as temperaturas previstas para o período de 2080 a 2100 mostram um aumento, no inverno, de 2°C e 12°C para 6°C e 16°C. No verão, as temperaturas aumentam cerca de 9°C e o número de dias em que a temperatura máxima apresenta valores superiores a 35°C aumenta significativamente. Em relação à precipitação média anual para o mesmo período, no Alentejo prevê-se uma diminuição mais acentuada do que no resto do país, de cerca de 15%. A nível nacional, no inverno, há um aumento de cerca de 20% a 50% e, na primavera e no outono, é quando se prevê uma maior diminuição de precipitação, prevendo-se que estas alterações terão como resultado cheias no inverno e secas no resto do ano (SIAM, 2001).

Em 2001 foi desenvolvido um programa nacional, o Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), com o objetivo de controlar e reduzir as emissões de GEE, de forma a que Portugal respeite e cumpra as medidas propostas pelo Protocolo de Quioto. Este programa tem como objetivo prever os riscos e formular medidas para a sua mitigação (Sousa, 2009).

Em 2002 iniciou-se uma segunda fase mais aprofundada do projeto SIAM, designada por “Alterações Climáticas em Portugal, Cenários, Impactos e medidas de adaptação - Projeto SIAM II”. Neste projeto os resultados obtidos mostram que a temperatura irá continuar a subir, aumentando consequentemente os períodos de seca. Prevê-se também um aumento da precipitação nos meses de inverno e uma diminuição no resto do ano, bem como um aumento de episódios de chuva intensa provocando cheias e desabamento de terras. Os resultados previstos para Portugal são um aumento das taxas de aquecimento que terá impacto na agricultura e nos recursos hídricos. No que respeita aos recursos hídricos, prevê-se uma diminuição na disponibilidade de água e uma diminuição da sua qualidade, assim como uma degradação dos ecossistemas aquáticos e o aumento de risco de cheia (SIAM II, 2006).

Todas estas alterações têm repercussões a nível global nos vários domínios, como nos recursos hídricos, que têm impactos significativos, não só a nível ambiental como económico e social (IPCC, 2007).

A nível hidrológico podem ocorrer várias mudanças na precipitação média anual, na evaporação, na evapotranspiração e na temperatura média da água. Segundo o IPCC (*in* IPCC, 2007) a temperatura média global irá aumentar entre 0,8°C e 2,6°C até 2050 e entre 1,4°C e 5,8°C em 2100, dependendo do cenário de emissões considerado.

2.12. AC e os Recursos hídricos

Segundo os dados do Plano Nacional da Água (2002), a precipitação média anual em Portugal é cerca de 960 mm, variando de zona para zona do País. Apresenta uma grande variação sazonal, em que cerca de 70% a 80% das chuvas ocorre durante os meses de Inverno, novembro a abril, e em termos relativos a variabilidade aumenta de norte para sul do país. Os escoamentos também diminuem de norte para sul do país e nota-se uma grande variação dos meses frios para os meses quentes, que não coincide com a distribuição das necessidades, uma vez que há mais procura no verão do que no inverno (SIAM, 2001; Sousa, 2009).

No que diz respeito à precipitação, a incerteza destas previsões é maior. Uma vez que a precipitação não é igual em todas as zonas do planeta. Segundo vários modelos, a precipitação irá aumentar nas latitudes mais altas e diminuir nas latitudes mais baixas (IPCC, 2007).

O aumento da taxa de crescimento demográfico e o desenvolvimento económico estão na base dos grandes problemas ambientais da sociedade atual, como é caso dos recursos hídricos onde a qualidade de água está em constante degradação (Sousa, 2009).

Atualmente existe uma grande exploração dos recursos hídricos por parte do sector industrial, agrícola e doméstico. A qualidade da água tem vindo a degradar-se devido a vários fatores naturais e antropogénicos. Ao nível dos fatores naturais encontra-se o aumento da temperatura, a evaporação e a evapotranspiração e ainda o aumento de cheias e secas. Na classe dos fatores antropogénicos podem ser referidas a poluição atmosférica, a contaminação doméstica, a contaminação industrial e ainda os subprodutos provenientes da agricultura. O consequente aumento da degradação da qualidade da água leva à necessidade de uma maior intervenção a partir de técnicas avançadas para o tratamento e desinfecção eficazes da água (Sousa, 2009).

Em Portugal, segundo os cenários produzidos pelos MCG e pelos MCR (secção 2.13), as AC vão causar vários impactos ao nível hidrológico. Um dos exemplos destes impactos verifica-se ao nível do escoamento médio mensal, que apresenta tendência para diminuir, principalmente nas bacias hidrográficas no sul do País, devido à distribuição da precipitação durante o ano, causando um aumento do escoamento no inverno e uma diminuição nas restantes estações. Haverá uma maior tendência para as cheias durante o inverno, devido aos episódios de chuvas intensas, que afetará também a qualidade da água, e para a redução do escoamento na primavera, verão e outono (SIAM, 2001; Vivas, 2010). No verão irá haver tendência para secas, originando ondas de calor, devido ao aumento de temperatura e à diminuição da precipitação nestes meses (Sousa, 2009).

O aumento da temperatura provoca uma diminuição do teor de oxigénio dissolvido na água, que condiciona vários processos biológicos. Esta diminuição dá origem à variação na concentração de nutrientes, ao crescimento de algas tornando o ecossistema com condições de anoxia e, posteriormente, levando à eutrofização, que tem como consequência o desaparecimento dos peixes (Diogo *et al.*, 2008).

Como consequência dos verões mais secos, com aumento de dias sem precipitação e episódios de precipitação intensa noutros dias, ocorre a erosão dos solos que conduz a uma maior absorção de poluentes e aumento da carga de poluentes nos meios hídricos, agravando os problemas de eutrofização (IPCC, 2007; Sousa, 2009).

A nível dos escoamentos, a redução dos caudais dos cursos de água aumentará a concentração de cargas poluentes que terá como consequência a diminuição da capacidade de assimilação das mesmas pelo meio hídrico (Sousa, 2009).

2.13. Modelação Climática

Os impactos das AC nos sistemas naturais e humanos já são analisados globalmente e regionalmente. Cenários de futuros possíveis indicam que os impactos podem aumentar, especialmente se as emissões dos GEE continuarem a aumentar como tem acontecido até à data. Alguns destes impactos já não são possíveis de combater, sendo necessário formular estudos para desenvolver estratégias de mitigação e adaptação (Soares *et al.*, 2012a).

Os modelos climáticos são ferramentas fulcrais ao estudo das alterações climáticas através de simulações do sistema climático, estes interpretam o comportamento do clima e simulam cenários futuros (Sousa, 2009). Estas projeções são resultado de uma pesquisa intensiva dos recursos e de uma análise multidisciplinar, abordando e baseando-se em assuntos tão diversos como as ciências socioeconómicas (cenários), a computação, a física e a química, a biologia, a geologia e a estatística (EMSEMBLES, 2009).

Na União Europeia existem um número finito de instituições que se concentram em modelação climática, pesquisa sobre o clima e as AC. Algumas centram-se em modelos globais e outras em modelos regionais (EMSEMBLES, 2009).

Os MCG são modelos que simulam o sistema climático por uma malha tridimensional de cerca de 300km (SIAM, 2001) e com 10 a 40 níveis verticais, que estes reproduzem de forma satisfatória a alteração do clima dos últimos 150 anos. Segundo o projeto SIAM II estes modelos têm uma sensibilidade climática de 2°C a 4°C. Os MCR são modelos que se dedicam a uma região utilizando uma malha de uma dimensão mais pequena, obtendo uma resolução mais próxima da realidade (SIAM II, 2006).

Para a obtenção de uma simulação climática através de um MCG é necessário escolher um cenário de evolução da concentração dos GEE. A realização destes cenários foi realizada pelo IPCC no *Special Report of Emission Scenarios* (SRES), que desenvolve as suas projeções com base na evolução da população, economia, estruturas políticas e estilos de vida (IPCC in Sousa, 2009).

Os cenários agrupam-se em quatro grandes grupos, como se pode observar na Figura 2.4.

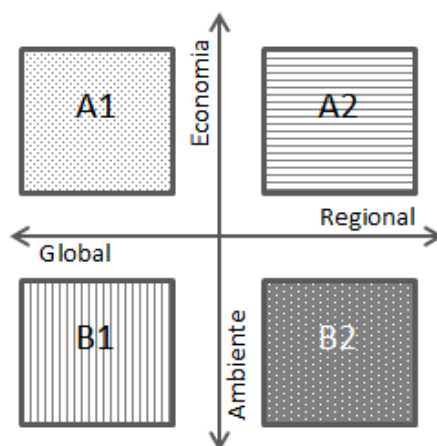


Figura 2.4: Representação esquemática dos cenários (Fonte: adaptado do SIAM II in Sousa, 2009)

Estes cenários são definidos pelo IPCC (*in* IPCC, 2007) da seguinte forma:

A1. O cenário A1 descreve um mundo futuro com rápido crescimento económico, população global que atinge seu máximo e a sua respetiva declinação até metade do século, considera ainda a introdução de novas tecnologias mais eficientes. Os temas fundamentais são a convergência entre regiões, a construção de elevada capacidade e a crescente interação social e cultural, com redução substancial em diferenças regionais, do rendimento/salário *per capita*. O cenário A1 divide-se em três grupos que descrevem direções alternativas de mudança tecnológica no sistema de energia. Os três grupos A1 são diferenciados pelo uso intensivo de fontes fósseis (A1F1), fontes de energia de origem não fóssil (A1T), e utilização equilibrada de todas as fontes (A1B) sendo que neste equilíbrio não existe a dependência de apenas um tipo de fonte de energia.

A2. O cenário A2 descreve um mundo muito heterogéneo. Fundamenta-se na autossuficiência e na preservação de identidades locais, com um crescimento contínuo da população e um desenvolvimento económico é essencialmente orientado para a região. Neste caso, o crescimento económico *per capita* e o desenvolvimento tecnológico são lentos e fragmentados.

B1. Este cenário descreve um mundo convergente com a mesma população global, que atinge o pico em meados do século e declina em seguida, mas com uma mudança rápida nas estruturas económicas. Apresenta uma redução dos materiais e a introdução de tecnologias limpas e eficientes em relação ao uso de recursos e dá principal atenção às soluções globais para a sustentabilidade económica, social e ambiental.

B2. O cenário B2 descreve um mundo em que se privilegia as soluções locais para a sustentabilidade económica, social e ambiental. Caracteriza-se como sendo um mundo em que a população global aumenta continuamente, a uma taxa inferior à taxa do cenário A2 e apresenta níveis intermédios de desenvolvimento económico e mudanças tecnológicas menos rápidas e mais diversificadas do que nos cenários B1 e A1.

Os cenários A1 e A2 são os cenários com mais implicações a nível climático apresentando um maior aumento da temperatura média global. Os cenários A1 e B1 focam-se na coordenação global e os cenários A2 e B2 no esforço local. O cenário A1B, ou seja, o cenário A1 em que são utilizadas todas as fontes de energia sem que ocorra dependência de um dos tipos de energia, é o mais utilizado pelos modelos climáticos (Sousa, 2009).

A metodologia adotada para a produção dos cenários de alteração climática (SRES) têm em conta concentrações de diferentes componentes, e o forçamento radioativo (Sousa, 2009).

O forçamento radiativo é uma medida da influência de um fator na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera e é um índice da importância do fator como possível mecanismo de mudança do clima. O forçamento positivo tende a aquecer a superfície, enquanto o forçamento negativo tende a arrefecê-la. Neste relatório, os valores do forçamento radiativo são para 2005, relativos às condições pré-industriais definidas em 1750, e são expressos em watts por metro quadrado (Wm^{-2}) (IPCC, 2007). É este forçamento que entra nos modelos globais oceano – atmosfera (Sousa, 2009).

Em 2004 foi criado o projeto ENSEMBLES pela Comissão Europeia com o objetivo de informar os investigadores, produtores, investidores, empresas e o público sobre o clima através da modelação e de ferramentas de análise. O projeto consiste numa faixa de previsões futuras avaliadas para decidir quais os resultados mais prováveis de acontecerem, ajudando na formulação de novas estratégias a implementar para a mitigação das consequências das AC (EMSEMBLES, 2009).

Este projeto pretende desenvolver um sistema de previsão do clima baseado no princípio “*state-of-the-art*”, de alta resolução, de modelos globais e regionais desenvolvidos na Europa, validados, e que utilizam uma base de dados de alta qualidade para estimar a incerteza dos climas futuros para escalas temporais mais longas. Pretende quantificar e diminuir a incerteza da representação física, química, biológica e humana relacionada com os *feedbacks* do sistema da terra (inclusive os recursos hídricos), bem como maximizar a exploração dos resultados para vários sectores como a agricultura, recursos hídricos, energia e saúde (EMSEMBLES, 2009).

Os resultados proporcionados por este projeto mostram com grande detalhe como é esperado que o clima mude baseado em cenários de emissões futuras (EMSEMBLES, 2009).

O projeto ENSEMBLES utiliza MCG e MCR. Além destes é ainda utilizado o modelo ECHAM5 desenvolvido pelo *Max Planck Institute* em Hamburgo e os resultados do projeto estudo apresentam um aumento de temperatura até 2100 de cerca de 2°C (EMSEMBLES, 2009).

Nos estudos realizados pelo projeto SIAM foram utilizados os modelos HadcM3 (MCG) e HadRM2 (MCR) desenvolvidos pelo *Hadley Center* para o período 2080-2100, em que se obtiveram os resultados descritos na secção 2.11 (SIAM, 2001)

2.13.1. Modelos Climáticos Regionais

Os MCG têm sido muito utilizados para a construção de cenários climáticos, este esforço tem sido bem sucedido na geração de informação climática global para o séc. XXI (Meehl *et al.*, 2007 in Soares *et al.*, 2012a), mas no que diz respeito à representação de vários processos e sistemas de variabilidade climática regional e local estes são incapazes de a reproduzir. Esta limitação deve-se à difícil geomorfologia, à complexa orografia, costas irregulares e cobertura de solo heterogéneo (Randall *et al.*, 2007 in Soares *et al.*, 2012a).

Como alternativa a estes modelos adotaram-se os Modelos Climáticos Regionais (MCR), que são forçados com os MCG ou através da reanálise de dados são capazes de captar fisicamente circulações regionais e locais consistentes na escala horizontal e temporal, permitindo um desenvolvimento climatológico de alta resolução em quaisquer condições de terreno (Giorgi and Mearns 1991, 1999; Laprise 2008; Leung *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2004 in Soares *et al.*, 2012a).

Estes modelos foram utilizados em diferentes estudos, como o ENSEMBLES, forçado com ERA-40. São uma fonte fiável para dados atmosféricos da Europa e em particular para Portugal (Van der Linden and Mitchell 2009 in Soares *et al.*, 2012a).

Portugal é um País com propriedades indicadas para este tipo de modelos, com tecnologia de alta resolução, uma vez que tem uma difícil geomorfologia, uma grande complexidade na orografia e grandes gradientes climatológicos, uma vez que está localizado numa zona de transição entre os anticiclones subtropicais e zonas de depressão subpolar. Outra característica que condiciona os fatores climáticos é o efeito do oceano Atlântico, sendo este tipo de modelos suficientes para justificar as variações de temperatura e de precipitação (Soares *et al.*, 2012a).

Segundo Soares *et al.* (in Soares *et al.*, 2012a) o MCR WRF9km é o modelo mais indicado para simular o clima no nosso país, que tem uma orografia complexa e uma topografia difícil. Os ciclos anuais da temperatura máxima são melhor representados pelo WRF9km em todas as regiões.

Num estudo realizado sobre o clima no nosso País os MCR que apresentaram melhores resultados foram o ETZ, KNMI e o SMHI. Segundo Soares *et al.* (in Soares *et al.*, 2012b) os modelos ETHZ e o KNMI apresentam o melhor valor de correlação para o noroeste de Portugal, os modelos KNMI e o SMHI são indicados para o todo o território. O modelo KNMI é o modelo com uma melhor performance para pequenas escalas, sendo muito adequado para Portugal apesar da sua reduzida variabilidade. Os modelos que melhor descrevem a distribuição espacial são o ETHZ e o KNMI.

3. Descrição dos modelos

O presente capítulo descreve o modelo de qualidade da água utilizado para a simulação da qualidade da água na albufeira de Santa Clara, bem como os modelos climáticos utilizados na simulação dos novos cenários.

3.1. WQRRS

No estudo desenvolvido, o modelo de simulação matemática da qualidade da água utilizado foi o WQRRS – *Water Quality for River-Reservoir Systems* (Hydrological Engineering Center – HEC, 1978).

Este modelo é constituído por três módulos: o módulo de albufeira, o módulo hidráulico do rio e o módulo da qualidade de água-rio (HEC, 1978). Em termos de utilização do módulo de albufeira, e para que a aproximação unidimensional seja válida, as isotérmicas têm que ser horizontais. Assim, adequa-se a albufeiras e lagos de pequena a média dimensão com tempos de retenção significativos e uma estratificação térmica estável (Coelho, 2009). O modelo WQRRS é capaz de simular um número ilimitado de dias ou anos (HEC, 1978).

Trata-se de um modelo unidimensional, de camadas, adequado ao estudo de albufeiras com alguma profundidade, e que apresentem estratificação térmica bem marcada, em que o sistema é descrito como uma sucessão unidimensional de elementos de volume de água, de espessura uniforme e limitados por planos horizontais (Coelho *et al.*, 1999).

Para lagos ou albufeiras pouco profundos, com tempos de retenção baixos, fraca estratificação ou mistura completa anual este modelo não é o mais adequado (HEC, 1978), sendo preferível a utilização de modelos bidimensionais.

A albufeira de Santa Clara apresenta gradientes verticais de temperaturas, que são responsáveis pela estratificação térmica durante os meses Primavera e de Verão. O modelo a utilizar neste caso de estudo tem de se adequar a estas características, como é o caso do modelo WQRRS.

O WQRRS tem sido aplicado em vários casos de estudo, muitos deles em Portugal, obtendo de uma forma geral, resultados positivos. Permite a simulação de um grande número de parâmetros de qualidade da água, destacando-se a temperatura e o oxigénio dissolvido. O modelo necessita de condições de fronteira como as séries temporais de valores de caudal, temperatura, concentração e trocas de energia na interface ar – água.

O modelo permite considerar as aflúências ou descargas localizadas a qualquer profundidade. O balanço hídrico global tem em consideração as variações de cota de superfície livre (em alguns casos em função das aflúências, descargas, precipitação, evaporação e infiltração) (Coelho *et al.*, 1999). A maior limitação que este modelo apresenta é o facto de não simular longitudinalmente os parâmetros da qualidade da água.

O número de Froude densimétrico (Fr) é um critério muito utilizado no processo de decisão da adequabilidade de um modelo unidimensional. É um parâmetro adimensional que relaciona as forças de inércia da velocidade média de escoamento com forças gravitacionais que tendem a manter a estabilidade densimétrica. A expressão é representada da seguinte forma:

$$Fr = \frac{U}{\left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) g d\right]^{\frac{1}{2}}}$$

Em que:

U: Q/bd = Velocidade média de escoamento [LT^{-1}];

Q = Caudal [L^3T^{-1}];

b = Largura média [L];

d = Profundidade média [L];

$\Delta\rho$ = Diferença da massa específica ao longo da profundidade d [ML^{-3}];

ρ_0 = Massa específica de referência [ML^{-3}];

g = Aceleração da gravidade [LT^{-2}].

Nas massas de água bem estratificadas, para as quais os modelos unidimensionais são bem aplicados, o número de Fr apresenta valores inferiores a $1/\pi$; para as massas de água que apresentam uma fraca estratificação o número de Fr toma valores entre 0,1 e 1,0 (neste caso os modelos mais adequados são os modelos bidimensionais); e para casos de mistura completa o número de Fr toma valores superiores a 1,0.

Os modelos unidimensionais constituem uma classe importante de modelos que permite estabelecer bases para o desenvolvimento de modelos ecológicos e de modelos de qualidade da água e que cobrem aplicações práticas (Rodrigues, 1992 *in* Coelho, 2009).

3.1.1. Representação conceptual

A utilização de um modelo matemático necessita sempre da definição de uma representação conceptual do sistema que se pretende simular. A representação escolhida tem ser função das características do modelo, dos dados e dos objetivos a atingir (Diogo *et al.*, 2004c).

No modelo WQRRS a representação conceptual da massa de água é constituída por uma sucessão de camadas com um volume de água e espessura uniforme que são limitadas por planos horizontais e pelos limites da albufeira. Cada camada é caracterizada por uma área horizontal, espessura e volume pertencendo a uma agregação vertical das diferentes camadas. Dentro de cada camada ocorre uma mistura completa e todas as isotérmicas são paralelas à superfície da água, sendo considerada só a dimensão vertical (Coelho, 2009).

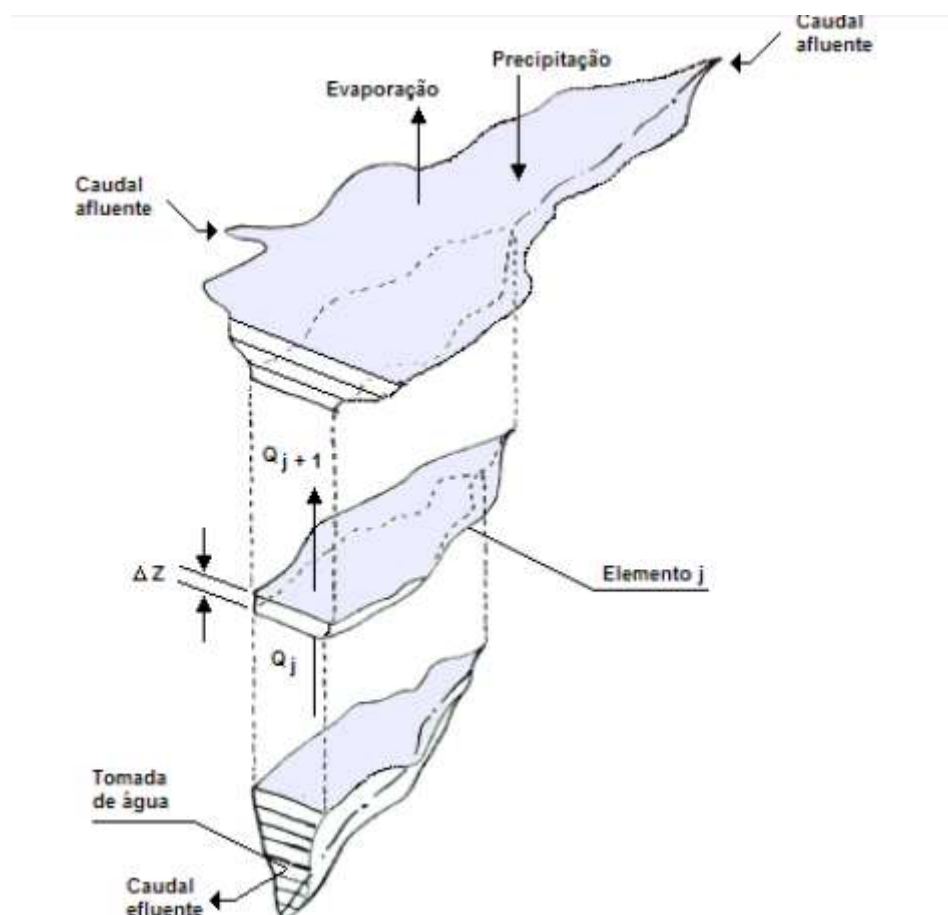


Figura 3.1: Representação Conceptual de uma albufeira estratificada (Fonte: Coelho, 2009)

As afluências externas e as tomadas de água são fontes e perdas de água, respetivamente, dentro de cada camada, dispersam-se e misturam-se de forma homogénea sendo impossível analisar as possíveis variações longitudinais dos parâmetros descritores.

Segundo o que foi descrito anteriormente, o transporte interno de calor e de massa ocorre segundo a direção vertical. O transporte interno ocorre por advecção e através da difusão efetiva, que corresponde ao conjunto da difusão molecular, da difusão turbulenta e da mistura convectiva. A difusão turbulenta é essencialmente induzida pelo vento e pelo escoamento, e em conjunto com a mistura convectiva, constitui a componente dominante da difusão efetiva do epilímnio. E o coeficiente efetivo é sempre baseado na temperatura, que determina que a difusão de massa pode não ser equivalente à dispersão de energia térmica (Coelho, 2009).

3.1.2. Alocações das aflúências e tomadas de água

Para a utilização do modelo a determinação das zonas de aflúência e de tomada de água são importantes para o processo de simulação. Para a determinação da localização das tomadas de água pode-se utilizar o método de Debler-Craya ou o método de WES (*Water Experiment Station*), para a determinação das aflúências utiliza-se o método de Debler-Craya modificado.

O método de Debler-Craya é utilizado na determinação da localização das tomadas de água e utiliza duas técnicas: para zonas bem estratificadas e com uma profundidade com um gradiente de densidade negativa utiliza-se o método de Debler, para zonas de mistura convectiva e sem gradiente de densidade é utilizado o método de Craya. No presente caso de estudo o método utilizado é o método de Debler para determinar a espessura do campo de correntes, que é representado pela seguinte expressão:

$$D = 2,88 \left(\frac{Q}{W} \sqrt{\frac{\rho}{g\beta}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Em que:

D = Espessura do campo de correntes (m);

Q = Caudal extraído ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

W = Largura efetiva da albufeira ao nível da tomada de água (m);

β = Gradiente de densidade na zona de tomada de água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-4}$);

g = Aceleração de gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

ρ = Massa específica da água na zona da tomada de água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

A massa específica da água é calculada a partir da temperatura da água e do teor dos sólidos dissolvidos e inorgânicos suspensos, que é representada pela seguinte expressão:

$$\rho = 1000 - \left[(T - 3,98)^2 \frac{T + 283}{(503,57(T + 67,26))} \right] + 0,00062C_1 + 0,00124C_2$$

Em que:

T = Temperatura da água (°C);

C₁ = Concentração de sólidos dissolvidos totais (mg.L⁻¹);

C₂ = Concentração dos sólidos inorgânicos suspensos totais (mg.L⁻¹).

Considera-se que as tomadas de água estão localizadas acima e abaixo do eixo de tomada de água, assumindo-se assim uma distribuição uniforme da velocidade dentro do campo de correntes. Se o resultado da equação do método de Debler demonstrar que a zona de extração se prolonga acima da superfície livre ou abaixo do fundo da albufera a velocidade é proporcionalmente aumentada (Coelho, 2009).

A determinação das tomadas de água através do método de WES é calculada a partir de três equações. A equação utilizada no cálculo da altura da zona de extração da água é representada da seguinte forma:

$$V_0 = \frac{Z^2}{A_0} \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho'}{\rho_0} g Z \right)}$$

Em que:

V₀ = Velocidade média através do orifício (m.s⁻¹);

Z = Distância vertical entre a cota do eixo do orifício e o limite inferior ou superior zona de extração (m);

A₀ = Área da secção do orifício (m²);

Δρ' = Diferença de massa específica da água entre a cota do eixo do orifício e o limite superior ou inferior da zona de extração (kg.m⁻³);

ρ₀ = Massa específica da água à cota do eixo do orifício (kg.m⁻³);

g = Aceleração de gravidade (m.s^{-2}).

A localização da velocidade máxima é obtida através da seguinte equação:

$$\frac{Y_1}{H} = \left[\text{sen} \left(1,57 \frac{Z_1}{H} \right) \right]^2$$

Em que:

Y_1 = Distância vertical entre a cota onde se verifica a velocidade máxima, V , e o limite inferior da zona de extração (m);

H = Espessura da zona de extração (m);

Z_1 = Distância vertical entre a cota do eixo do orifício e o limite inferior da zona extração (m).

A distribuição de velocidades dentro da zona de extração é determinada pela seguinte expressão:

$$\frac{v}{V} = \left(1 - \frac{y\Delta\rho}{Y\Delta\rho_m} \right)^2$$

Em que:

v = velocidade normalizada local na zona de extração a uma distância vertical y da cota de velocidade máxima V (m.s^{-1});

V = Velocidade máxima da zona de extração (m.s^{-1});

y = Distância vertical entre a cota do ponto de velocidade máxima, V , e o ponto a que corresponde a velocidade v (m);

Y = Distância vertical entre a cota do ponto de velocidade máxima, V , e o limite da zona de extração (m);

$\Delta\rho$ = Diferença de massa específica da água entre a cota do ponto de velocidade máxima, V , e o ponto a que corresponde a velocidade v (kg.m^{-3});

$\Delta\rho_m$ = Diferença de massa específica da água entre a cota do ponto de velocidade máxima, V , e o limite da zona de extração (kg.m^{-3});

Através deste processo consegue-se obter o caudal extraído de cada camada, através do produto da velocidade correspondente pela largura e pela espessura da camada. Aplica-se uma média ponderada em termos de caudais extraídos, aos perfis verticais de qualidade da água para o cálculo da concentração de saída de cada parâmetro e para cada intervalo de tempo de cálculo (Coelho, 2009).

No que diz respeito à determinação da localização das aflúências, assume-se que os correspondentes caudais se escoarão até uma dada cota na massa de água até encontrarem uma camada com uma massa específica igual à sua, em função da temperatura. Se a massa específica dos caudais afluentes for diferente da massa específica da massa de água, estes são alocados à superfície ou no fundo, consoante o valor da massa específica do afluente é inferior ao valor mínimo ou é superior ao valor máximo existente na albufeira (Coelho, 2009).

Se a distribuição das aflúências pelas camadas ocorrer no período de inverno quando há mistura convectiva, estas são distribuídas uniformemente pela massa de água, se entrarem numa zona estratificada podem ser distribuídos de duas formas, ou da mesma forma que o método de Deblor-Craya para a zona de localização das tomadas de água, pelo critério de Deblor que determina a espessura das correntes através da distribuição da água nas camadas em redor do nível de entrada e assumindo uma velocidade uniforme. Outra forma é a distribuição das aflúências pela massa de água até se encontrar uma camada com a mesma massa específica que a da aflúência.

3.1.3. Advecção vertical

A advecção vertical é caracterizada pelo escoamento entre diferentes camadas, e é um dos dois mecanismos de transporte utilizados pelo modelo para transporte de massa e de energia, sendo calculada a partir da soma algébrica das efluências e das aflúências para cada camada do sistema, começando na que se encontra mais abaixo.

Qualquer desequilíbrio do fluxo de caudais é composto por advecção vertical, dentro ou fora da camada adjacente superior. Este processo é repetido para todos os elementos restantes, tendo em conta a advecção vertical a partir de ou para a camada adjacente inferior. Qualquer desequilíbrio do fluxo de caudais na camada superficial é tida em consideração para um aumento ou para uma diminuição da cota de superfície livre.

3.1.4. Difusão efetiva

A difusão efetiva é o outro mecanismo utilizado pelo WQRRS no transporte de energia e de massa entre camadas. É constituída pela difusão molecular, pela difusão turbulenta e pela mistura convectiva.

A difusão turbulenta induzida pelo vento e pelos escoamentos, assim como a mistura convectiva são as componentes principais da difusão efetiva no epilímnio na maioria das albufeiras. Nas albufeiras que apresentam uma estratificação térmica pronunciada, a mistura convectiva é uma componente importante no metalímnio e no hipolímnio durante o período de estratificação

Para albufeiras profundas que apresentem uma boa estratificação térmica com afluições ou tomadas de água de ou para o hipolímnio a componente dominante é a difusão turbulenta devido aos escoamentos. Para as albufeiras com fraca estratificação a turbulência induzida pelo vento ou pelos escoamentos também é a componente dominante da difusão efetiva em toda a massa de água.

Um dos dois métodos que pode ser utilizado pelo WQRRS no cálculo da difusão efetiva, correspondem ao método da estabilidade ou ao método do vento.

O método da estabilidade é adequado para as albufeiras profundas e com uma boa estratificação térmica, e também para as albufeiras em que o vento não constitui a principal força de mistura turbulenta, mesmo que sejam pouco profundas. Este método é baseado no pressuposto de que a mistura da massa de água estará no seu mínimo quando o gradiente de densidade ou a estabilidade da coluna de água estiverem no seu máximo.

Este método é representado pelas seguintes expressões:

$$D_c = A_1 \quad \text{quando } E \leq E_{\text{crit.}}$$

$$D_c = A_2 E^{A_3} \quad \text{quando } E > E_{\text{crit.}}$$

Em que:

D_c = Coeficiente de difusão efetiva ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

A_1 = Valor máximo do coeficiente de difusão efetiva ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

E = Estabilidade da coluna de água ou gradiente da densidade normalizado (m^{-1});

$E_{\text{crit.}}$ = Estabilidade crítica da coluna de água (m^{-1});

A_2 e A_3 = Constantes empíricas.

O método do vento é apropriado para albufeiras em que o vento é a principal força de difusão turbulenta, e assume que a circulação induzida pelo vento é superior à superfície diminuindo exponencialmente com a profundidade. O coeficiente de difusão efetiva é determinado a partir da

combinação da difusão efetiva induzida pelo vento com um termo de difusão mínima, que representa os efeitos de todos os outros processos concorrentes para a circulação, e que é obtida pela seguinte expressão:

$$D_c = D_{\min} + A_1 V_w e^{-kd}$$

Em que:

D_c = Coeficiente de difusão efetiva ($m^2.s^{-1}$);

D_{\min} = Coeficiente de difusão efetiva mínimo ($m^2.s^{-1}$);

A_1 = Coeficiente empírico (m);

V_w = Velocidade do vento ($m.s^{-1}$);

$K = A_2 / d_t$;

A_2 = Coeficiente empírico (m);

d_t = seis metros para condições de ausência de estratificação ou, caso contrário, profundidade da termoclina (m);

d = Profundidade de cada camada (m).

O modelo limita o coeficiente de difusão efetiva a um valor máximo, que normalmente é de $5 \times 10^{-4} m^2.s^{-1}$.

3.1.5. Relações de temperatura e qualidade da água

A abordagem do modelo é baseada no pressuposto de que a dinâmica de cada constituinte químico ou biológico pode ser descrito pela lei da conservação da massa e do princípio cinético. Uma suposição importante é que todos os processos químicos e biológicos ocorrem em ambiente aeróbio. Não sendo o modelo capaz de funcionar em ambiente anaeróbio, tem no entanto a capacidade de continuar o processo de simulação até encontrar novamente a presença de oxigénio dissolvido.

O princípio fundamental da conservação da massa e da energia é utilizado para derivar a equação diferencial que permite simular a temperatura e os diferentes constituintes bióticos e abióticos, de acordo com a seguinte expressão:

$$V \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = \Delta z Q_z \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) + \Delta z A_z D_c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + Q_i C_i - Q_o C \pm V S$$

Em que:

C = Temperatura ou concentração de qualquer constituinte, em unidades apropriadas;

V = Volume de cada elemento do sistema (m³);

t = Coordenada temporal (s);

z = Coordenada espacial vertical (m);

Q_z = Advecção vertical (m³.s⁻¹);

A_z = Área superficial de cada elemento do sistema, normal à direção do fluxo, (m²);

D_c = Coeficiente de difusão efetiva (m².s⁻¹);

Q_i = Caudal lateral entrado em cada elemento (m³.s⁻¹);

C_i = Fluxo de energia térmica ou de concentração de qualquer constituinte, nas unidades apropriadas;

Q_o = Caudal lateral saído de cada elemento (m³.s⁻¹);

S = Todas as fontes e sumidouros, em unidades apropriadas.

Esta equação é utilizada na determinação da temperatura e da concentração de todos os constituintes transportados passivamente pela água. Para os constituintes que estejam fixos ao fundo ou que possuam mobilidade própria a equação passa a ser a seguinte:

$$V \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) = \pm V S$$

Os termos correspondentes às fontes e sumidouros inerentes à temperatura estão limitados aos fluxos de energia externos. Para os restantes parâmetros de qualidade da água, as fontes e sumidouros podem incluir deposição, reações de decaimento de primeira ordem, rearejamento, reações químicas e bioquímicas, crescimento, respiração, mortalidade e predação.

A próxima equação representa os vários componentes de fontes e sumidouros para um constituinte abiótico.

$$S_1 = V_s \frac{\partial C_1}{\partial Z} + K_2(C_1^* - C_1) - K_{d1}C_1 + K_{d2}C_2 -$$

$$- \sum_{i=1}^n G_i C_i F_i + \sum_{i=1}^n G_i C_i E_i + \sum_{i=1}^n R_i C_i F_i + \sum_{i=1}^n M_i C_i$$

Para um constituinte biótico é considerada a seguinte equação:

$$S_1 = V_s \frac{\partial C_1}{\partial Z} + C_1(G_1 - R_1 - M_1) - \sum_{i=1}^n G_i C_i F_i$$

Em que:

S_1 = Variação da concentração (fonte ou sumidouro) do constituinte ($\text{mg.L}^{-1}.\text{s}^{-1}$);

V_s = Velocidade de sedimentação do constituinte (m.s^{-1});

C = Concentração do constituinte (mg.L^{-1});

C^* = Concentração de saturação (mg.L^{-1});

K_2 = Coeficiente de rearejamento (s^{-1});

K_d = Coeficientes de decaimento (s^{-1});

G = Taxa de crescimento (s^{-1});

F = Fator que relaciona o crescimento com o consumo e a libertação dos constituintes dependentes;

E = Fator que relaciona o crescimento com a excreção de constituintes dependentes;

R = Taxa de respiração (s^{-1});

M = Taxa de mortalidade (s^{-1}).

Na equação correspondente a um constituinte abiótico, os termos do membro da direita referem-se, respetivamente, a: sedimentação, rearejamento, decaimento, transformação química, consumo pelo biota, subprodutos do biota (sexto e sétimo termo) e mortalidade. Relativamente à equação que

representa um constituinte biótico, os termos do membro da direita correspondem a: sedimentação, crescimento, respiração e mortalidade (estando estes três últimos processos englobados no segundo termo) e predação.

3.1.6. Análise térmica

A temperatura da água é um dos parâmetros mais importantes a considerar em termos da qualidade da água, uma vez que a maioria dos parâmetros é função da temperatura. Numa albufeira, o mecanismo difusivo de transporte de massa depende diretamente da massa específica da água que, por sua vez, depende da temperatura da água.

As principais fontes e perdas de energia estão associadas às trocas que ocorrem ao nível da interface ar-água, assim como às afluições e efluências do sistema.

A seguinte equação representa as trocas de energia na interface ar – água:

$$Q_n = Q_{sn} + Q_{atn} - Q_w - Q_e - Q_c$$

Em que:

Q_n = Energia útil transferida ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

Q_{sn} = Radiação solar útil sob a forma de ondas curtas ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

Q_{atn} = Radiação atmosférica útil sob a forma de ondas longas ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

Q_w = Radiação sob a forma de ondas longas emitida pela massa de água ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

Q_e = Perda de energia associada à evaporação ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

Q_c = Energia transferida da massa de água para a atmosfera por efeitos de turbulência (convecção) ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

Existem métodos formulados a partir da expressão acima que podem ser utilizados no cálculo da troca de energia na interface ar – água, nomeadamente o método do balanço energético e o método da temperatura de equilíbrio.

No método do balanço energético os cinco componentes da expressão referida anteriormente, são agregados em dois grupos, aqueles que dependem da temperatura à superfície e aqueles que não dependem desse fator, resultando na seguinte expressão:

$$Q_n = \mu - \lambda T$$

Em que:

$$\mu = Q_{sn} + Q_{at} - 7.36 \times 10^{-2} - \rho L (a + bW) (\alpha_j - e_a - 6.1 \times 10^{-4} p T_a);$$

$$\lambda = 1.17 \times 10^{-3} + \rho L (a + bW) (\beta_j + 6.1 \times 10^{-4} p^{-4});$$

T = Temperatura da água (°C);

ρ = Massa específica da água (kg.m⁻³);

a, b = Coeficientes de evaporação;

W = Velocidade do vento (m.s⁻¹);

α_j, β_j = Coeficientes empíricos dependentes da temperatura;

e_a = Tensão de vapor (mbar);

p = Pressão atmosférica (mbar);

T_a = Temperatura do termómetro seco (°C);

L = Calor latente de evaporação (kcal.kg⁻¹).

O método da temperatura de equilíbrio é baseado nos trabalhos desenvolvidos por Edinger e Geyer (Edinger e Geyer, 1965 *in* HEC, 1978), e utiliza o conceito da “temperatura de equilíbrio” e um coeficiente global para a troca de energia na superfície. A “temperatura de equilíbrio” define-se como a temperatura da água para a qual as trocas de energia na interface ar-água são nulas. O coeficiente global para a troca de energia na superfície, quando multiplicado pela diferença entre a temperatura de equilíbrio e a temperatura real da superfície da água, permite obter o valor da transferência útil de energia, representada pela seguinte expressão:

$$Q_n = K_e(T_e - T_s)$$

Em que:

Q_n = Energia útil transferida (kcal.m⁻².dia⁻¹);

K_e = Coeficiente global para a troca de energia na superfície (kcal.m⁻².dia⁻¹.°C⁻¹);

T_e = Temperatura de equilíbrio (°C);

T_s = Temperatura da superfície da água (°C).

Qualquer um dos dois métodos, balanço energético ou temperatura de equilíbrio, representam satisfatoriamente as trocas de energia à superfície de uma massa de água homogênea.

Na maioria das massas de água, as ondas de menor comprimento da radiação solar visível penetram para além da camada superficial. A formulação do modelo considera que a atenuação da energia ou da intensidade da luz com a profundidade segue a lei de Lambert-Beer, definida pela seguinte equação:

$$Q_{sz} = Q_{sn}e^{-\eta z}$$

Em que:

Q_{sz} = Intensidade da radiação solar à profundidade z ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

Q_{sn} = Radiação solar útil que atravessa a interface ar-água ($\text{kcal.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

η = Coeficiente empírico de extinção global (m^{-1});

z = Profundidade (m).

A lei de Lambert-Beer assume um valor constante para o coeficiente de extinção global (η), ou seja, considera que as propriedades óticas da coluna de água são homogêneas relativamente aos comprimentos de onda do espectro solar.

Como esta situação não corresponde à realidade, uma vez que a camada mais à superfície da massa de água absorve uma quantidade de radiação solar maior do que as restantes camadas a diferentes profundidades, para a equação ser aplicada de forma mais real subtrai-se a fração de radiação solar incidente, assumindo que essa fração é totalmente absorvida à superfície, obtendo-se a seguinte expressão:

$$Q_{sz} = (1 - \beta)Q_{sn}e^{-\eta z}$$

Em que:

β = Razão entre a radiação absorvida à superfície e a radiação total incidente.

Para lagos ou albufeiras eutróficos, os valores de η podem ser da ordem de $0,5 \text{ m}^{-1}$ ou mesmo superiores, enquanto que em águas límpidas como nos lagos ou albufeiras oligotróficos os valores de η podem ser na ordem de $0,02 \text{ m}^{-1}$ a $0,05 \text{ m}^{-1}$ (TVA, 1972 in Coelho, 2009).

Os valores de β para lagos ou albufeiras oligotróficos são da ordem de 0,3; em águas turvas pode ser 0,8 ou mesmo superior, determinando que a radiação solar de ondas curtas é absorvida à superfície em quase toda a sua totalidade (TVA, 1972 in Coelho, 2009).

3.1.8. Constituintes biológicos e químicos considerados pelo WQRRS

O modelo WQRRS considera vários constituintes biológicos e químicos, em que os principais são em seguida elencados (HEC, 1978):

- Peixes: três tipos, com diferentes gamas de temperaturas ótimas de desenvolvimento, diferentes preferências alimentares e diferentes taxas de crescimento, respiração e mortalidade;
- Espécies bentônicas: assumindo-se que estão associadas ao substrato;
- Fitoplâncton: dois tipos, com diferentes gamas de temperaturas ótimas de desenvolvimento, diferentes taxas de respiração e de crescimento, diferentes velocidades de sedimentação e diferentes exigências em termos de nutrientes;
- Zooplâncton;
- Detritos;
- Sedimentos orgânicos (*i. e.* detritos depositados ou sedimentados);
- Sólidos suspensos inorgânicos: cinco tipos com diferentes velocidades de sedimentação;
- Sedimentos inorgânicos (*i. e.* sólidos suspensos inorgânicos sedimentados);
- Sólidos dissolvidos totais;
- Carbono inorgânico total;
- Carência bioquímica de oxigénio;
- Oxigénio dissolvido;
- Fosfatos;
- Azoto amoniacal;
- Nitritos;
- Nitratos;
- Bactérias coliformes;
- Alcalinidade total;
- pH.

O modelo WQRRS tem a capacidade de omitir um determinado parâmetro de qualidade da água, ou seja não o simula, admitindo que este é constante ao longo da simulação, exceto para a temperatura da água, uma vez que a advecção vertical de massa é função da massa específica da água que, por sua vez, depende da temperatura.

3.2. Modelos Climáticos

Existem, no essencial, dois tipos de modelos climáticos: os modelos globais e os modelos regionais (secção 2.13). Os modelos regionais são mais indicados para escalas mais pequenas ou para locais com complexa orografia, como é o caso de Portugal. O projeto ENSEMBLES estuda 12 modelos climáticos regionais, a 25 km de resolução todos forçados com Era-40, com condições de contorno para o período 1960-2000. Os valores de precipitação agregados com os índices climáticos são utilizados na análise de diferentes modelos para representar as características espaciais e temporais do clima regional e os seus eventos extremos (Soares *et al.*, 2012b).

Os modelos comportam-se de forma diferente para a simulação de aspetos importantes sobre o clima local, desde a climatologia até aos regimes de precipitação, nas montanhas ou nas regiões mais secas. Os estudos realizados com estes modelos regionais consideram que estes são indicados para a precipitação, e para locais com complexa topografia (Soares *et al.*, 2012a).

Para o presente trabalho, dos 12 modelos climáticos regionais do projeto ENSEMBLES foram escolhidos três para simular a evolução do regime térmico das albufeiras em função de previsões climáticas, estes foram forçados pelos resultados obtidos com MCG (Modelo Climático Global). As simulações obtidas com estes modelos têm como base o cenário de emissões A1B, que admite que durante o século XXI os combustíveis fósseis são utilizados de forma equilibrada (Tabela 3.1).

Na Tabela 3.1 estão descritos os três modelos climáticos regionais analisados para a simulação dos novos cenários no presente trabalho. Destes três modelos foram selecionados apenas dois, o ETHZ e o KNMI, de acordo como que é referido na secção 5.2. Na mesma Tabela 3.1 são referidos os MCG utilizados pelos modelos climáticos atrás referidos.

Tabela 3.1: Modelos Climáticos Regionais – ENSEMBLES

Acrônimo	Modelo	GCM	Instituição	Referência
ETHZ	CLM	HadCM3Q0	Swiss Institute of Technology	JAEGER <i>et al.</i> , 2008
KNMI	RACMO2	ECHAM5	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut	VAN MEIJGAARD <i>et al.</i> , 2008
SMHI	RCA3	ECHAM5	Swedish Meteorological and Hydrological Institute	SAMUELSSON <i>et al.</i> , 2011
GCM	Cenário de emissões		Instituição	Referência
HadCM3Q0	A1B		Hadley Centre	COLLINS <i>et al.</i> , 2010
ECHAM5	A1B		Max Planck Institute	MARSLAND <i>et al.</i> , 2003

Fonte: Adaptado de Soares, 2012a

4. Principais características da Albufeira de Santa Clara

No presente Capítulo são apresentadas as principais características da Albufeira de Santa Clara e uma breve descrição do aproveitamento e da sua bacia hidrográfica. Este capítulo é inserido no presente trabalho para enquadrar o caso de estudo.

O Plano de Ordenamento da Albufeira de Santa Clara (POASC) constituiu a principal fonte de informação, entre outras referências bibliográficas consultadas, para a recolha da maioria dos elementos apresentados neste Capítulo.

4.1. Características da Albufeira

A albufeira de Santa Clara está situada no sul do país, como se pode observar na Figura 4.1, a $37^{\circ}51'$ de latitude Norte e a $8^{\circ}44'$ de longitude Oeste (SNIRH). Localiza-se na bacia hidrográfica do rio Mira, abrange terrenos pertencentes às freguesias de Santa-Clara-a-Velha e de São Martinho das Amoreiras, no concelho de Odemira, e Ourique e Santana da Serra, no concelho de Ourique, todas elas inseridas no distrito de Beja (INAG, 2006).

O rio Mira tem um comprimento de 145 km, tem origem na serra do Caldeirão, a 560 m de altitude e vai desaguar no Oceano Atlântico, em Vila Nova de Milfontes (concelho de Odemira).

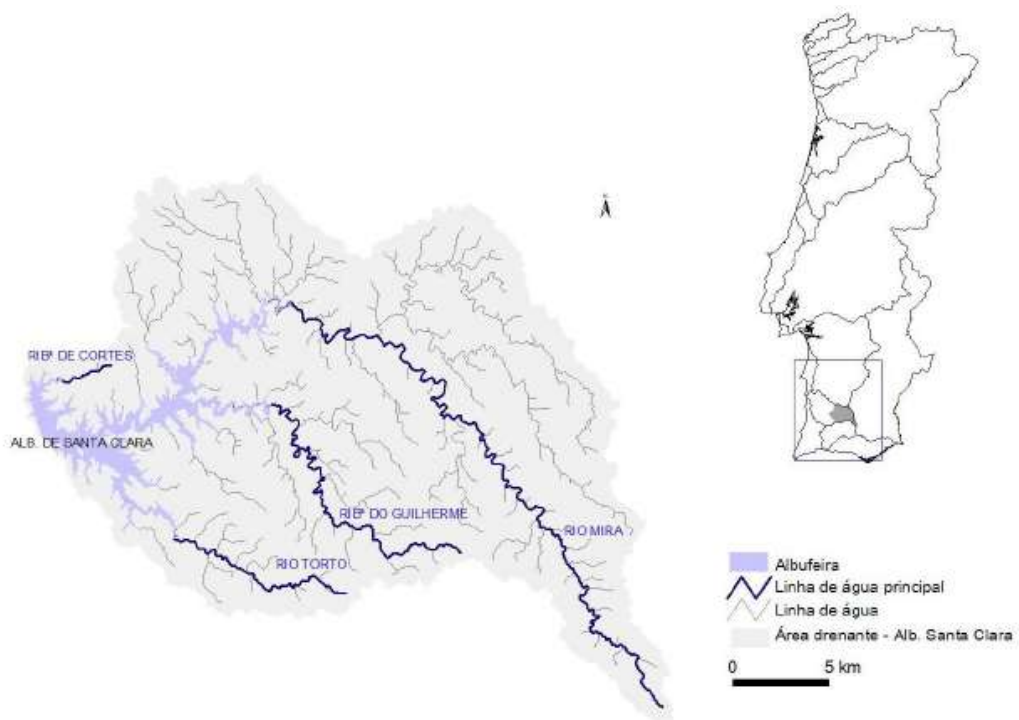


Figura 4.1: Albufeira de Santa Clara: localização e área drenante (fonte: INAG, 2011)

O rio Mira corre no sentido SE-NO até à Senhora da Cola, mudando depois de sentido para SW até à barragem de Santa Clara. Os seus principais afluentes são o rio Torto e a Ribeira do Guilherme, na margem esquerda do rio e que drenam a maior parte da área da bacia, e a ribeira de Cortes na margem direita (INAG, 2011). Na tabela 4.1 estão descritas algumas características da barragem de Santa Clara.

Tabela 4.1: Características da barragem de Santa Clara

Características Hidrológicas	
Área da bacia Hidrográfica	520 km ²
Precipitação média anual	618 mm
Caudal integral médio anual	90,6 hm ³
Caudal de Cheia	2000 m ³ /s
Período de retorno	1000 anos
Características da barragem	
Aterro	Terra zonada
Altura acima da fundação	87 m
Altura acima do terreno natural	83 m
Cota do coroamento	135 m
Comprimento do coroamento	428 m
Largura do coroamento	10 m
Fundação	Pórfiros, xistos, grauvaques
Descarregadores de cheia	
Localização	Margem esquerda
Tipo de controlo	Sem controlo
Tipo de descarregador	Poço vertical ou inclinado
Cota da crista da soleira	130 m
Desenvolvimento da soleira	28,3 m
Caudal máximo descarregado	208 m ³ /s
Dissipação de energia	Ressalto
Descarga de Fundo	
Localização	Margem esquerda
Tipo	Em túnel escavado na rocha
Diâmetro da conduta	1,5 m
Caudal máximo	124 m ³ /s
Controlo a montante	Comporta de lagartas
Controlo a jusante	Duas comportas corredeiras
Dissipação de energia	Ressalto

Fonte: Sítio das Grandes Barragens de Portugal – <http://cnpgb.inag.pt>

A bacia hidrográfica do rio Mira apresenta uma área de 520 km², e está distribuída pelos concelhos de Odemira, de Almodôvar e de Ourique. A área inundada à cota do nível de pleno armazenamento (NPA), 130 m, é de aproximadamente 1 986 ha e a capacidade total de armazenamento é de 485 hm³. O nível de máxima cheia (NMC) está à cota de 132 m e o nível mínimo de exploração (Nme) é de 114,75 m (INAG, 2011).

Foi construída principalmente para a rega e, atualmente, os usos principais da albufeira são o abastecimento de água às populações, à indústria e à agricultura, nomeadamente para a Rega do Aproveitamento Hidroagrícola do Mira, com cerca de 12 000 ha. Tem como usos secundários a natação, a pesca, navegação a remos, a vela e a motor, que ocorrem essencialmente no verão (INAG, 2006).

A água que é destinada à rega é conduzida através do canal condutor geral que tem cerca de 38 km de comprimento e que tem ligação com dois outros canais, o de Vila Nova de Milfontes com 24 km de comprimento e o canal de Odeceixe com 22 km de extensão (INAG, 2006).

Na derivação do canal condutor principal com o canal de Vila Nova de Milfontes, há um reservatório de regularização que tem um desnível de 20 m e um caudal médio afluente de 7,5 m³/s que permite a produção de energia na central hidroelétrica da Bugalheira, e que é utilizada nas estações elevatórias do aproveitamento hidroagrícola (INAG, 2006).

Esta albufeira faz o abastecimento urbano a oito povoações do concelho de Odemira: Santa Clara/Sabóia, São Teotónio, Boavista/Odemira, Zambujeira do Mar, Brejão/Azenha do Mar, Fataca/Cavaleiro/Mal Amado, Cruzamento do Almogrove/Almogrove/Longueira e Vila Nova de Milfontes. Fornece também água à povoação de Santana da Serra, no concelho de Ourique, e futuramente abastecerá povoações do concelho de Mértola (INAG, 2006).

Na Figura 4.2 é apresentada uma fotografia da área da barragem e de uma parte da albufeira de Santa Clara. A secção escolhida para a implantação da barragem encontra-se no troço do rio Mira a 8 km a montante da Freguesia de Santa Clara (INAG, 2006).



Figura 4.2: Fotografia da Barragem de Santa Clara (fonte: <http://cnpqgb.inag.pt>)

É uma bacia com pouca arborização, tendo algumas manchas de montado a norte; a sul tem alguns matos rasteiros e pastagens, estando a maior parte aproveitada por cultura cerealífera. Os solos são predominantemente arenosos, pouco férteis, e apresenta valores médios de precipitação total anual de 618 mm (INAG, 2006).

4.2. Qualidade da água

Na década de 80 foi criada a Rede Nacional de Qualidade da Água pela ex-Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, com o objetivo de monitorizar a qualidade das águas de superfície. Em 1988 houve uma alteração nesta rede de forma a compatibilizá-la com a Rede Hidrométrica Nacional, de modo a integrar dados de quantidade e de qualidade, (Rede de Qualidade da Água - RQA). Em 1991, a RQA passou a integrar os dados de qualidade da água da albufeira de Santa Clara (INAG, 2006).

Na Figura 4.3 está representada a bacia hidrográfica do rio Mira, sendo assinalada a localização da estação de monitorização na albufeira de Santa Clara.



Figura 4.3: Identificação da estação de monitorização de qualidade da água (Fonte: SNIRH)

Para o ano de 2011, a qualidade da água da albufeira de Santa Clara determinou a sua inserção na classe C – razoável, tendo sido este o último ano em que se encontram disponíveis registos de qualidade da água.

Na figura 4.4 pode ser observada a evolução da qualidade da água monitorizada pela estação da albufeira de Santa Clara, entre 1995 e 2011.

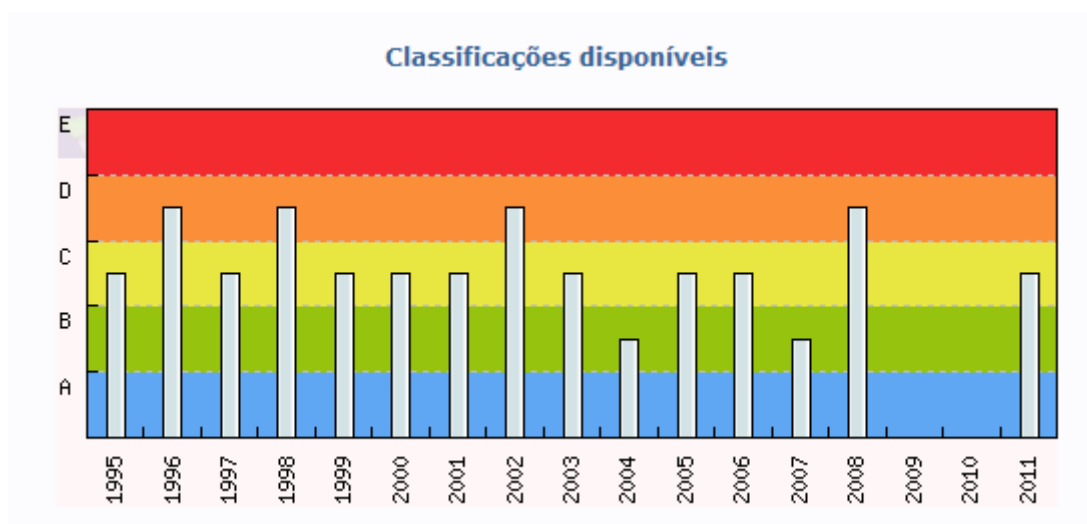


Figura 4.4: Classificação disponível para a albufeira de Santa Clara (Fonte: SNIRH)

Como se pode verificar, a qualidade da água foi classificada na maioria dos anos entre 1995 e 2011 como classe C, razoável, correspondendo a uma água com qualidade aceitável, suficiente para irrigação, para usos industriais e produção de água potável após tratamento rigoroso, de acordo com a Classificação de Usos Múltiplos do INAG. Apenas nos anos 2004 e 2007 obteve uma

classificação Boa, Classe B, e, nos anos de 1996, 1998, 2002 e 2008 foi-lhe atribuída uma classificação Má, inerente à classe D.

Na tabela 4.2 são descritos os parâmetros responsáveis pela classificação da qualidade da água segundo o SNIRH, para a estação albufeira de Santa Clara (28G/01).

Tabela 4.2: Parâmetros responsáveis pela classificação da qualidade da água entre 1995 e 2011, na estação albufeira de Santa Clara

Anos	Parâmetros responsáveis
1995	Azoto Kjeldahl e Carência química de oxigénio
1996	Oxidabilidade
1997	Carência bioquímica de oxigénio, Fenóis , Carência química de oxigénio e Oxidabilidade
1998	Oxigénio dissolvido (sat)
1999	Oxigénio dissolvido (sat) e Coliformes totais
2000	Oxigénio dissolvido (sat)
2001	Oxigénio dissolvido (sat)
2002	Fenóis
2003	Oxigénio dissolvido (sat) e Carência química de oxigénio
2004	Azoto Kjeldahl, Estreptococos fecais , Coliformes fecais , Coliformes totais , Carência química de oxigénio , Oxidabilidade e Oxigénio dissolvido (sat)
2005	Oxigénio dissolvido (sat)
2006	Oxigénio dissolvido (sat)
2007	Oxigénio dissolvido (sat), Fenóis ,Carência química de oxigénio ,Oxidabilidade e Coliformes totais
2008	Fenóis
2009	-
2010	-
2011	Oxigénio dissolvido (sat)

Fonte: SNIRH

Como se pode observar na Tabela 4.2. os parâmetros responsáveis pela classificação da massa de água foram, entre outros, os fenóis, o azoto kjeldahl, o CQO e o oxigénio dissolvido. Contudo, aquele que apresentou a maior frequência durante o período de 1995 a 2011, foi o parâmetro OD.

No Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas integradas na RH6 pretendeu-se definir condições de referência por categoria de massa de água. Para as massas de água do tipo lago (albufeiras) foram realizadas amostragens na albufeira de Santa Clara, para os anos 2004/2006 e 2009, em que os

resultados obtidos indicam “máximo potencial ecológico” para a tipologia Albufeiras do Sul por cumprir os “valores de referência” definidos pelo INAG (RH6, 2011).

Para o ano hidrológico 2008-2009, a água apresentou uma classe de qualidade A3 e, de acordo com o Decreto-Lei nº 236/98 de 1 de Agosto, esta necessita de tratamento de água bastante exigente, como tratamento físico, químico, de afinação e desinfecção para a produção de água para o consumo humano (RH6, 2011).

Nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentados os valores médios, máximos e mínimos, respetivamente, da Albufeira de Santa Clara, para o período de 1991 a 1995, segundo o POASC (INAG, 2006).

Tabela 4.3: Valores médios dos parâmetros da qualidade da água

Valores Médios													
	Temp.	pH	Fosfatos	Nitratos	Azoto	OD	CBO5	CQO	Col. Totais	Col. Fecais	Oxid.	SST	Cond.
Santa Clara	17,8	7,7	0,03	0,57	0,04	87,9	2,8	12,2	336	18	3,1	3,5	228

Fonte: POASC

Tabela 4.4: Valores máximos dos parâmetros da qualidade da água

Valores Máximos													
	Temp.	pH	Fosfatos	Nitratos	Azoto	OD	CBO5	CQO	Col. Totais	Col. Fecais	Oxid.	SST	Cond.
Santa Clara	27,0	8,5	0,21	1,97	0,30	118	9,0	33,8	7372	240	7,6	18,0	361

Fonte: POASC

Tabela 4.5: Valores mínimos dos parâmetros da qualidade da água

Valores Mínimos													
	Temp.	pH	Fosfatos	Nitratos	Azoto	OD	CBO5	CQO	Col. Totais	Col. Fecais	Oxid.	SST	Cond.
Santa Clara	11,3	7,0	0,00	0,00	0,00	37,6	1,0	0,0	0	0	1,0	0,0	121

Fonte: POASC

Os dados de qualidade utilizados para a caracterização da água da albufeira de Santa foram obtidos através do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), considerando a única estação de qualidade da água existente na albufeira – Albufeira de Santa Clara (28G/03) e que apenas disponibiliza dados de amostragem correspondentes à superfície da massa de água.

Consideraram-se como pontos de afluência ao sistema quatro ramos da albufeira: rio Mira, ribeira do Guilherme, rio Torto e ribeira de Cortes. Para a obtenção dos dados que permitiram caracterizar a qualidade dessas afluências ao sistema, recorreu-se aos elementos disponibilizados através do

SNIRH, para a estação de Castro da Cola (28H/01), localizada no Rio Mira. Esta opção justifica-se pelo facto de não existirem valores de qualidade da água que permitam caracterizar as aflúncias através dos outros três ramos, pelo que se assumiu que, qualitativamente, a qualidade da água destes ramos seria idêntica à do ramo principal, rio Mira.

4.3. Clima da Albufeira de Santa Clara

Segundo Suzanne Daveau, Portugal divide-se em dois tipos de clima pela linha Montejunto–Estrela. A norte desta linha os climas são mais frios e com maior precipitação, e o relevo dispõe-se normalmente aos ventos atlânticos, barrando a sua entrada para o interior. Ao sul da linha Montejunto–Estrela a orografia é menos acentuada, excetuando a serra de S. Mamede. A variabilidade térmica é inferior à variabilidade no norte do país, o que se observa pelo pequeno número de isolinhas. Em Santa Clara, região onde se insere a albufeira de Santa Clara, o clima é o tipo marítimo. Apresenta uma diminuição da precipitação anual nos meses verão, sendo designados por meses secos, apresenta valores de temperatura média do ar mais elevados, a incidência de radiação solar é mais intensa e apresenta um grande défice hídrico. O inverno é representado pelo semestre húmido, sendo designado por pouco rigoroso e está associado ao máximo de pluviosidade, apresenta ocorrência de geadas e grande amplitude térmica diária e anual (Ribeiro *et al.*,1991).

Os parâmetros climáticos analisados nesta dissertação foram: a precipitação, a temperatura média do ar, a temperatura à superfície da água, a temperatura do ponto de orvalho, a radiação, a humidade relativa do ar, a nebulosidade e a velocidade do vento.

A informação utilizada para o cálculo da média da precipitação é proveniente da estação udográfica de Aldeia de Palheiros (28H/01G) para o período de 1932 a 2009, a radiação foi retirada da estação meteorológica da albufeira de Santa Clara, para o período de 2001 a 2012. A temperatura média do ar, a temperatura do ponto de orvalho, a humidade relativa, a nebulosidade e a velocidade do vento foram gerados pelo Instituto Dom Luiz da FCUL para o período de 1989 a 2008. A temperatura à superfície da água foi calculada através da equação da temperatura de equilíbrio de Thomann (*in* Thomann, 1987) para o período de 1989 a 2008.

Na Tabela 4.6 apresenta-se a posição geográfica, a altitude e o período de funcionamento de cada estação utilizada.

Tabela 4.6: Descrição das estações meteorológicas

Estação	Altitude (m)	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Bacia	Tipo de Estação	Período de Funcionamento	Índice de Fiabilidade
Albufeira de Santa Clara (28G/01F)	129	37,51	-8,44	Mira	Climatológica Flutuante	13-04-2001 (Automática)	-
Aldeia de Palheiros (28H/01G)	210	37,61	-8,25	Mira	Udográfica	1-09-1931 (Convencional)	15

Fonte: elaborada a partir de dados provenientes do SNIRH

4.3.1. Precipitação

De acordo com o anteriormente referido o clima da região onde se insere a albufeira de Santa Clara é mediterrânico, sendo por isso caracterizado por uma concentração da precipitação no semestre húmido do ano, de Outubro a Março, no qual se regista cerca de 60% dos valores da precipitação total anual. Os dados de precipitação registados no posto udográfico de Aldeia de Palheiros (28H/01G), para o período de 1932 a 2009, permitiram obter o gráfico apresentado na Figura 4.5, através do qual é possível observar a variação dos valores médios da precipitação mensal ao longo do ano.

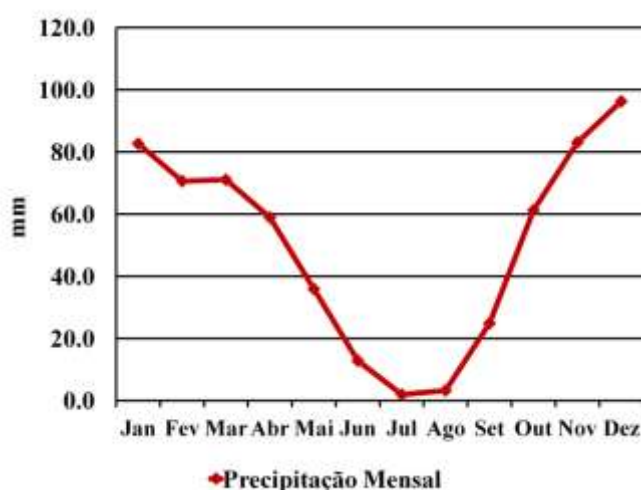


Figura 4.5: Evolução da precipitação média mensal ao longo do ano (mm)

A análise do gráfico acima representado permite observar valores de precipitação média mensal mais elevados nos meses de Outubro a Março, sendo os meses com maior pluviosidade Novembro,

Dezembro e Janeiro com valores de precipitação média mensal de 83,1 mm, 96,3 mm e 82,6mm, respetivamente.

Os valores mais baixos de precipitação média mensal ocorrem nos meses de Julho e Agosto, com 1,9 mm e 3,2 mm, respetivamente, que são provenientes de chuvadas esporádicas que ocorrem nestes meses, principalmente no mês de Agosto. A precipitação média anual registada pela estação de Aldeia de Palheiros neste período foi de 603 mm.

4.3.2. Temperatura média do ar

No clima mediterrânico, clima da região onde se insere a albufeira de Santa Clara, as temperaturas são amenas no inverno, com valores compreendidos entre 7 °C e 13 °C. No verão, as temperaturas são mais elevadas, com valores compreendidos entre 20 °C e 25 °C. Os valores médios mensais da temperatura gerados pelo Instituto Dom Luiz da FCUL, para o período de 1989 a 2008, permitiram obter o gráfico apresentado na Figura 4.6, através do qual se pode observar a variação dos valores médios da temperatura mensal ao longo do ano.

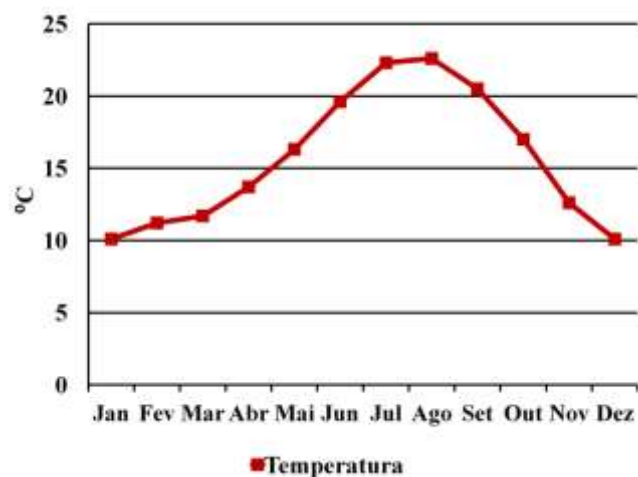


Figura 4.6: Evolução da temperatura média mensal (°C) ao longo do ano

A análise da Figura 4.6 permite verificar que os meses mais quentes, Julho, Agosto e Setembro, apresentam temperaturas médias iguais ou superiores a 20 °C, enquanto nos meses mais frios, Janeiro e Dezembro, a temperatura média é de 10 °C, de acordo com o que seria expectável num clima mediterrânico, sem diferenças muito acentuadas entre os meses mais quentes e mais frios.

A temperatura média anual nesta zona é de 15,7 °C, sendo o valor médio mensal mais elevado de 22,6 °C em Agosto e o valor médio mensal mais baixo de 10,1 °C em Janeiro e em Dezembro.

4.3.3. Temperatura à superfície da água

A temperatura de equilíbrio é designada como a temperatura da água para a qual as trocas de energia na interface ar-água são nulas. Esta caracteriza de forma adequada as trocas de energia à superfície de uma massa de água homogénea (HEC, 1978).

Os dados relativos à temperatura à superfície da água foram calculados a partir da equação da temperatura de equilíbrio de acordo com a formulação apresentada em Thomann (*in* Thomann, 1987), para o período de 1989 a 2008. O cálculo desta equação tem conta os dados da temperatura do ar, da temperatura do ponto de orvalho e da humidade relativa, apresentada pela seguinte expressão:

$$T_e = T_d + \left(\frac{H_s}{K} \right)$$

Em que:

T_d - Temperatura do ponto de orvalho, apresentada na secção 4.3.5;

$H_s = Q_s$ - radiação solar de ondas curtas incidente na superfície expressa em cal/cm².dia;

K - coeficiente global de trocas de calor (W/m².°C) obtido pela seguinte expressão:

$$K = 4,5 + (0,05 * T_{ag}) + (\text{beta } f(U_w)) + (0,47 f(U_w))$$

em que:

U_w - velocidade do vento em m/s;

$f(U_w)$ - função do vento em W/m²*mm Hg;

beta expresso mm Hg/°C.

Os dados obtidos através desta equação permitiram obter o gráfico apresentado na Figura 4.7, através do qual se podem observar a variação dos valores médios da temperatura à superfície da água mensal ao longo do ano.

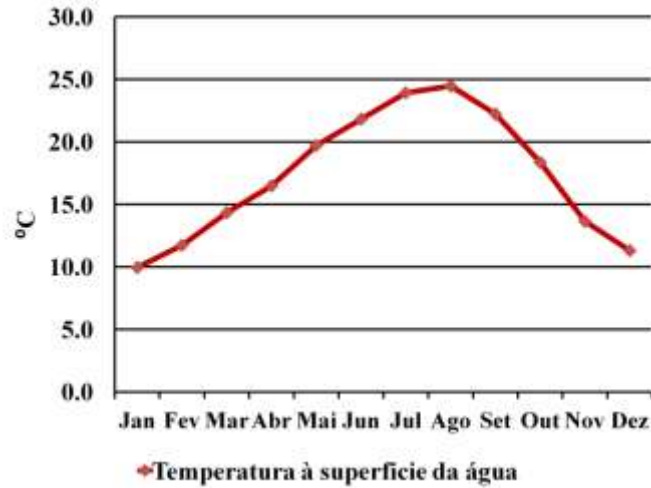


Figura 4.7: Evolução dos valores médios mensais para a temperatura da água (°C)

Por observação da Figura 4.7, verifica-se que os meses com valores de temperatura média da água mais elevados são os meses da estação mais quente, Julho com 23,9 °C, Agosto com 24,5 °C e Setembro com 22,2 °C. Os meses que apresentam uma temperatura média mais baixa são os meses da estação fria, ou seja, Janeiro com 9,9 °C, Fevereiro com 11,7 °C e Dezembro com 11,3 °C. No período de 1989 a 2008, a temperatura média anual à superfície da água foi de 17,3 °C.

4.3.5. Temperatura do Ponto de Orvalho

A temperatura do ponto de orvalho é a temperatura à qual o vapor de água presente no ar passa ao estado líquido através da condensação formando pequenas gotas designadas por orvalho. Este fenómeno acontece quando a temperatura do ar diminui. Os dados utilizados foram gerados pelo Instituto Dom Luiz da FCUL, para o período de 1989 a 2008, a partir da seguinte equação:

$$T_{dew} = T_{ar} - \left[\left((14,55 + 0,114T_{ar}) \left(1 - \left(\frac{Hr}{100} \right) \right) \right) + \left((2,5 + 0,007T_{ar}) \left(1 - \left(\frac{Hr}{100} \right) \right) \right)^3 \right. \\ \left. + ((15,9 + 0,117T_{ar}) \left(1 - \left(\frac{Hr}{100} \right) \right)^4 \right) \right]$$

Em que:

T_{dew} – Temperatura de Orvalho em °C;

T_{ar} – Temperatura do ar (°C);

Hr – Humidade relativa (%).

Estes dados permitiram obter o gráfico apresentado na Figura 4.8, através do qual se pode observar a variação dos valores médios da temperatura do ponto de orvalho ao longo do ano.

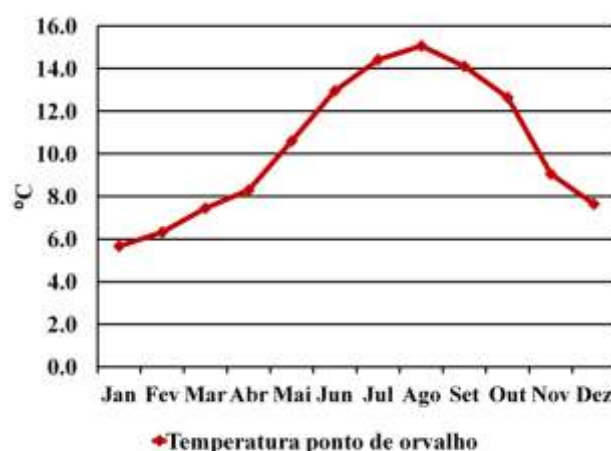


Figura 4.8: Evolução da temperatura média do ponto de orvalho (°C)

Por observação da Figura 4.8, verifica-se que os meses com valores de temperatura do ponto de orvalho mais elevados são os meses da estação mais quente, Julho com 14,4 °C, Agosto com 15,1 °C e Setembro com 14,1 °C. Os meses que apresentam uma temperatura mais baixa são os meses da estação fria, ou seja, Janeiro com 5,7 °C, Fevereiro com 6,3 °C e Março com 7,4 °C. No período de 1989 a 2008, a temperatura do ponto de orvalho média anual estimada foi de 10,3 °C.

4.3.6. Radiação

A radiação solar é mais intensa nos meses mais quentes, em que o número de horas de sol é mais elevado do que nos meses frios, em que os dias são mais curtos e a exposição solar menor. Na Figura 4.9 é apresentada a variação dos valores médios mensais de radiação solar registados na estação da albufeira de Santa Clara, para o período de 2001 a 2012.

Na análise da Figura 4.9 pode-se observar que os meses da estação quente apresentam valores de radiação solar elevados, nomeadamente Maio, Junho e Julho com 5258 W/m², 5749 W/m² e 5423 W/m², respetivamente. Os meses com valores de radiação solar mais baixos são Janeiro, Novembro e Dezembro com 1740 W/m², 1992 W/m² e 1541 W/m², respetivamente, uma vez que são os meses que apresentam menos horas de sol. A radiação média anual é de 3580 W/m².

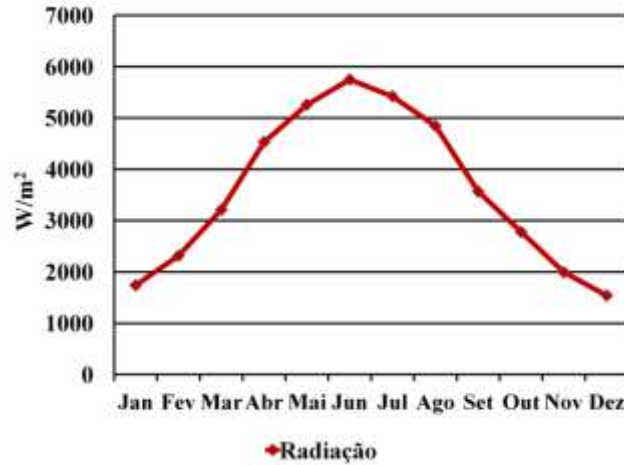


Figura 4.9: Evolução dos valores médios mensais da radiação solar (W/m^2)

4.3.7. Nebulosidade

A nebulosidade pode ser definida pela fração de nuvens que cobre o céu e expressa-se numa escala de 0 a 10 (décimos), em que zero representa o céu limpo e dez o céu completamente nublado. Os valores de nebulosidade foram gerados pelo Instituto Dom Luiz da FCUL, para o período de 1989 a 2008, permitiram obter o gráfico da figura 4.10 no qual se pode observar a variação dos valores médios da nebulosidade mensal ao longo do ano.

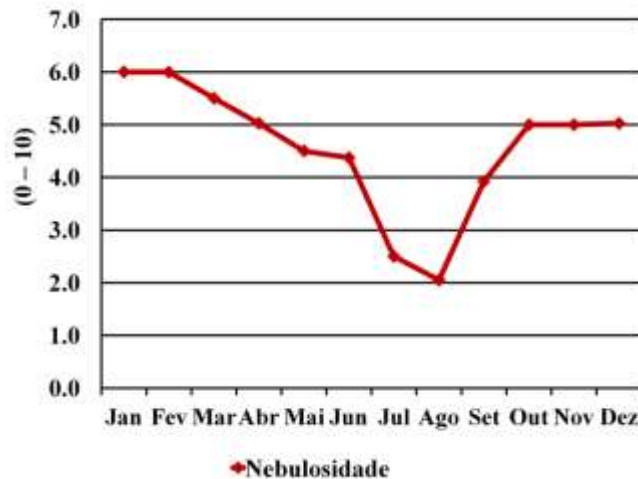


Figura 4.10: Evolução dos valores médios mensais de nebulosidade (0-10)

Por observação da Figura 4.10, verifica-se que os valores mais altos de nebulosidade, ou seja céu encoberto, encontram-se nos meses da estação fria, Janeiro, Fevereiro e Março, com valores de 0,60, 0,60 e 0,55, respetivamente. Os meses da estação seca apresentam os valores mais baixos do ano, Julho e Agosto com 0,25 e 0,21 respetivamente. A nebulosidade média anual é de 0,46 (0-10).

4.3.8. Humidade Relativa do Ar

A humidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água existente no ar (humidade absoluta) e a quantidade máxima de água que poderia existir à mesma temperatura (ponto de saturação). O clima da região onde está inserida a albufeira de Santa Clara, clima mediterrânico, apresenta valores de humidade relativa do ar elevados durante todo o ano, especialmente no semestre húmido do ano, de Outubro a Março. Os valores apresentados na Figura 4.11 foram gerados pelo Instituto Dom Luiz da FCUL, relativamente ao período de 1989 a 2008, no qual se pode observar a variação dos valores médios de humidade relativa do ar mensais ao longo do ano.

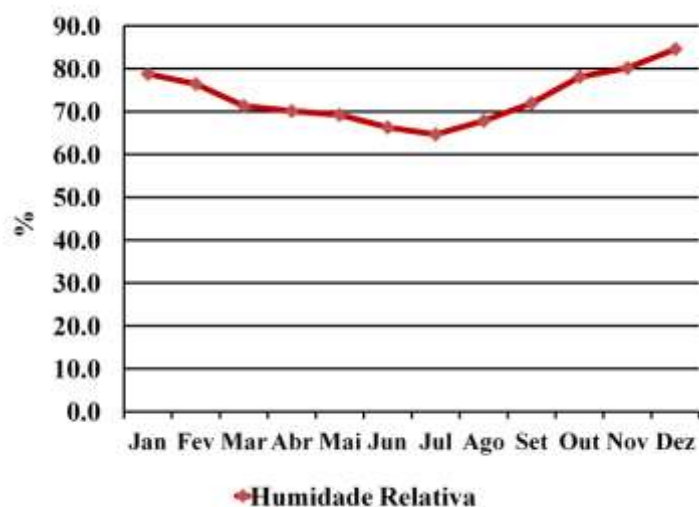


Figura 4.11: Evolução dos valores médios mensais da Humidade Relativa (%)

A análise da Figura 4.11 permite verificar que os valores ao longo do ano não apresentam variações significativas. No entanto, pode observar-se que os meses com valores mais elevados são Novembro e Dezembro com 80,1 % e 84,6 %, respetivamente, e que o mês de Julho com 64,7 % é o que apresenta o valor de humidade média mensal mais baixo. A média anual da humidade relativa é de 73,3 %.

4.3.9. Velocidade do vento

Os dados da velocidade do vento foram gerados pelo Instituto Dom Luiz da FCUL para o período 1989 a 2008, a partir da seguinte equação:

$$\text{Vel. Vento} = \sqrt{(x(u))^2 + (y(v))^2}$$

Em que:

x(u) e y(v)- Direção do vento

os dados obtidos através da equação anterior permitiram obter o gráfico apresentado na Figura 4.12, através do qual se pode observar a variação dos valores médios da velocidade do vento mensal ao longo do ano.

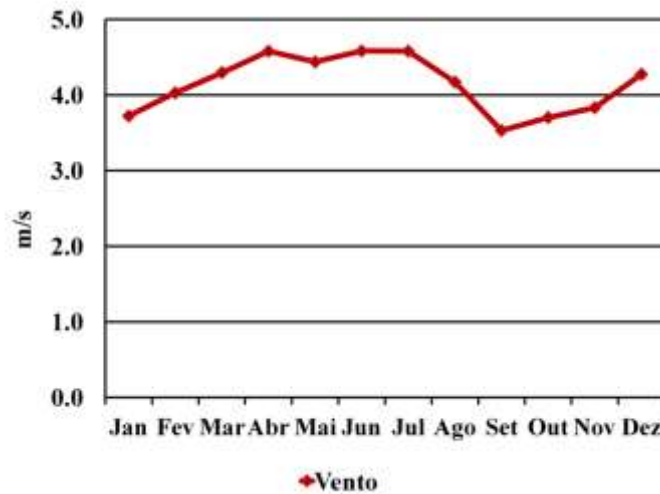


Figura 4.12: Evolução dos valores médios mensais da Velocidade do Vento (m/s)

A velocidade média do vento no período de 1989 a 2008 apresenta valores mínimos em Janeiro, Setembro e Outubro com 3,7 m/s, 3,5 m/s e 3,7 m/s, respetivamente. E o valor mais alto nos meses de Abril, Junho e Julho com 4,6 m/s. Os valores ao longo do ano são bastante uniformes, apresentando uma velocidade média anual de 4,1 m/s.

5. Caso de estudo. Implementação dos modelos

5.1. Introdução

O principal objetivo desta dissertação, como descrito no capítulo 1.2, corresponde à avaliação dos impactos das AC na qualidade da água para dois cenários futuros, sendo que cada um deles é simulado e comparado com um cenário base, que corresponde ao período 1989 a 2008. Para a estimativa dos valores futuros dos diferentes parâmetros descritores da qualidade da água, todos os cenários foram simulados pelo modelo unidimensional WQRRS.

Neste capítulo são descritos os métodos e os processos que levaram à obtenção dos dados que permitem a aplicação do modelo, com destaque para as condições iniciais da massa de água, as características físicas do sistema, as afluências ao sistema, tanto a nível qualitativo como quantitativo, e os parâmetros meteorológicos que influenciam o sistema.

Serão abordados os seguintes aspetos:

- Definição dos cenários;
- Representação conceptual adotada para o sistema da albufeira de Santa Clara de forma a suportar a aplicação do modelo de simulação unidimensional WQRRS;
- Análise dos dados necessários ao funcionamento do modelo para os três cenários simulados;
- Calibração e verificação do modelo, a nível da hidrodinâmica do sistema e da sua qualidade da água.

5.2. Definição dos cenários

Os dados recolhidos foram trabalhados estatisticamente de forma a serem inseridos no modelo de qualidade da água para três cenários diferentes. Os cenários submetidos a simulação correspondem a períodos temporais distintos, sendo o primeiro cenário obtido a partir de dados adquiridos sobre um período no passado recente e os outros dois cenários são obtidos a partir de valores simulados para períodos futuros.

O cenário base consiste num conjunto de dados meteorológicos relativos ao período temporal compreendido entre 1989 e 2008 (secção 4.3), que foram obtidos pelo Instituto Dom Luiz da FCUL, através de simulações realizadas com o modelo WRF, com uma resolução espacial de 9 km, forçado com a reanálise *ERA-Interim*, produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

Os dois cenários futuros foram escolhidos de um total de seis cenários, três relativos ao período 2021-2040, simulados por três MCR (Modelos Climáticos Regionais) diferentes (secção 3.2.), o KNMI, ETHZ e SMHI, e outros três cenários para o período de 2081-2100 também simulados pelos modelos regionais, KNMI, ETHZ e SMHI. Os dois cenários temporais foram escolhidos devido ao aumento da temperatura média global que apresentaram em relação ao cenário base. O cenário majorante por ser aquele que apresentava maiores diferenças em relação ao cenário base, e o cenário intermédio por ser o que se situava numa posição intermédia entre o cenário base e o cenário majorante.

1. Cenário base – é o cenário que corresponde ao período de 1989-2008. Os dados meteorológicos utilizados foram simulados pelo Instituto Dom Luiz (secção 4.3.), exceto a precipitação que foi obtida através dos registos da estação udométrica de Aldeia de Palheiros. Os valores dos parâmetros descritores da qualidade da água foram obtidos através dos registos do SNIRH. Este cenário serve essencialmente de comparação dos valores dos parâmetros descritores da qualidade da água, com os obtidos através das simulações efetuadas para os dois cenários futuros.
2. Cenário Intermédio – é o cenário que é simulado com os valores meteorológicos obtidos através do modelo climático regional KNMI para o período futuro de 2021-2040.
3. Cenário Majorante – é o cenário que é simulado com os valores meteorológicos simulados pelo modelo regional ETHZ para o período futuro de 2081-2100.

5.3. Dados necessários ao Funcionamento do modelo

5.3.1. Período de simulação

O período de simulação do cenário base para a hidrodinâmica e para os parâmetros da qualidade da água corresponde ao período 1989-2008, que foi escolhido tendo em conta os dados disponíveis pelo Instituto Dom Luiz. O cenário intermédio corresponde ao período de 2021-2040 e as suas condições meteorológicas foram simuladas pelo MCR KNMI. O cenário majorante corresponde ao período 2081-2100 e as suas condições meteorológicas foram simuladas pelo MCR ETHZ.

5.3.2. Representação Conceptual

A representação conceptual tem que ser definida pelo utilizador para cada caso, tendo em conta as características do sistema a modelar e dos resultados que pretende obter.

Como se pode observar na Figura 3.1 da secção 3.1.1, a massa de água está dividida em camadas uniformes de volume de água e espessura, limitadas por planos horizontais e pelos limites da albufeira, dentro de cada camada ocorrem condições de mistura completa. As afluências e as

tomadas de água são consideradas como fontes ou perdas de água dentro de cada camada, e são instantaneamente misturadas de forma homogénea.

Para a obtenção da representação conceptual é necessário definir um conjunto de parâmetros, como a espessura de cada camada, que é em função do grau de discretização que se pretende. O valor utilizado neste trabalho foi de um metro, que é o valor que é mais utilizado.

Outros parâmetros a definir são: o valor das cotas da superfície livre *versus* áreas inundadas, a largura da barragem para cada cota, a cota do fundo que corresponde à zona mais profunda, a cota máxima da superfície livre, o número de tomadas de água, de descarregadores, de aflúências à massa de água, as características físicas e geométricas e os valores de caudal.

A partir da definição deste conjunto de parâmetros, o modelo gera a curva característica de cotas da superfície livre *versus* os volumes armazenados e, através dos caudais afluentes e efluentes, o modelo simula a evolução da cota de superfície livre.

A partir destes dados fornecidos pelo modelo é realizada a primeira fase de calibração, que passa pela comparação das curvas características, real e calculada, e pela avaliação do balanço hidrológico desenvolvido, que consiste na comparação dos valores medidos e simulados da evolução da cota da superfície livre ao longo do tempo.

A definição das áreas inundadas foi feita com base nas curvas de volumes armazenados *versus* as cotas e as das áreas inundadas *versus* as cotas, disponibilizadas pelo SNIRH, como se pode observar na figura 5.1.

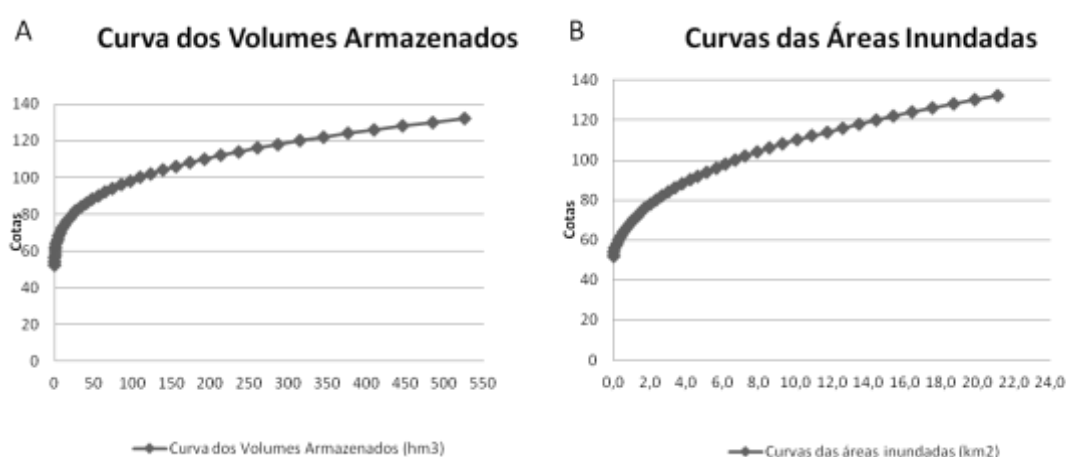


Figura 5.1: Curvas características da albufeira de Santa Clara. **A:** Volumes Armazenados; **B:** Áreas Inundadas

Os valores para as cotas de NPA, NMC, capacidade total e útil da albufeira, bem como para a largura da barragem a várias cotas, foram obtidos através da dos elementos disponibilizados no portal da Agência Portuguesa do Ambiente, relativamente à Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB), concretamente no que se refere à publicação intitulada “Large Dams in Portugal”. Foram consideradas três saídas de água: descarga de fundo, canal de rega e descarregador de cheias. As características da primeira foram obtidas através do SNIRH, a segunda através da Associação de beneficiários do Mira e a terceira pela consulta da publicação “Large Dams in Portugal”.

5.3.3. Caudais

Para o desenvolvimento dos estudos de simulação matemática da qualidade da água da albufeira de Santa Clara determinou-se os valores dos caudais afluentes ao sistema e efluentes do sistema. O cálculo destes caudais realizou-se tendo como base os dados disponibilizados através do SNIRH, para a estação hidrométrica de Santa Clara (28G/01A), que permitiram estabelecer um balanço entre os caudais descarregados, os caudais captados para diversos tipos de consumo e a variação do volume armazenado na albufeira num determinado intervalo de tempo. Os valores de escoamento para o cenário base foram calculados a partir destes caudais e dos valores de precipitação disponibilizados pelo SNIRH para a estação udométrica Aldeia de Palheiros (28H/01G).

Os caudais afluentes para o cenário intermédio foram calculados a partir do coeficiente de escoamento, calculado a partir da relação precipitação-escoamento inerente ao cenário base, e da precipitação simulada para este período (2021-2040).

Para o cenário majorante os caudais médios mensais afluentes foram calculados de forma similar à considerada para o cenário intermédio, para o período de 2081 a 2100.

Na Tabela 5.1 estão representados os caudais médios mensais afluentes à Albufeira de Santa Clara para os três cenários, base (1989-2008), intermédio (2021-20140) e majorante (2081-2100).

Tabela 5.1: Caudais médios mensais afluentes para os três cenários simulados

Mês	Caudais Afluentes (m ³ /s)		
	Cenário Base	Cenário Intermédio	Cenário Majorante
Jan	4,49	2,57	2,02
Fev	4,25	4,52	2,38
Mar	3,86	3,2	1,19
Abr	3,31	2,69	0,9
Mai	1,95	0,93	0,73
Jun	0,72	0,69	0,73
Jul	0,1	0,01	0
Ago	0,17	0,11	0,04
Set	1,4	0,41	1,16
Out	3,33	2,48	2,51
Nov	4,66	4,41	2,78
Dez	5,23	4,79	1,53

Por análise da Tabela 5.1, verifica-se que as afluições à albufeira de Santa Clara são maiores para os meses em que ocorre mais precipitação, e que o mês que apresenta um maior valor médio mensal de caudal afluente é Dezembro com 5,23 m³/s. Os meses de verão apresentam valores bastante mais baixos.

O cenário intermédio em comparação com o cenário base, apresenta no geral, caudais de afluentes menores. Os meses que apresentam valores maiores de caudais médios mensais afluentes no cenário intermédio são os meses de inverno, Dezembro apresenta o maior valor com 4,79 m³/s. O menor valor de caudal médio mensal afluente obtido é inerente a Julho, com 0,01 m³/s.

Através da análise ao cenário majorante conclui-se que no geral os caudais têm tendência a diminuir praticamente para metade, relativamente ao cenário base, apresentando valores muito menores. Os meses que apresentam valores mais elevados de caudais médios mensais são os meses de inverno. Novembro apresenta 2,78 m³/s, sendo o mês com o maior valor de caudal afluente. O menor valor de caudal médio mensal afluente é Julho apresentando um valor nulo.

5.3.4. Qualidade das Afluições

Para a caracterização qualitativa das afluições da albufeira de Santa Clara, foram utilizados os dados de qualidade para a estação de Castro Cola (28H/01), disponíveis no SNIRH. Assumiram-se estes dados para todas as afluições da albufeira, sendo utilizados como dados de entrada no modelo relativamente às afluições naturais (de acordo com o referido na secção 4.2.).

Os parâmetros de qualidade da água que foram selecionados para o exercício de simulação são: temperatura, oxigênio dissolvido, bactérias coliformes, azoto amoniacal, nitritos, nitratos, fósforo dissolvido, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais e carência bioquímica de oxigênio.

Ao nível dos parâmetros descritores da qualidade da água, o mais relevante para o estudo desenvolvido é a temperatura, sendo um parâmetro que influencia todas as reações químicas e biológicas que normalmente se processam nesse meio e influencia direta e indiretamente todos os outros descritores da qualidade da água (Coelho *et al.*, 1999). O oxigênio dissolvido é também um parâmetro importante em qualquer estudo de qualidade de massas de água naturais, podendo ser considerado como a variável por excelência para a definição “do estado de qualidade do ecossistema aquático” (Thomann, 1987 in Coelho *et al.*, 1999). A simulação do azoto amoniacal, nitritos, nitratos e fósforo dissolvido é também indispensável uma vez que estão associados à produção primária e são principais responsáveis pela eutrofização. Os sólidos suspensos totais são relevantes na medida em que o excesso destes compostos aumenta a turbidez da água, diminuindo a propagação da radiação solar afetando a produção primária e a percentagem de oxigênio dissolvido na massa de água.

Na Tabela 5.2. apresentam-se os dados da qualidade média das afluentes, inerentes ao período 2002-2009, que foram utilizadas para a simulação dos três cenários, de base e os dois cenários futuros.

Tabela 5.2: Qualidade média das afluentes utilizadas nos três cenários

Mês	OD (mg/l)	CBO ₅ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	pH
Jan	9,7	3	0,08	1,5	0,008	0,03	7,6
Fev	8,7	3	0,06	1,46	0,004	0,09	8,8
Mar	8,6	3	0,06	1,68	0,003	0,05	6,6
Abr	7,8	3	0,06	1,49	0,004	0,06	7,9
Mai	7,0	3	0,06	1,42	0,006	0,05	7,6
Jun	6,1	3	0,06	1,71	0,003	0,08	7,2
Jul	5,1	3	0,06	1,55	0,005	0,03	7,1
Ago	6,1	3	0,08	1,56	0,003	0,1	7,7
Set	7,2	3	0,04	1,55	0,002	0,06	8,2
Out	7,3	3	0,08	1,68	0,045	0,17	7,6
Nov	8,0	3	0,18	1,9	0,051	0,05	6,8
Dez	8,6	3	0,05	1,7	0,019	0,04	7,4

Fonte: SNIRH

5.3.5. Dados meteorológicos

A informação meteorológica disponível é muito importante para os resultados obtidos por um modelo de simulação da qualidade de massas de água, principalmente no que diz respeito às camadas mais superficiais de uma albufeira, onde o vento, por exemplo, pode influenciar as trocas gasosas e de energia na interface ar-água (Diogo *et al.*, 2003).

Cenário base

No presente caso de estudo, os dados meteorológicos foram obtidos pelo Instituto Dom Luiz da FCUL e os valores de precipitação foram retirados da estação udométrica Aldeia de Palheiros (28H/01G), de acordo com o referido anteriormente na secção 4.3.1. Estes valores são apresentados na tabela 5.3 para o período de 1989 a 2008.

Tabela 5.3: Dados Meteorológicos para o período 1989-2008

Mês	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	Temp. ponto de orv. (°C)	Precipitação (mm)	Hum. Rel. (%)	Vel. Vento (m/s)	Nebul. (déc.)
Jan	9,5	9,9	5,7	82,6	78,8	3,7	6,0
Fev	10,7	11,7	6,3	70,6	76,4	4,0	6,0
Mar	13,2	14,3	7,4	71,0	71,3	4,3	5,5
Abr	14,4	16,5	8,3	58,9	70,1	4,6	5,0
Mai	17,6	19,7	10,6	35,9	69,2	4,4	4,5
Jun	20,3	21,8	13,0	12,8	66,3	4,6	4,4
Jul	22,3	23,9	14,4	1,9	64,7	4,6	2,5
Ago	22,1	24,5	15,1	3,2	67,8	4,2	2,1
Set	20,0	22,2	14,1	24,9	71,9	3,5	3,9
Out	16,8	18,4	12,6	61,2	78,0	3,7	5,0
Nov	12,6	13,6	9,1	83,1	80,1	3,8	5,0
Dez	10,3	11,3	7,6	96,3	84,6	4,3	5,0

Fonte: Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, exceto Temperatura da água e temperatura do ponto de orvalho, calculados a partir de Thomann (1987).

Cenário Intermédio

Os dados meteorológicos que foram utilizados como dados de entrada do cenário intermédio no modelo da qualidade da água, WQRRS, foram simulados pelo MCR KNMI para o período de 2021-2040. Esses dados são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Dados Meteorológicos para o período 2021-2040 simulado pelo MCR KNMI

Mês	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	Temp. ponto de orv. (°C)	Precipitação (mm)	Hum. Rel. (%)	Vel. Vento (m/s)	Nebul. (déc.)
Jan	11,0	12,4	8,5	47,4	85,1	3,4	6,0
Fev	11,5	13,7	8,4	68,9	82,1	3,5	6,0
Mar	11,9	14,9	7,9	58,9	77,7	3,8	5,5
Abr	14,5	18,5	9,6	46,3	74,0	3,6	5,0
Mai	17,8	20,3	10,1	17,1	64,0	3,4	4,5
Jun	22,7	22,9	11,9	11,9	55,6	3,3	4,4
Jul	26,0	25,2	13,1	0,1	50,8	3,2	2,5
Ago	25,2	25,2	14,1	2,1	54,8	3,1	2,1
Set	22,9	22,7	13,3	7,0	59,9	2,9	3,9
Out	18,1	18,9	12,5	45,7	72,4	3,0	5,0
Nov	13,8	15,2	10,4	76,0	80,7	3,2	5,0
Dez	11,5	12,9	8,9	88,2	84,7	3,3	5,0

Fonte: Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Por análise da Tabela 5.4 e em comparação com a Tabela 5.3, os valores de temperatura média do ar, da temperatura média da água e da temperatura média do ponto de orvalho, aumentam para o período 2021-2040. Por outro lado os valores médios da precipitação tendem a diminuir. Os valores de humidade relativa aumentam nos meses de inverno e diminuem nos meses de verão. A velocidade do vento, também aumenta em relação aos valores do cenário base, e a nebulosidade mantém-se semelhante.

Cenário Majorante

Para o cenário majorante, os dados meteorológicos que foram utilizados como dados de entrada no modelo WQRRS, foram simulados pelo MCR ETHZ para o período de 2081-2100. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Dados Meteorológicos para o período 2081-2100 - MCR ETHZ

Mês	Temp. ar (°C)	Temp. água (°C)	Temp. ponto de orv. (°C)	Precipitação (mm)	Hum. Rel. (%)	Vel. Vento (m/s)	Nebul. (déc.)
Jan	14,8	14,1	9,9	37,2	75,5	3,4	6,0
Fev	17,5	15,9	10,4	36,2	67,4	3,6	6,0
Mar	20,0	18,4	11,3	22,0	61,9	3,6	5,5
Abr	24,2	21,5	13,1	15,5	54,2	3,5	5,0
Mai	27,4	24,2	15,0	13,4	51,7	3,2	4,5
Jun	27,5	26,2	16,6	12,6	55,1	3,2	4,5
Jul	25,8	27,9	16,8	0,0	60,6	2,9	2,5
Ago	22,3	25,9	14,7	0,8	65,7	3,0	2,0
Set	18,4	22,3	13,3	20,1	75,2	2,9	3,5
Out	15,6	18,7	12,5	46,3	83,5	3,2	5,0
Nov	13,7	15,8	11,2	47,9	85,5	3,1	5,0
Dez	13,4	13,8	9,6	28,1	79,8	3,2	5,0

Fonte: Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Por análise da Tabela 5.5, e em comparação com os valores apresentados na Tabela 5.3, é possível verificar que os valores de temperatura média do ar, da temperatura média da água e da temperatura média do ponto de orvalho apresentam um aumento, em alguns meses, mais de 4°C para o período 2081-2100. No que se refere aos valores médios de precipitação, observa-se uma diminuição para cerca de metade. Os valores de humidade relativa também diminuem e a velocidade do vento aumenta em relação aos valores do cenário base, mantendo-se idênticos os valores de nebulosidade.

6. Resultados obtidos e Discussão

6.1. Situação A

Foram simulados 11 parâmetros descritores da qualidade da água: temperatura, oxigénio dissolvido, bactérias coliformes, azoto amoniacal, nitritos, nitratos, fósforo dissolvido, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais e carência bioquímica de oxigénio. Apesar de todos estes parâmetros terem sido simulados, foi dada particular atenção aos descritores temperatura da água e oxigénio dissolvido, sendo esses que vão ser objeto de análise.

Para cada um dos parâmetros analisados é apresentada a sua evolução vertical ao longo da coluna de água, através de gráficos. Para cada um dos parâmetros são analisados 12 gráficos, em cada um estão representados três cenários, cenário base, cenário intermédio (KNMI) e cenário majorante (ETHZ).

6.1.1. Temperatura

A temperatura das massas de água é um dos parâmetros mais importantes na avaliação da sua qualidade, como referido ao longo do presente trabalho. Este parâmetro influencia, direta e indiretamente, todos os outros descritores da qualidade da água. Consequentemente, diversas transformações ou efeitos que ocorrem no meio aquático vão ser alterados pelo aumento da sua temperatura, tais como a capacidade de dissolução, de solubilização, de evaporação e o potencial de depuração. Além deste facto, como se trata de uma massa de água lântica, a potencial alteração da temperatura da água vai influenciar também o seu comportamento hidrodinâmico (Coelho, 2009).

Deste modo, deu-se particular atenção a este parâmetro durante a fase de calibração, no que se refere à simulação do comportamento térmico da albufeira.

Os valores obtidos são apresentados sob a forma de gráficos ao longo deste capítulo. Os perfis verticais obtidos apresentam os resultados do modelo WQRRS, que são representativos de toda a massa de água, em resultado do próprio carácter unidimensional do modelo utilizado. Os três perfis apresentados correspondem aos três cenários simulados: cenário base (1989-2009); cenário intermédio (KNMI) (2021-2040); e cenário majorante (ETHZ) (2081-2100). Através desses gráficos será possível comparar os resultados inerentes aos vários cenários e estabelecer a relação entre eles.

Nas figuras 6.1 a 6.6 (situação A) são apresentados os gráficos correspondentes à simulação da temperatura para a Albufeira de Santa Clara, para os três cenários anteriormente descritos,

possibilitando a comparação entre cenários e ao longo do tempo. Recorda-se que, para cada cenário, os resultados foram obtidos em função de dados de entrada que correspondem a valores médios inerentes a cada período temporal, característico de cada um dos cenários considerados.

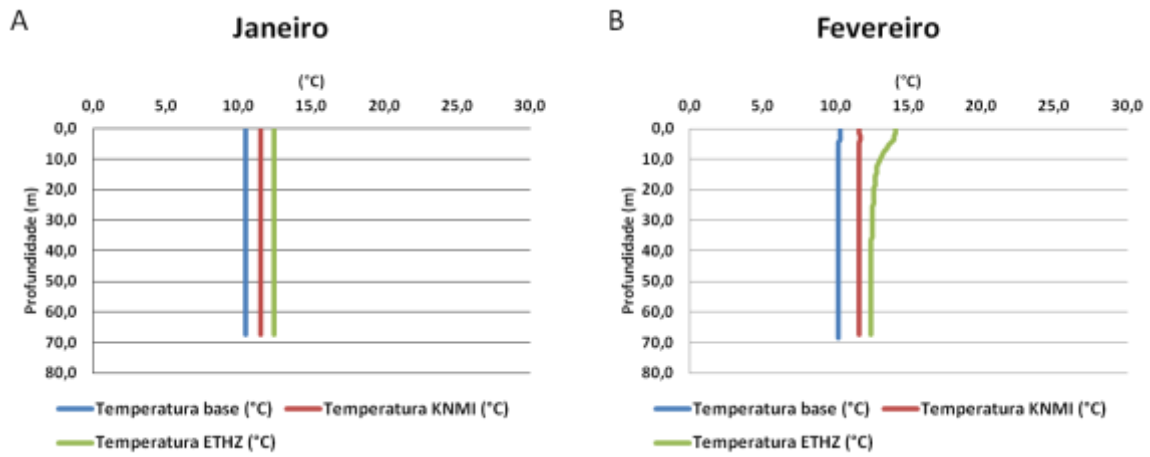


Figura 6.1: Perfis de Temperatura. A: Janeiro; B: Fevereiro

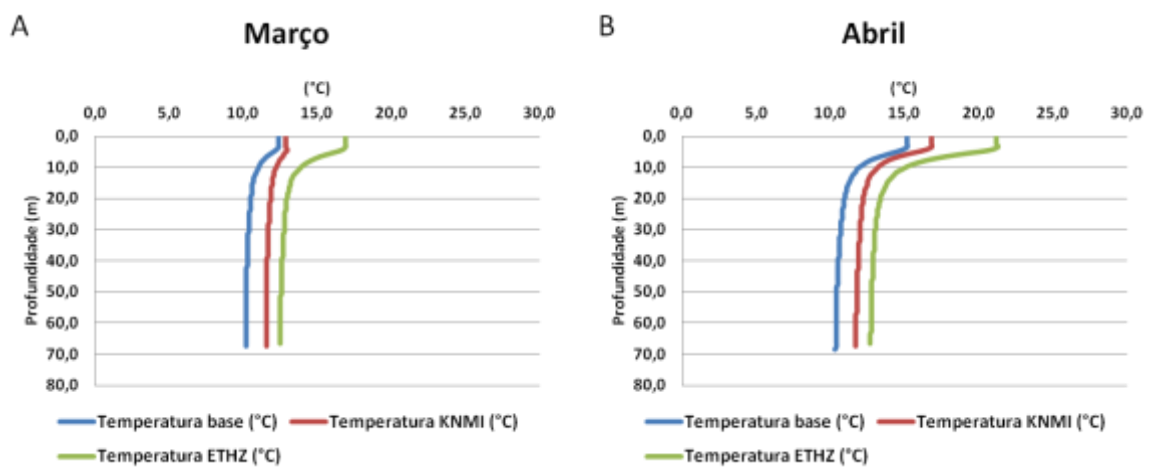


Figura 6.2: Perfis de Temperatura. A: Março; B: Abril

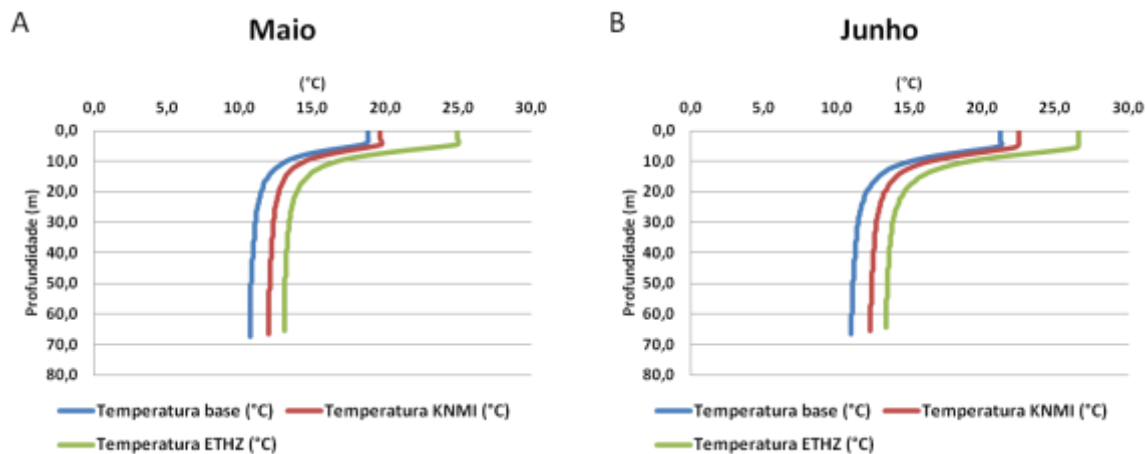


Figura 6.3: Perfis de Temperatura. A: Maio; B: Junho

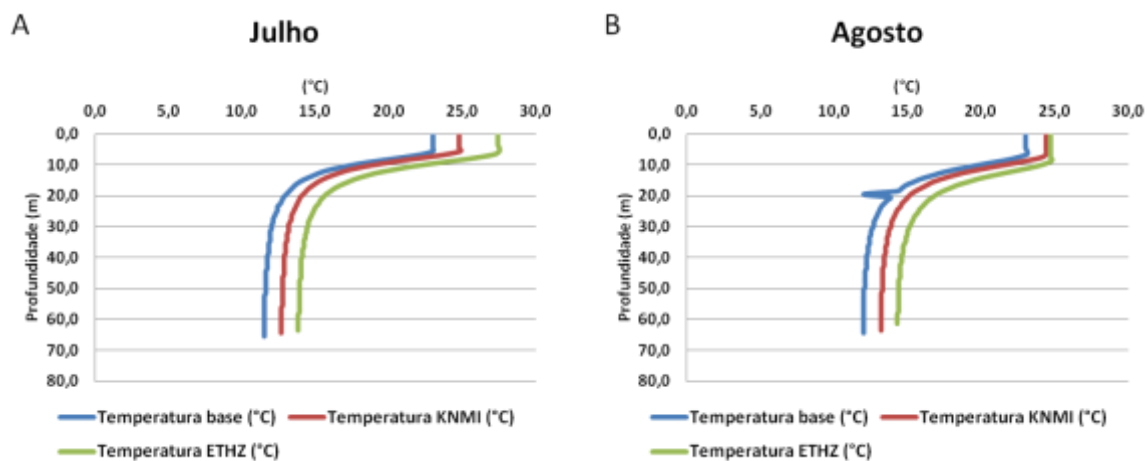


Figura 6.4: Perfis de Temperatura. A: Julho; B: Agosto

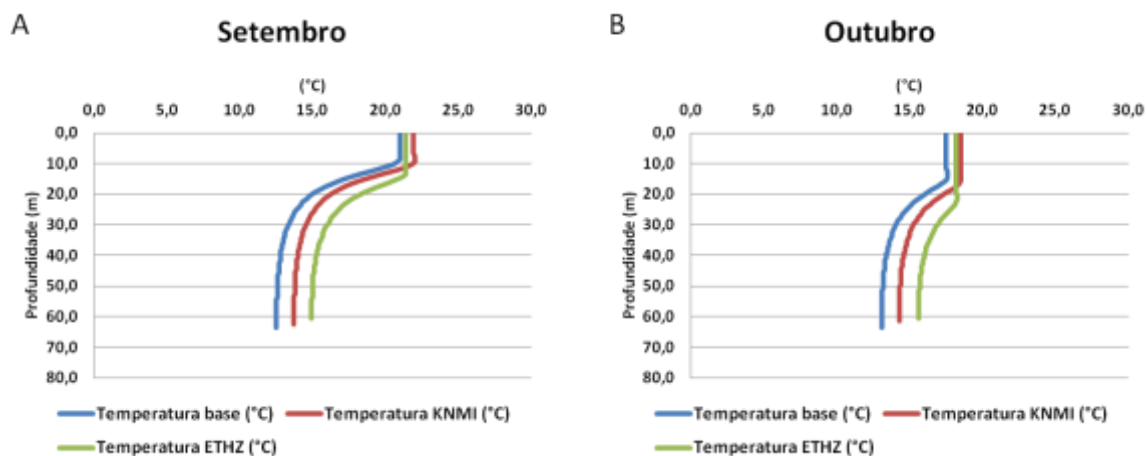


Figura 6.5: Perfis de Temperatura. A: Setembro; B: Outubro

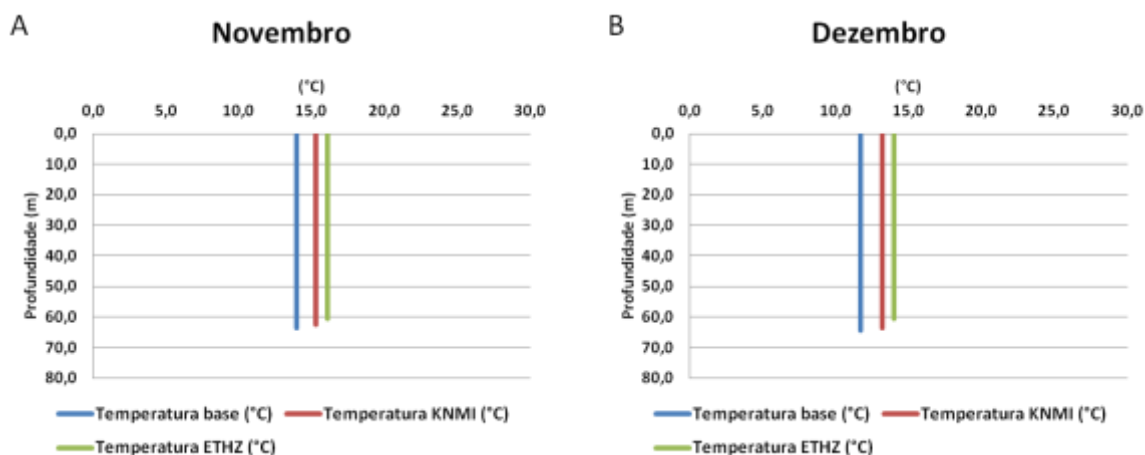


Figura 6.6: Perfis de Temperatura. **A:** Novembro; **B:** Dezembro

Nas figuras 6.1 a 6.6 (situação A) observa-se um comportamento de um lago monomíctico quente, nunca se tendo atingido um valor de temperatura da água inferior a 4°C, tanto à superfície como em profundidade. Verificam-se dois períodos diferentes de homogeneidade e de estratificação térmica ao longo da coluna da água, nos meses mais frios e mais quentes do ano, respetivamente.

Nos gráficos correspondentes aos meses de Janeiro (Figura 6.1A), Fevereiro (Figura 6.1B), bem como de Novembro (Figura 6.6A) e Dezembro (Figura 6.6B), os três perfis de temperatura apresentam-se praticamente verticais ao longo de toda a coluna de água, revelando a homogeneidade da massa de água. O perfil ETHZ é aquele que apresenta valores de temperatura mais elevados e, no mês de Fevereiro já evidencia uma ligeira tendência de estratificação térmica, o que não ocorre nos outros cenários estudados. Em Março (Figura 6.2A), todos os perfis começam a apresentar evidência de alguma estratificação térmica, sendo no perfil ETHZ que essa evidência é mais notória. Em Abril (Figura 6.2B), Maio (Figura 6.3A) e Junho (Figura 6.3B) todos os perfis apresentam estratificação térmica bem marcada, sendo que o gradiente mais acentuado continua a ser o correspondente ao cenário ETHZ e o menos acentuado é o inerente ao perfil base. Em Julho (Figura 6.4A) todos os perfis continuam a apresentar estratificação térmica mas, comparando com os meses anteriores, o perfil inerente ao cenário ETHZ revela uma maior aproximação dos valores de temperatura da água à superfície, aproximando-se dos resultados obtidos para os outros dois cenários. Para o mês de Agosto (Figura 6.4B) a temperatura à superfície começa a decrescer para os três perfis, embora ainda se observe uma estratificação térmica bem marcada. A partir de Setembro (Figura 6.5A) a estratificação térmica começa a atenuar-se e a temperatura a diminuir para os três perfis, conduzindo gradualmente a um novo período de homogeneização da massa da água, como pode ser observado nos meses de Novembro e de Dezembro (Figuras 6.6A e 6.6B).

Nos meses mais quentes do ano, em que a estratificação térmica está bem marcada, a temperatura à superfície apresenta valores entre 21°C e 23°C para o cenário base, entre 23°C e 25°C para o

cenário intermédio e entre 27°C e 28°C para o cenário majorante. Observa-se uma descida acentuada dos valores de temperatura, que corresponde à zona da termoclina e que se situa entre os 4 m e os 12 m de profundidade, no hipolímnio continua-se a verificar uma diminuição nos valores de temperatura, para os três cenários, mas num gradiente muito menos acentuado.

Os resultados obtidos correspondem aos expectáveis para os três cenários, uma vez que se verificou um aumento de temperatura do cenário base para o cenário intermédio e um aumento ainda maior do cenário base para o cenário majorante. Tendência de sentido inverso foi verificada relativamente aos caudais afluentes, traduzida por uma diminuição dos correspondentes valores do cenário base para o cenário intermédio e uma diminuição ainda mais significativa do cenário base para o cenário majorante.

6.1.2. Oxigénio Dissolvido

O oxigénio dissolvido é um parâmetro muito importante na caracterização da qualidade das massas de água, sendo até considerado como o parâmetro que “define” a qualidade do sistema aquático (Thomann e Mueller, 1987 in Coelho, 2009).

Quando a qualidade da água apresenta alguns problemas, esses podem, em muitos casos, ser descritos por alterações a nível da concentração de OD (Coelho, 2009). É por esta razão que, neste trabalho, o OD e a temperatura da água são os parâmetros descritores da qualidade da água considerados mais importantes, sendo particular detalhe à sua análise.

Os valores obtidos para a concentração de OD, em resultado das várias simulações efetuadas, são apresentados sob a forma de gráficos ao longo desta secção 6.1.2. (situação A). Os perfis verticais apresentados resultam dos três cenários de simulação considerados: cenário base (1989-2009); cenário intermédio (KNMI) (2021-2040); e o cenário majorante (ETHZ) (2081-2100); à semelhança do que foi analisado na secção 6.1.1. referente à temperatura. Através destes gráficos foi possível comparar os resultados da simulação dos diferentes cenários, bem como estabelecer a comparação entre os mesmos e analisar a sua evolução temporal.

Nas figuras 6.7 a 6.12 (situação A) são apresentados os gráficos correspondentes à simulação de OD para a albufeira de Santa Clara para os três cenários anteriormente descritos.

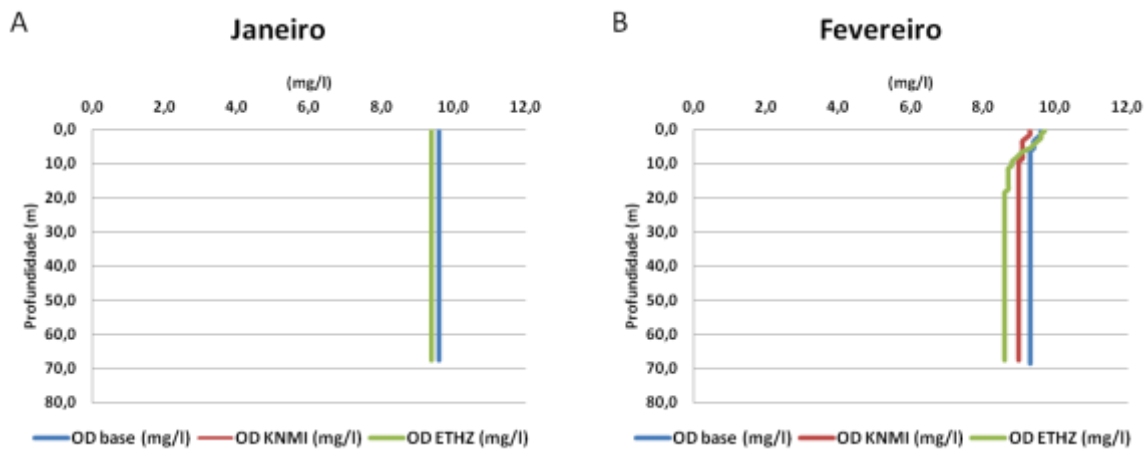


Figura 6.7: Perfis de OD. A: Janeiro; B: Fevereiro

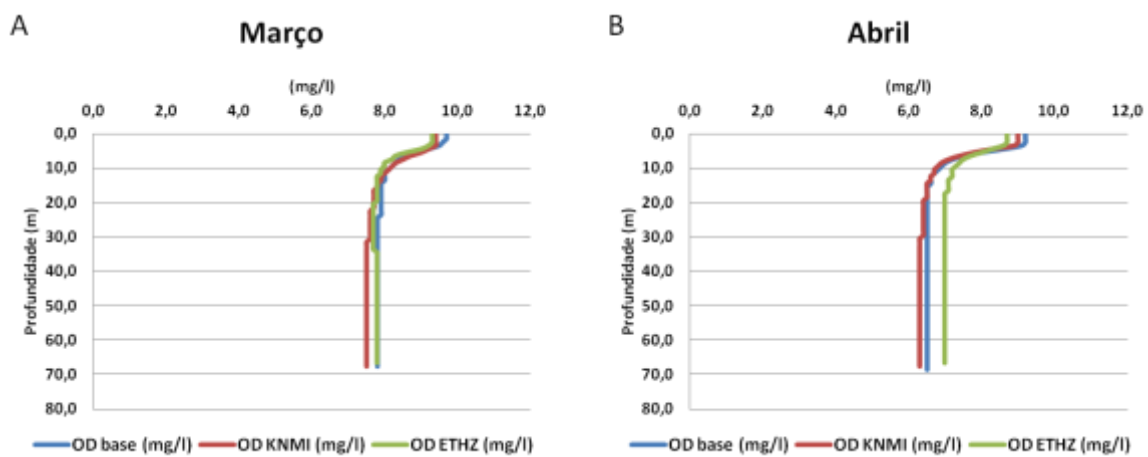


Figura 6.8: Perfis de OD. A: Março; B: Abril

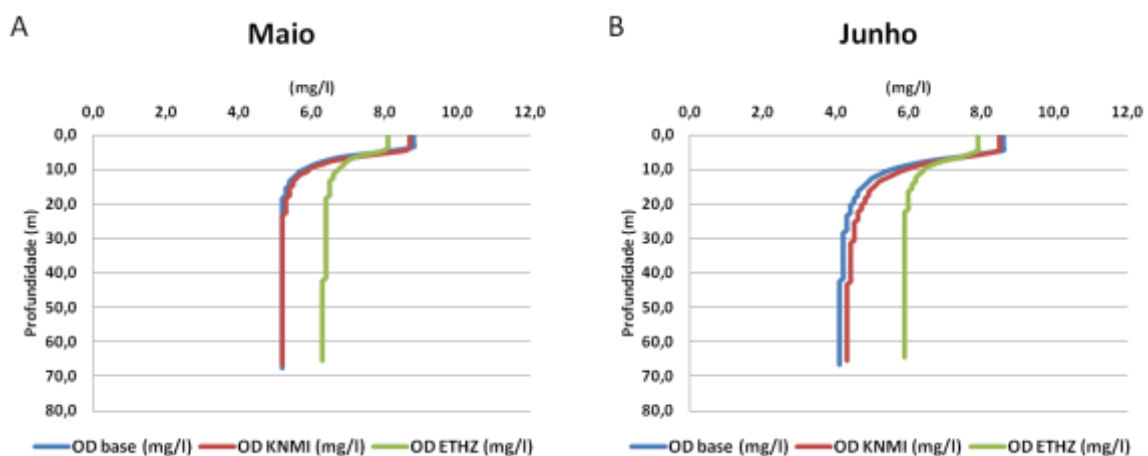


Figura 6.9: Perfis de OD. A: Maio; B: Junho

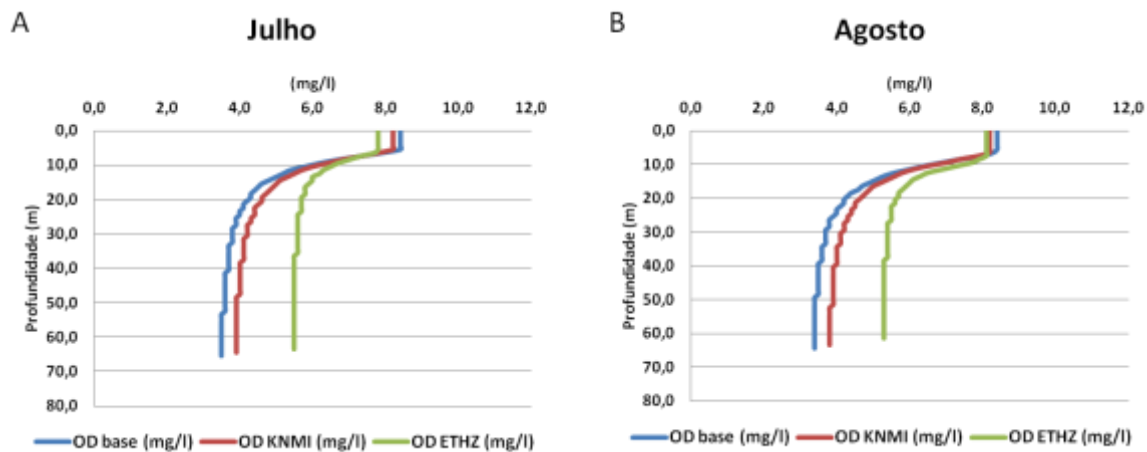


Figura 6.10: Perfis de OD. A: Julho; B: Agosto

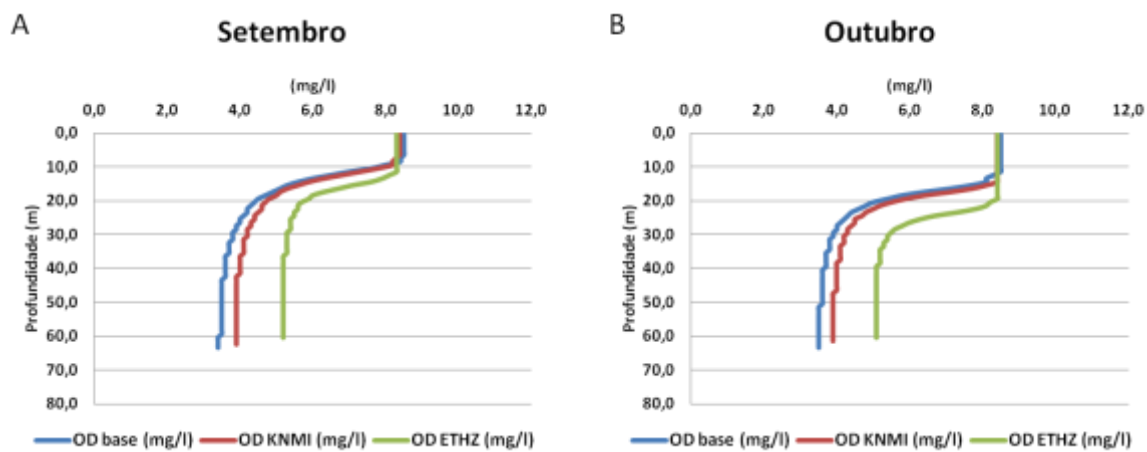


Figura 6.11: Perfis de OD. A: Setembro; B: Outubro

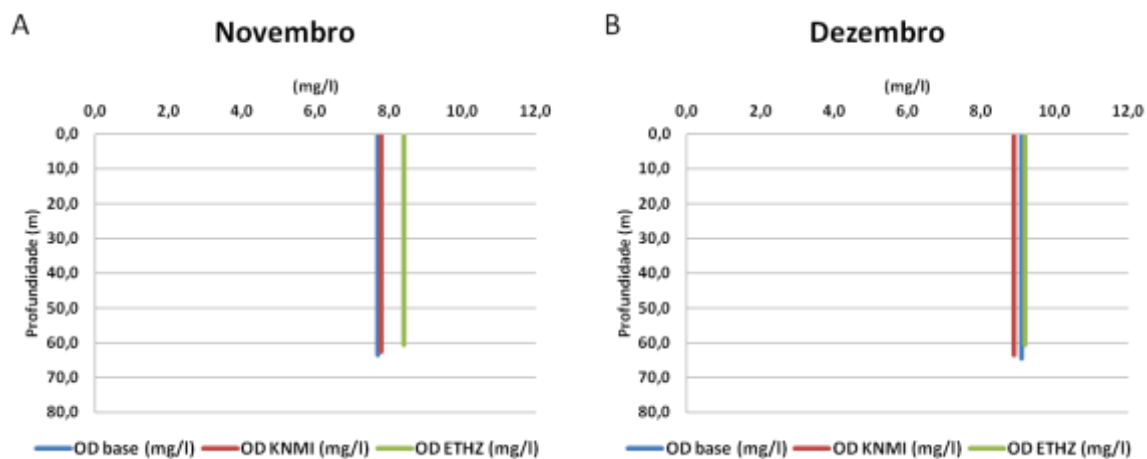


Figura 6.12: Perfis de OD. A: Novembro; B: Dezembro

Os perfis verticais apresentados nas figuras 6.7 a 6.12 (situação A) correspondem aos três cenários de simulação, sendo que cada um deles corresponde a um diferente período temporal.

Através da análise desses gráficos verifica-se que a evolução temporal dos perfis verticais de OD apresenta um padrão muito semelhante ao anteriormente obtido relativamente à temperatura da água.

Para o mês de Janeiro (Figura 6.7A) os perfis de oxigénio dissolvido, para os três cenários, apresentam valores uniformes ao longo da coluna de água. Os valores de OD do perfil ETHZ e do perfil KNMI são coincidentes neste mês, apresentando valores ligeiramente mais baixos do que o perfil correspondente ao cenário base. No mês de Fevereiro (Figura 6.7B) os valores de OD para os perfis base e KNMI apresentam uma pequena variação à superfície da coluna de água, revelando uma ligeira diminuição da concentração de OD, ao nível da termoclina, de cerca de 0,2mg/l, enquanto o perfil referente ao cenário ETHZ sofre uma diminuição mais acentuada da concentração de OD na termoclina, apresentando uma diminuição de 1,0mg/l. Para os meses Março (Figura 6.8A), Abril (Figura 6.8B), Maio (Figura 6.9A), Junho (Figura 6.9B), Julho (Figura 6.10A), Agosto (Figura 6.10B), Setembro (Figura 6.11A) e Outubro (Figura 6.11B) os perfis de OD apresentam uma diminuição acentuada da concentração de OD a partir da termoclina, continuando a diminuir até ao fundo, para todos os cenários, mas com um gradiente menos acentuado no cenário base, comparativamente aos outros dois cenários. O perfil ETHZ é o que apresenta menores valores da concentração de OD à superfície e, em profundidade, aquele em que, em cada mês, esses valores são mais elevados, apresentando assim uma diminuição menos acentuada do que nos outros perfis. A partir de Novembro (Figura 6.12A) os valores da concentração de OD mantêm-se constantes ao longo da coluna de água. Os valores mais elevados pertencem ao perfil inerente ao cenário ETHZ e os valores mais baixos ao perfil base. Dezembro (Figura 6.12B) apresenta também perfis constantes em profundidade, tal como no mês de Novembro, apresentando alterações no perfil KNMI, uma vez que passa a ser o perfil com valores mais baixos. No entanto, para qualquer destes dois meses, as diferenças encontradas entre os resultados inerentes aos três cenários simulados são pouco significativas.

Os valores obtidos correspondem, no geral, aos valores esperados, uma vez que o aumento da temperatura da água tem como consequência a diminuição da concentração de OD (Silow,2009), embora os valores apresentados para os meses de Março (Figura 6.8A), Abril (Figura 6.8B) e Dezembro (Figura 6.12B) apresentem valores de OD para o perfil KNMI inferiores aos valores do perfil base, nos dois primeiros meses a partir da termoclina e no último mês ao longo de toda a coluna de água. Os valores apresentados foram menos bem conseguidos do que os valores e temperatura apresentados na secção anterior. Esta situação poderá ser justificada pelo facto dos teores de OD, comparativamente aos valores da temperatura, dependerem de um número bastante superior de parâmetros e variáveis, determinando sempre maiores dificuldades no que se refere ao seu ajustamento (Coelho, 2009).

A alternância que se observa entre o período de homogeneização e o período de estratificação térmica, corresponde à alternância entre os meses mais frios e os meses mais quentes do ano. Nos meses mais frios a concentração de OD é homogénea e nos meses mais quentes os teores de OD apresentam diferenças significativas ao longo da coluna de água, em que, no hipólímnio, as concentrações de OD são bastante baixas, descrevendo assim o comportamento das massas de água, de acordo com o comportamento típico dos lagos monomícticos.

Para os meses mais quentes do ano, os valores da concentração de OD obtidos à superfície apresentam níveis relativamente elevados, o que poderá estar associado a uma maior concentração da biomassa algal, sendo mais difícil ao modelo WQRRS descrever este tipo de situações, em função da sua formulação específica (Coelho, 2009).

6.2. Situação B - Avaliação da Temperatura e do OD a partir do aumento da temperatura média anual

A presente secção tem como objetivo avaliar o comportamento dos parâmetros temperatura e OD, para os mesmos cenários apresentados na situação A do presente trabalho, alterando apenas os parâmetros meteorológicos (temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade do vento e nebulosidade) nos dados de entrada do modelo WQRRS para os três cenários. Esta simulação foi efectuada com o objetivo de se tentar avaliar os efeitos do expectável aumento da temperatura do ar, mantendo inalterados todos os outros parâmetros como os caudais de afluência e os correspondentes parâmetros de qualidade.

6.2.1. Temperatura

As figuras 6.13 a 6.18 (situação B) representam graficamente os perfis verticais de temperatura, tal como os perfis apresentados na secção 6.1.1. (situação A). Em cada gráfico estão representados três cenários, o cenário base para o período 1989-2008, o cenário intermédio (KNMI) para o período 2021-2040 e o cenário majorante (ETHZ) para o período 2081-2100.

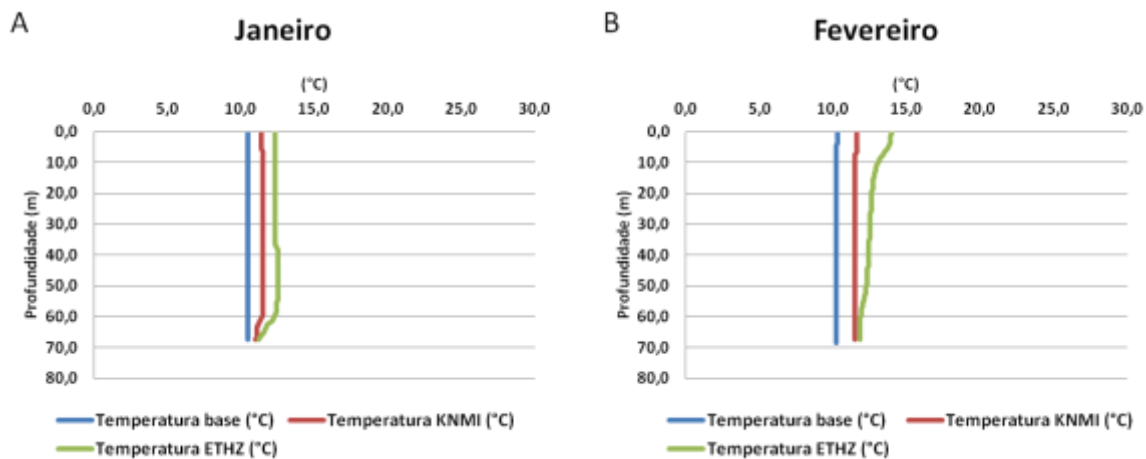


Figura 6.13: Perfis de Temperatura. **A:** Janeiro; **B:** Fevereiro

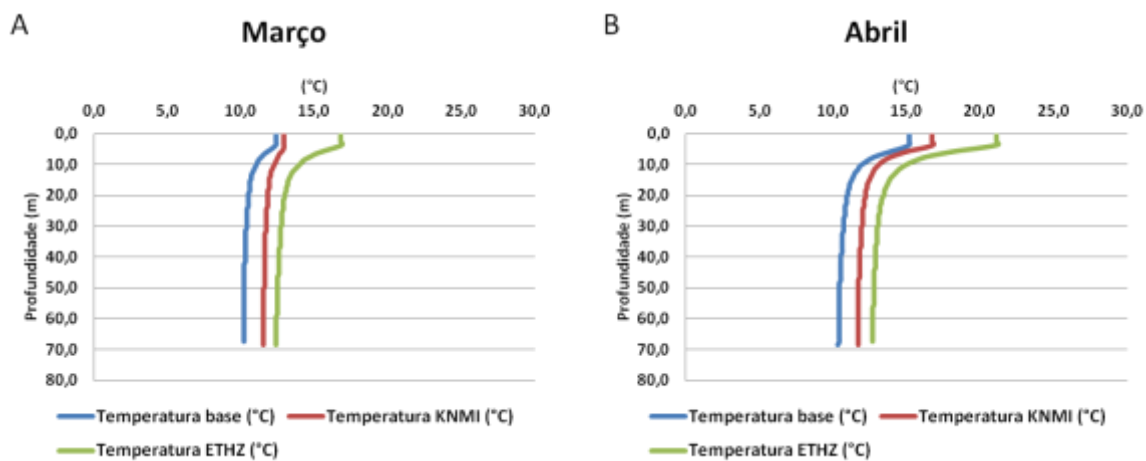


Figura 6.14: Perfis de Temperatura. **A:** Março; **B:** Abril

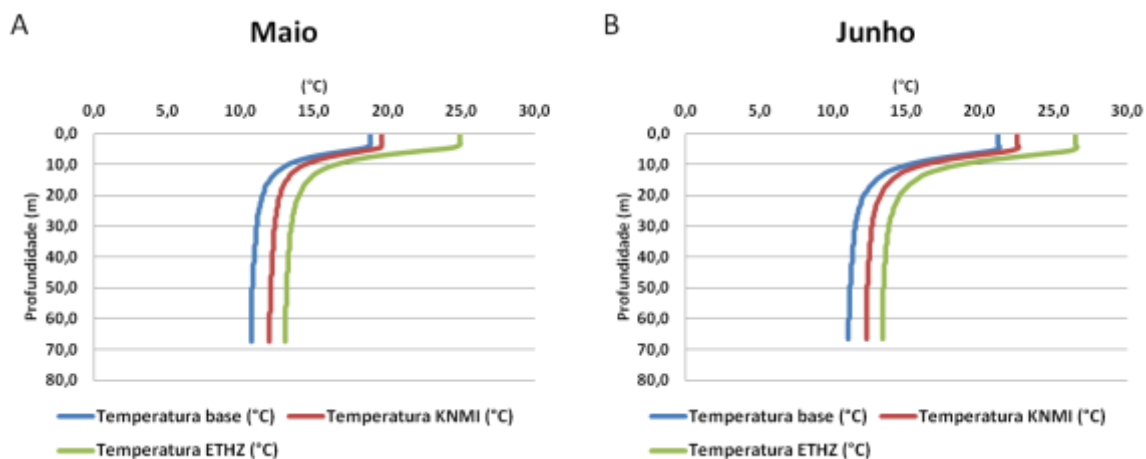


Figura 6.15: Perfis de Temperatura. **A:** Maio; **B:** Junho

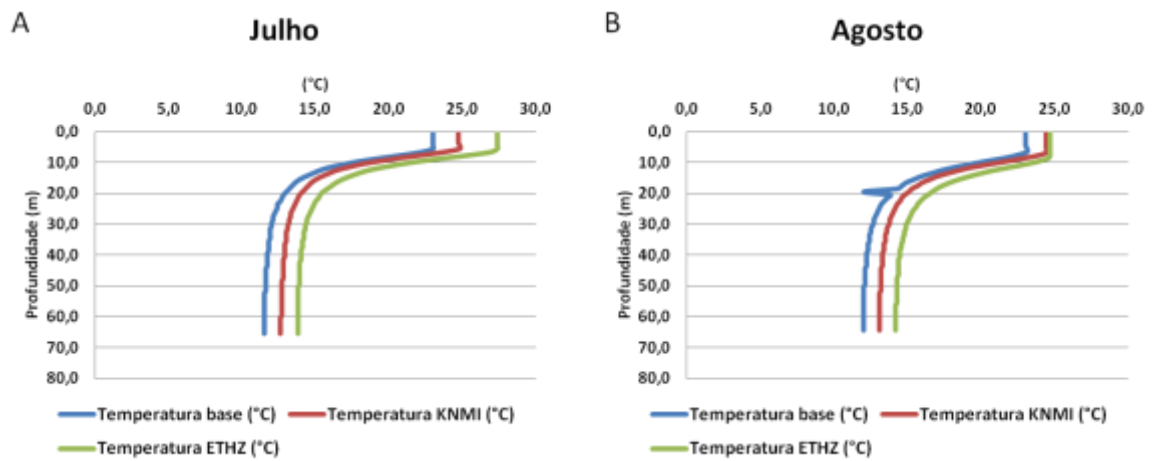


Figura 6.16: Perfis de Temperatura. A: Julho; B: Agosto

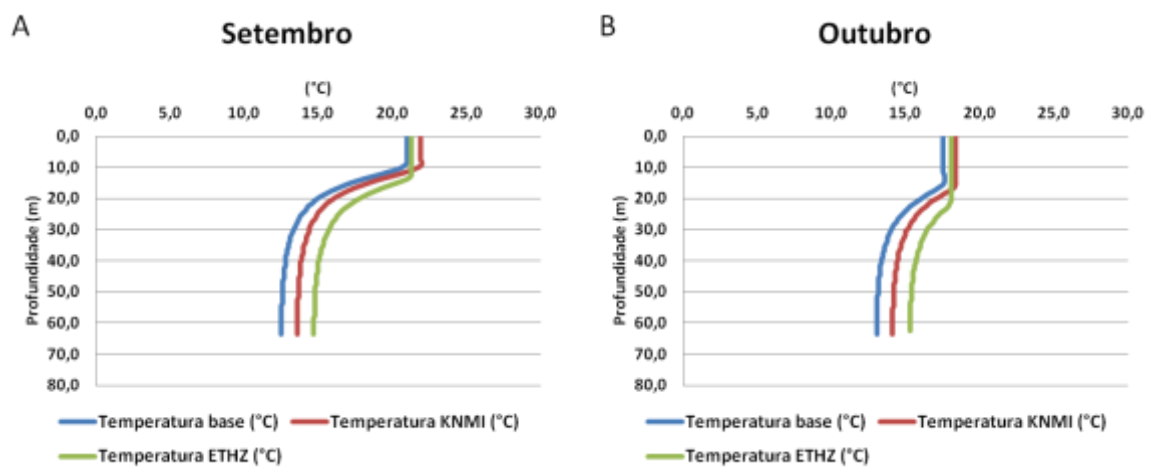


Figura 6.17: Perfis de Temperatura. A: Setembro; B: Outubro

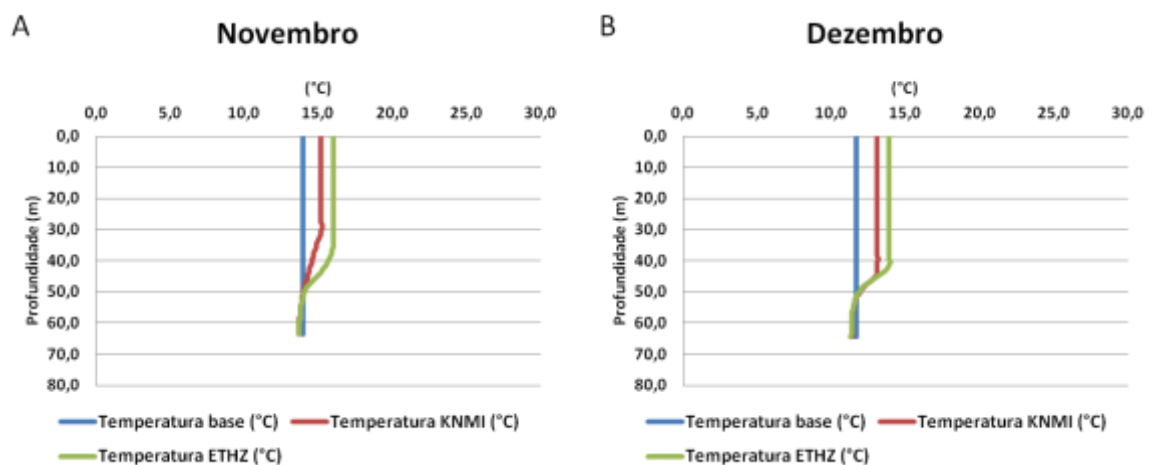


Figura 6.18: Perfis de Temperatura. A: Novembro; B: Dezembro

Por análise das figuras 6.13 a 6.18 (situação B), pode-se observar que para o mês de Janeiro (Figura 6.13A) o perfil de temperatura do cenário base apresenta valores constantes ao longo da coluna de água, enquanto os perfis inerentes aos cenários KNMI e ETHZ apresentam valores constantes até

aos 60 m de profundidade, apresentando a partir daí uma muito ligeira diminuição da temperatura. Para o mês de Fevereiro (Figura 6.13B) os valores de temperatura para perfil base e para o perfil inerente ao cenário KNMI são constantes ao longo da coluna de água, enquanto que o perfil ETHZ começa a apresentar ligeiros sinais de estratificação e da ocorrência de uma termoclina. Os meses de Março (Figura 6.14A), Abril (Figura 6.14B), Maio (Figura 6.15A), Junho (Figura 6.15B) e Julho (Figura 6.16A) apresentam estratificação térmica para os perfis dos três cenários. No mês de Agosto (Figura 6.16B) a temperatura à superfície do perfil inerente ao cenário ETHZ começa a diminuir, e continua a observar-se estratificação térmica em todos os perfis. Em Setembro (Figura 6.17A) e Outubro (Figura 6.17B) a temperatura à superfície começa a diminuir para os três perfis, observando-se uma diminuição mais acentuada no perfil ETHZ. A estratificação térmica começa a desvanecer-se. Em Novembro (Figura 6.18A) os perfis apresentam valores constantes ao longo da coluna de água, embora os inerentes aos cenários KNMI e ETHZ ainda apresentem uma diminuição dos valores de temperatura a partir dos 30 m de profundidade. Em Dezembro (Figura 6.18B) observa-se uma situação análoga à verificada no mês de Novembro (Figura 6.18A), com a pequena diferença que os valores de temperatura inerentes aos perfis KNMI e ETHZ comecem a diminuir a partir dos 40 m de profundidade e de forma menos acentuada.

Os valores obtidos neste estudo encontram-se de acordo com os resultados expectáveis. Uma vez que as condições meteorológicas no ficheiro de entrada diferiram de cenário para cenário, é possível observar que as alterações ocorrem de forma mais acentuada no cenário majorante, sendo menos marcadas no cenário intermédio e ainda menos no cenário base. Estas diferenças refletem as decorrentes das condições meteorológicas associadas a cada cenário de simulação.

6.2.2. Oxigénio Dissolvido

Os gráficos das figuras 6.19 a 6.24 (situação B) representam os perfis verticais da concentração de OD. Em cada gráfico estão representados três cenários, o cenário base para o período 1989-2008, o cenário intermédio (KNMI) para o período 2021-2040 e o cenário majorante (ETHZ) para o período 2081-2100, tal como anteriormente apresentado relativamente à temperatura da água.

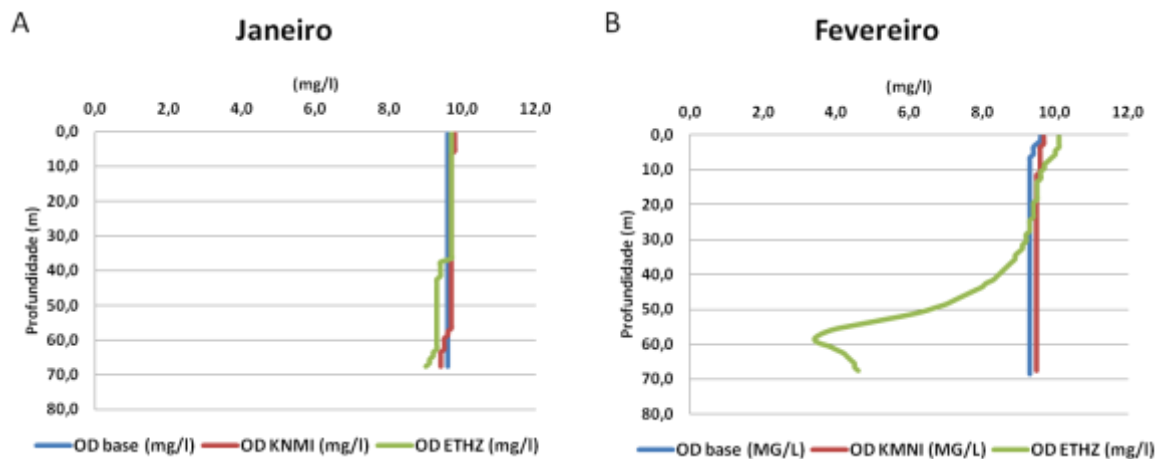


Figura 6.19: Perfis de OD. **A:** Janeiro; **B:** Fevereiro

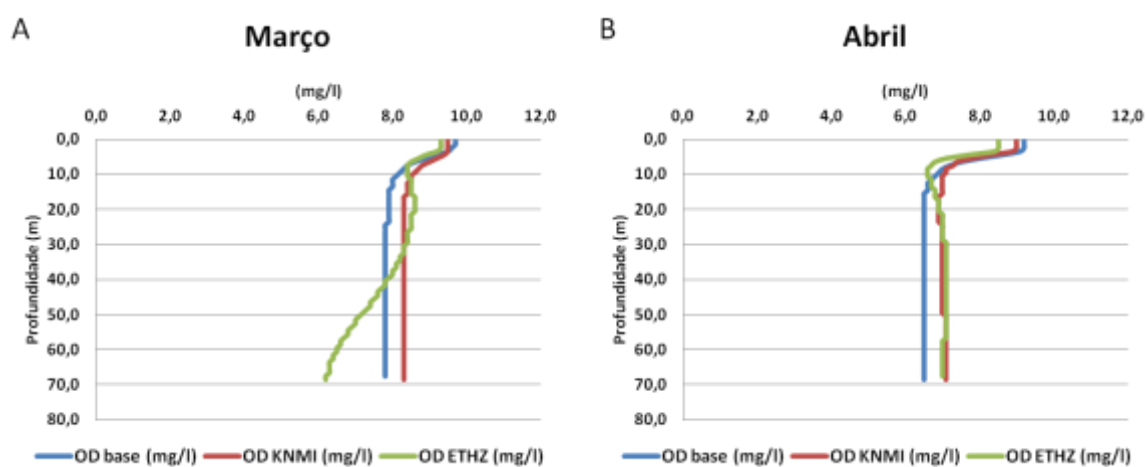


Figura 6.20: Perfis de OD. **A:** Março; **B:** Abril

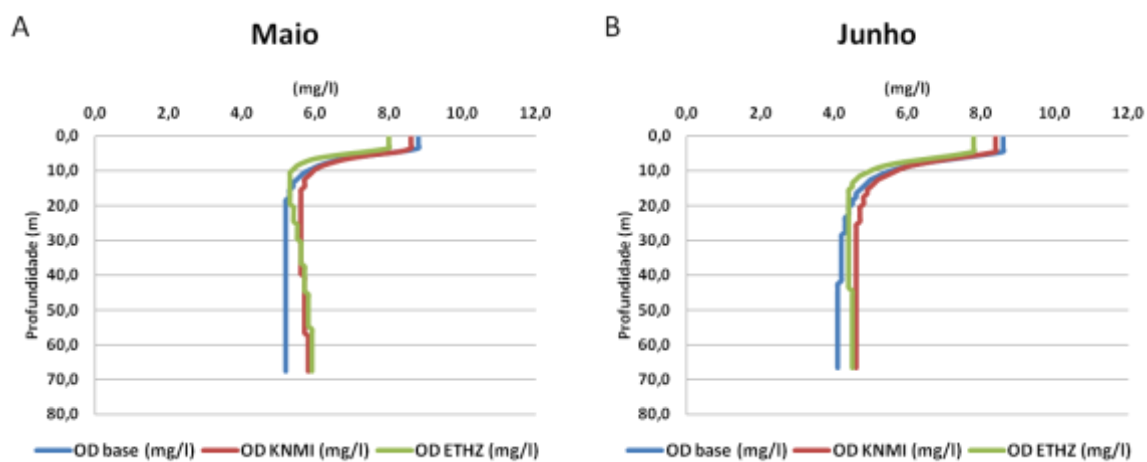


Figura 6.21: Perfis de OD. **A:** Maio; **B:** Junho

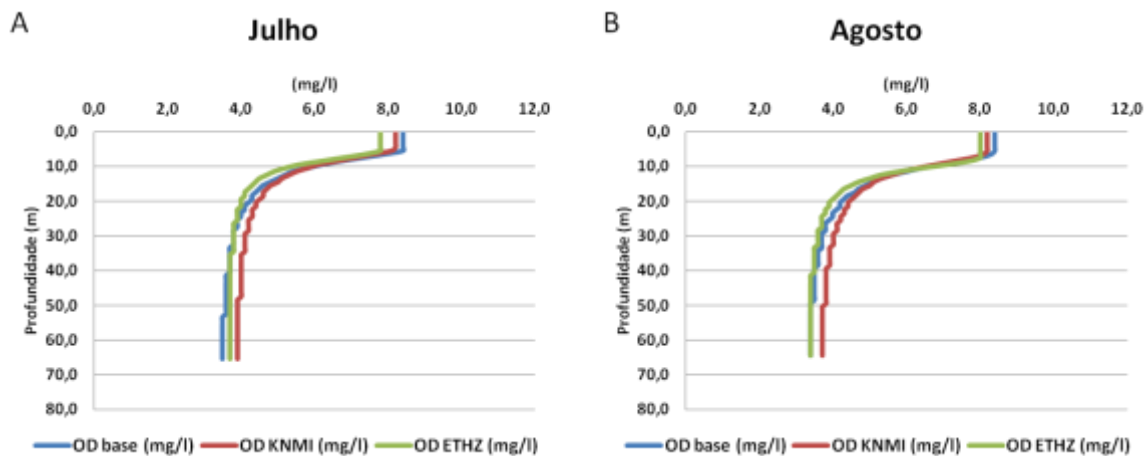


Figura 6.22: Perfis de OD. A: Julho; B: Agosto

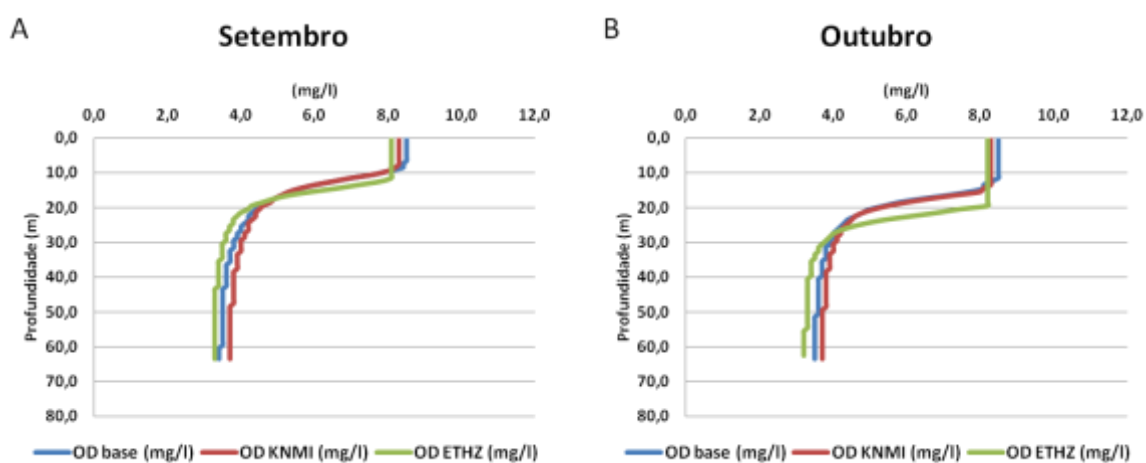


Figura 6.23: Perfis de OD. A: Setembro; B: Outubro

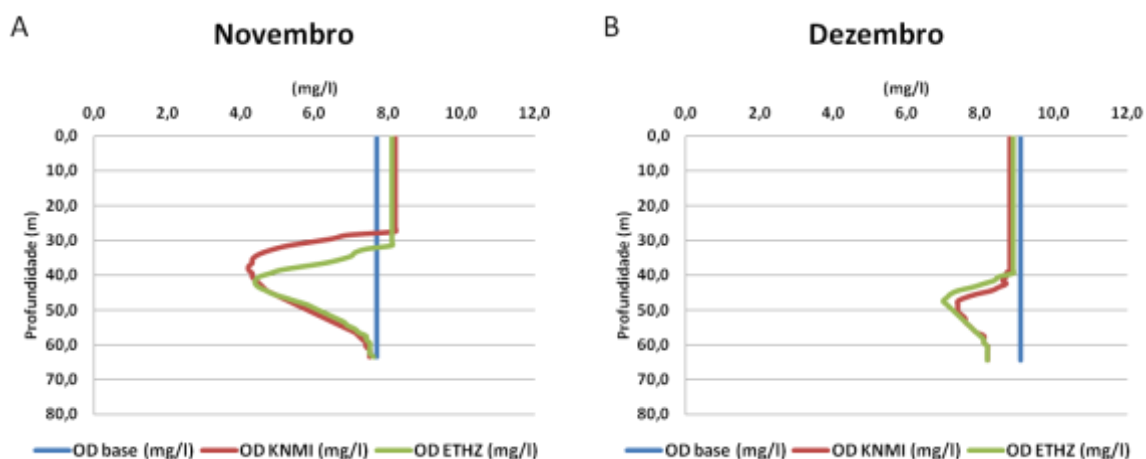


Figura 6.24: Perfis de OD. A: Novembro; B: Dezembro

As figuras 6.19 a 6.24 (situação B) permitem verificar que para os valores da concentração de OD no mês de Janeiro (Figura 6.19A) o perfil do cenário base apresenta valores constantes ao longo da coluna de água, e que os valores de OD para os outros dois perfis, KNMI e ETHZ, apresentam uma diminuição pouco acentuada ao longo da mesma. Para o mês de Fevereiro (Figura 6.19B) os perfis

base e KNMI mantêm-se constantes ao longo da coluna de água, e o perfil ETHZ continua a apresentar uma diminuição dos valores com o aumento da profundidade, sendo essa diminuição bastante mais acentuada, comparativamente ao mês de Janeiro. Para os meses de Março (Figura 6.20A), Abril (Figura 6.20B), Maio (Figura 6.21A), Junho (Figura 6.21B), Julho (Figura 6.22A), Agosto (Figura 6.22B), Setembro (Figura 6.23A) e Outubro (Figura 6.23B) os perfis de OD apresentam valores semelhantes para a superfície da água ao longo dos meses, sendo o perfil do cenário ETHZ o que apresenta menores valores da concentração de OD. Relativamente aos três cenários, todos eles seguem o comportamento típico de um período de estratificação térmica, diminuindo a concentração de OD acentuadamente até à termoclina, e mantendo-se relativamente constante a partir daí. Na camada do hipolímnio, os valores de OD são mais baixos, nos três cenários, nos meses de Junho a Outubro (cerca de 4 mg/l), sendo o perfil ETHZ a apresentar os valores mais baixos. Para Novembro (Figura 6.24A) e Dezembro (Figura 6.24B), os valores do perfil base são constantes ao longo da coluna de água, enquanto os outros dois perfis apresentam uma diminuição a meio da coluna de água voltando depois a aumentar.

Tal como nos resultados inerentes aos perfis de OD, descritos na secção 6.1.2., inerentes à situação A, os valores relativos aos perfis da concentração de OD (situação B) apresentam um padrão de evolução semelhante ao identificado para os valores de temperatura da água, e encontram-se de acordo com o que seria expectável. De facto, verifica-se que o comportamento nos diferentes cenários vai-se extremando com a consideração dos cenários inerentes às projeções climáticas futuras. Contudo, verifica-se que as diferenças entre os três cenários são menos acentuadas durante os meses mais frios (Janeiro, Novembro e Dezembro), ao longo da coluna de água, comparativamente ao observado nos restantes meses. Esta situação deve-se ao facto de, nos meses mais quentes, a albufeira apresentar uma estratificação térmica estável e bem marcada. Nesses meses o cenário que apresenta menores valores de OD à superfície é o ETHZ, o que poderá ser explicado pelo facto das temperaturas, quer do ar quer da água à superfície, serem mais elevadas.

6.3. Discussão dos Resultados

Por observação das figuras apresentadas na situação A (Figuras 6.1 a 6.6) e na situação B (Figuras 6.13 a 6.18), relativas à temperatura, pode-se concluir que os perfis verticais são bastante idênticos, independentemente do cenário considerado, apresentando valores de temperatura semelhantes à superfície. Nos meses mais frios Janeiro, Novembro e Dezembro notam-se algumas diferenças nos valores de temperatura no hipolímnio nos perfis inerentes aos cenários ETHZ e KNMI. Nos gráficos da situação A os três cenários apresentam homogeneidade ao longo da coluna de água, enquanto que nos gráficos da situação B, nas camadas mais profundas, ocorre uma acentuada diminuição de temperatura.

No que diz respeito à concentração de OD, para os gráficos da situação A (Figuras 6.7 a 6.12) e para os gráficos da situação B (Figura 6.19 a 6.24), ao contrário da temperatura, já se notam algumas discrepâncias para os mesmos meses, relativamente a cada cenário.

Para o mês de Janeiro os valores do perfil base são iguais nas duas situações (Figura 6.7A e Figura 6.19A); o perfil KNMI apresenta valores de OD inferiores no gráfico da situação A em relação ao gráfico da situação B, à superfície e, no hipolímnio, os valores são idênticos. Para o perfil ETHZ os valores à superfície também são mais baixos no gráfico da situação A do que no gráfico da situação B, verificando-se o oposto no hipolímnio.

Para o mês de Fevereiro, o gráfico inerente à situação A (Figura 6.7B) apresenta uma pequena estratificação no perfil base, enquanto que no gráfico da situação B (Figura 6.19B) os valores são homogêneos ao longo da coluna de água, o mesmo acontecendo no perfil KNMI. Para o perfil ETHZ, o gráfico da situação A apresenta valores de OD à superfície menores, e uma estratificação entre os 10 m e os 20 m de profundidade, mantendo-se constante a partir daí. No gráfico da situação B os valores de ETHZ são mais elevados à superfície, mantendo-se constantes até aos 30 m de profundidade, diminuindo depois acentuadamente até ao fundo.

Na situação A (Figura 6.8A) e na situação B (Figura 6.20A), para o mês de Março, os perfis são idênticos nos dois gráficos para os cenários base e KNMI; apenas o cenário ETHZ apresenta algumas alterações. A concentração de OD é superior no hipolímnio do gráfico situação A comparativamente ao gráfico da situação B.

Nos meses de Abril, Maio Junho, Julho, Agosto, Setembro e Outubro, os valores são muito idênticos nas duas situações (A e B) para os três cenários, não se verificando alterações muito acentuadas. Apenas no perfil ETHZ se pode observar que a diminuição de OD na termoclina é menos acentuada (situação A) e que os valores até ao hipolímnio apresentam valores mais elevados do que nos gráficos relativos à situação B para os mesmos meses.

Para os meses de Novembro e Dezembro, os valores de OD do perfil base são idênticos nos dois gráficos (Figura 6.12 e Figura 6.24). Os perfis inerentes aos cenários KNMI e ETHZ apresentam valores iguais de OD à superfície nos dois gráficos, embora nos gráficos da situação B os valores diminuam acentuadamente a partir dos 30 m a 40 m de profundidade.

No que diz respeito aos perfis de temperatura esta similaridade entre os gráficos pode ser justificada pela grande influência da temperatura do ar na temperatura da água, uma vez que alterando ou não os dados de entrada inerentes às afluências os valores de temperatura da massa de água, obtidos através do modelo, são idênticos.

O mesmo já não se verifica para o OD. Embora os valores de concentração de OD à superfície sejam idênticos, de cenário para cenário, os valores ao longo da coluna de água são diferentes, apresentando maior diminuição das concentrações de OD nos gráficos em que apenas se modificam as condições meteorológicas (situação B), principalmente no cenário ETHZ. Estes podem ser justificados pelo facto dos caudais das afluições serem maiores e com os mesmos valores da concentração de poluentes, havendo assim um consumo mais acentuado de OD, em função da maior carga afluyente, principalmente no perfil inerente ao cenário ETHZ, em que as afluições aumentam quase para o dobro, dos perfis de OD da situação A para aos perfis de OD da situação B (em que apenas se modificaram as condições meteorológicas).

7. Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuro

Quanto melhor se conhecer o sistema a estudar melhor será a gestão integrada desse sistema. No que se refere às albufeiras, a aplicação de modelos matemáticos de simulação da qualidade da água permitirá apoiar os processos de tomada de decisão, inerentes às fases de planeamento, conceção e exploração das barragens, com reflexos positivos sobre a qualidade dessas massas de água.

Os resultados obtidos através modelo de simulação matemática da qualidade da água aplicado à albufeira de Santa Clara permitiram descrever de forma satisfatória o comportamento dessa massa de água, ao longo dos diferentes períodos de simulação considerados, nomeadamente no que se refere à temperatura e ao oxigénio dissolvido, que correspondem aos dois parâmetros que se assumiram como sendo aqueles que seriam analisados.

A utilização do modelo WQRRS foi de fácil entendimento e requer um conjunto de dados pouco extensos. Assim, os resultados obtidos pelo modelo foram os esperados para os três diferentes cenários submetidos a simulação. No entanto, seria importante desenvolver uma análise de sensibilidade a todas as variáveis de entrada e parâmetros reguladores da modelação, com um modelo bidimensional de forma a se obterem resultados mais próximos dos reais e com uma melhor discretização espacial dos resultados.

Os resultados para o regime térmico da massa de água, obtidos com os valores simulados pelo modelo ETHZ para o período 2081-2100, em comparação com os resultados do cenário base são mais elevados. Este facto verifica-se pelo aumento da temperatura média do ar, pela diminuição da precipitação, na maior parte dos meses para menos de 50%, e pela diminuição dos caudais afluentes que também diminuíram para cerca de metade. Ao nível das concentrações de OD, os resultados obtidos com os valores do modelo ETHZ, em comparação com os valores do cenário base, nos meses mais frios, são iguais ou ligeiramente superiores aos valores do cenário base e, nos meses mais quentes, a concentração de OD é menor à superfície e maior a partir da termoclina em relação ao cenário base. Para uma melhor avaliação dos efeitos dos impactos das alterações climáticas nos dois parâmetros da qualidade da água estudados em detalhe, temperatura e OD, poderiam ser realizados três cenários diferentes para o mesmo período temporal, isto é, realizar o mesmo para o período 2081-2100 que foi feito com o modelo ETHZ, também com o modelo KNMI e o modelo SMHI e analisar as diferenças e similaridades.

Para o cenário intermédio, observou-se o mesmo que com o cenário majorante, mas de forma menos acentuada. Os resultados de temperatura obtidos com os valores simulados pelo modelo KNMI para o período 2021-2040, em comparação com os resultados do cenário base, são mais elevados. Este facto é verificado pelo aumento da temperatura do ar de um cenário para o outro,

pela diminuição da precipitação e pela diminuição dos caudais afluentes. Ao nível da concentração de OD, os resultados obtidos com os valores simulados pelo modelo KNMI, em comparação com os valores do cenário base, verifica-se que os meses frios apresentam valores iguais ou ligeiramente inferiores aos valores do cenário base e, nos meses mais quentes, a concentração de OD é menor à superfície e maior a partir da termoclina, comparativamente ao cenário base. Para uma melhor análise, sugere-se que se realize o mesmo que foi sugerido para o período 2081-2100, no período intermédio, 2021-2040, isto é, realizar o que foi feito com o modelo KNMI, também com o modelo ETHZ e com o modelo SMHI de forma a analisar as diferenças e similaridades.

A albufeira de Santa Clara é muito utilizada como zona de recreio, especialmente no verão, e como analisado na secção 4.1 serve de origem para abastecimento doméstico, industrial e agrícola. Outros fatores interessantes de analisar seriam os efeitos das alterações climáticas ao nível da contaminação microbiológica, avaliando, por exemplo, o parâmetro da qualidade da água coliformes fecais. Seria, interessante analisar se essas alterações colocam em risco a utilização da albufeira por parte dos turistas e por parte dos pescadores, assim como quais os tratamentos necessários para assegurar a qualidade da água para abastecimento doméstico.

Esta dissertação poderá servir ainda como exemplo da metodologia a seguir para se estudarem outras albufeiras de maiores dimensões, como é o caso da albufeira de Castelo de Bode e da albufeira do Alqueva.

A história mostra que a constante divulgação da informação cumpre um papel essencial na preparação, estruturação e aplicação das ações de gestão dos recursos. As opções de desenvolvimento futuro e as diferentes formas de atuação são responsáveis, a médio e a longo prazo, pelas alterações da qualidade da água. Assim, é fundamental que haja um suporte científico que permita avaliar o que ocorreu no passado, de forma a prever as consequências que as decisões tomadas no presente possam vir a ter no futuro e que permita prevenir e solucionar possíveis irregularidades no caminho para a excelência da qualidade da água, bem como definir as necessárias medidas de adaptação a diferentes situações.

8. Referências

Bola, J. P. (2009) - Avaliação do estado trófico da Pateira de Fermentelos. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal;

Cao, C.; Zheng, B.; Huang, M.; Zhang, J. (2011) - Eutrophication and algal blooms in channel type reservoirs: A novel enclosure experiment by changing light intensity, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 23, pp. 1660-1670, China;

Camargo, J.A.; Alonso, A.; Puente, M. (2005) - Eutrophication downstream from small reservoirs in mountain rivers of Central Spain, *Water Research* 39, pp. 3376-3384, Madrid, Spain;

Coelho, P. S. (2009) – Modelação Matemática da Qualidade da Água em Sistemas Albufeira-Rio. Dissertação de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Lisboa, Portugal;

Coelho, P. S.; Rodrigues, A. C.; Diogo, P. A. (1999) - Modelação da Qualidade da Água no Empreendimento de Fins Múltiplos da Aguieira-Raiva. *Recursos Hídricos*, Vol.20, N.º 1, pp. 83-91, APRH, Lisboa, Portugal;

Diogo, P. A.; Coelho, P. S.; Almeida, M.; Serrazina, N.; Rodrigues, A. C. (2003) – Simulação da Qualidade da Água Durante o Enchimento da Albufeira de Alqueva. 6.º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Cidade da Praia, Cabo Verde;

Diogo, P. A.; Coelho, P. S.; Almeida, M.; Mateus, N.S.; Rodrigues, A. C. (2004a) – Influência do Fósforo de Origem Agrícola na Classificação do Estado Trófico das Principais Albufeiras de Portugal Continental. 7.º Congresso Nacional da Água, APRH, Lisboa, Portugal;

Diogo, P. A.; Coelho, P. S.; Almeida, M.; Mateus, N.S.; Rodrigues, A. C. (2004b) – Simulação da Qualidade da Água nas Albufeiras do Rio Douro com um Modelo de Albufeiras em Série. 7.º Congresso da água, APRH, Lisboa, Portugal;

Diogo, P. A.; Coelho, P. S.; Almeida, M.; Mateus, N.S. (2004c) – Simulação da Qualidade da Água na Albufeira de Alqueva: A Fase de Enchimento e a Importância do Contra - Embalse de Pedrogão. 8.º Congresso Nacional da Água, APRH, Lisboa, Portugal;

Diogo, P. A.; Gil, M. L.; Coelho, P. S.; Rodrigues, A. C.; Almeida, M. (2008) – Avaliação do Estado Trófico de Albufeiras Exploradas pela EDP. 9.º Congresso Nacional da água, Lisboa, Portugal;

Duarte, A. A. L. S.; Pinho, J. L. S.; Vieira, J. P.; Boaventura, R. A.. (2000) - Estudo das características Dispersivas numa Albufeira do Rio Douro Internacional. IX SILUBESA, Baía, Brasil;

ENSEMBLES (2009) - Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales, Summary of research and results from the ENSEMBLES project, United Kingdom;

Fontes, C. L. (2010) - Modelling of Water Quality in the Alqueva Reservoir, Portugal. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, Portugal;

HEC (1978) – Water Quality for River-Reservoir Systems. Computer Program Description, Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers, Davis California, USA;

INAG (2006) – Plano de Ordenamento da Albufeira de Santa Clara, Projeto do Plano de Ordenamento da Albufeira de Santa Clara, Vol. 1, Portugal;

INAG, I.P. (2011) - Modelação Matemática da Qualidade da Água em Albufeiras com Planos de Ordenamento – IV – Albufeira de Santa Clara. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território. Instituto da Água, I.P.;

IPCC (2000) - Special Report on Emissions Scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group III [Nakicenovic, N., Swart, R. (eds.)]. IPCC, 2000, Genebra, ISBN 92-9169-113-5;

IPCC (2007) - Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pachauri, R.K e Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Genebra;

Laborde, S.; Imberger, J.; Toussaint, S. (2012) - Contributions of local knowledge to the physical limnology of Lake Como, Italy; Center for Water Research; Anthropology and Sociology, University of Western Australia, Crawley, Australia;

Laurence, C. Smith – O Novo Norte – O Mundo em 2050. Alfragide: Livros d'Hoje, 2011. ISBN: 9789722047937;

Moldan, B.; Janouskova, S.; Hak, T. (2012) - How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets, Ecological Indicators 17, pp. 4-13, Charles University Environment Center, Czech Republic;

Oliveira, R.; Lima, M. M.; Vieira, J. M. (2006) – Desenvolvimento de um Sistema de Indicadores de Qualidade de Águas Superficiais numa Bacia Hidrográfica. 8º Congresso da água, APRH, Figueira da Foz, Portugal;

Patricio, M. S. (2008) – A Qualidade da Água da Albufeira do Alvito e o Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA). Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Lisboa, Portugal;

Região Hidrográfica 6 (2011) – Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas Integradas nas Regiões Hidrográficas 6 e 7, Relatório Técnico para Efeitos de Participação Pública, ARH;

Reis, C. A. (2010) - Caracterização das fontes de poluição na orla costeira do Concelho de Matosinhos e respectivo impacte sobre a qualidade das águas balneares. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal;

Ribeiro, O.; Lautensach, H.; Daveau, S.; - Geografia de Portugal: O ritmo climático e a paisagem Volume 2 de Geografia de Portugal pp. 452-457. Edições J. Sá da Costa, 1991. Universidade de Indiana;

Santos, F. D.; Forbes, K.; Moita, R. (editores) (2001). Mudança Climática em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – SIAM. Sumário Executivo e Conclusões. Lisboa: Gradiva;

Santos, F. D.; Miranda, P. (editores) (2006). Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II. Lisboa: Gradiva;

Schmidt, A.; Ivanova, A; Schafer, M. S. (2013) - Media attention for climate change around the world: A comparative analysis of newspaper coverage in 27 countries, Global Environmental Change, Germany;

Silow, E. (2009) – Lake Baikal as Possible Sentinel of the Climate Change, Scientific research Institute of Biology, Irkutsk State University, Russia;

Silva, M. C.; Barbosa, A. E.; Rocha, J. S.; Fortunato, A. B. (2002) – State-of-the-Art for Surface Water Quality Modelling. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal (LNEC);

Smith, J. B. (1997) - Setting priorities for adapting to Climate Change, Global environmental Change, Vol. 7, No. 3, pp. 251-264, Great Britain;

Sousa, A. C. (2009) - Análise Prospectiva sobre os Impactos das Alterações Climáticas na Qualidade e na Disponibilidade de Água para Consumo Humano. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, Portugal;

Soares, P. M.; Cardoso, R. M.; Miranda P.M.; Medeiros, J.; Belo-Pereira, M.; Espirito-Santo, F.; (2012a) - WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal. *Climate Dynamics*, Vol. 39, pp 2497-2522, Portugal;

Soares, P. M.; Cardoso, R. M.; Miranda, P.M. ; Viterbo, P.; Belo-Pereira, M. (2012b) - Assessment of the ENSEMBLES regional climate models in the representation of precipitation variability and extremes over Portugal. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, Portugal;

Thomann, R. V.; Mueller, J. A. (1987) - *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper & Row Publishers, New York, USA;

Vivas, E.; Maia, R. (2010) – A Gestão da Escassez e Secas no Enquadrando as Alterações Climáticas, *Recursos Hídricos*, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Vol. 31, pp. 25-37, Porto, Portugal.