

recursos hídricos

impactos, vulnerabilidades e adaptação
às alterações climáticas



RECURSOS HÍDRICOS

impactos e vulnerabilidades
às alterações climáticas

AUTORES

Susana Prada, Joana André Reis, Vítor Barreto,
Rosário Carvalho, Paulo Freitas

2015

Sumário

No âmbito do projeto CLIMA-Madeira o estudo, associado ao setor recursos hídricos, incidiu na disponibilidade e qualidade da água subterrânea.

O impacto potencial analisado relativo à qualidade foi a salinização dos aquíferos. Através de testes estatísticos e pela diferença entre a cota da interface salina e da base do furo, considerando também o agravamento provocado pela elevação do nível médio do mar, avaliou-se a vulnerabilidade atual e futura de 21 furos. A vulnerabilidade resultante deste impacto situou-se essencialmente entre a muito negativa e a crítica, sendo que o grau de confiança associado para o período atual e futuro foi muito alto e baixo respetivamente. Ainda que haja uma influência das alterações climáticas na concentração de cloretos motivada pela diminuição da recarga, verificou-se que o efeito da extração de água dos furos é o fator determinante na sua evolução.

Para a disponibilidade de água subterrânea nos níveis piezométricos dos furos o estudo incidiu na análise de 12 desses sistemas de extração de água em que a metodologia utilizada para determinação da vulnerabilidade foi essencialmente a determinação da diferença entre a cota do nível estático após a redução e a cota da base do furo. A vulnerabilidade resultante para o período atual e futuro foi neutra e negativa. O grau de confiança atual foi médio e para o período futuro muito baixo. Qualquer exploração que conduza a diferenças de cotas entre o nível piezométrico e o fundo do furo menores do que 5m resultará numa suspensão da captação de água. Caso ocorra uma sobre-exploração, impedindo a recuperação natural das reservas de água nos aquíferos costeiros, a decorrente redução do nível significará a inutilização das captações nos furos comprometidos.

No que respeita ao outro impacto sobre a disponibilidade de água subterrânea, caudais de galerias, túneis e nascentes, utilizaram-se testes estatísticos para determinar a vulnerabilidade atual de oito galerias e túneis, sendo que, para a vulnerabilidade futura foi realizada uma modelação matemática do maciço do Paul da Serra de acordo com a redução da recarga prevista pelo CLIMAAT II. Só o Túnel 4 - Tornos apresentou uma vulnerabilidade atual negativa, sendo que as restantes galerias e túneis registaram uma classe de magnitude neutra. A confiança situou-se entre a baixa e a alta. A vulnerabilidade futura a médio e longo prazo apresentou classes de

magnitude entre a negativa e a crítica e com confiança associada média. As galerias e grupos de nascentes situadas nas cotas mais elevadas do Paul da Serra, dos 1000m para cima, são as mais vulneráveis à redução da recarga, uma vez que à medida que o nível piezométrico baixa, começa por afetar primeiro os caudais das captações mais elevadas cuja situação se torna crítica no caso das nascentes acima da cota 1000m e nas galerias do Rabaçal e Rabaças.

Por último, as necessidades de água por uso foram analisadas segundo dados apresentados no PGRH10, por determinação dos valores médios históricos de necessidades de água *per capita*. A vulnerabilidade resultante situou-se entre a neutra, “livre serviço” e a crítica, turismo. A confiança associada atual foi alta e a futura baixa. Concluiu-se ainda que o impacto na diminuição das disponibilidades hídricas é afetado sob duas vias pelas alterações climáticas. A dupla influência verifica-se pela diminuição do excedente subdividido em recarga e escoamento superficial e pelo aumento das necessidades de consumo da população, nos diversos usos, provocado pelo aumento de temperatura e redução de água das chuvas.

1. Introdução

É hoje inquestionável que o planeta tem vindo a sofrer desde meados do séc. XIX um aumento da concentração atmosférica de CO₂ com um conseqüente aumento da temperatura média do ar. Esta subida da temperatura global terá impactos na circulação geral da atmosfera e conseqüentemente no clima a nível global e local.

Dado o seu isolamento, a ilha da Madeira, região insular de pequena dimensão, depende de um correto e criterioso aproveitamento dos recursos naturais, sendo particularmente vulnerável às alterações climáticas uma vez que, principalmente os seus recursos hídricos, estão diretamente relacionados com o clima.

Torna-se, assim, necessário e urgente promover a avaliação dos impactos provocados pelas alterações climáticas sobre os recursos hídricos da Madeira e propor as medidas de adaptação mais adequadas a minimizar os efeitos desta realidade.

A água subterrânea, disponível mesmo na estação seca quando o escoamento superficial é reduzido ou inexistente é, no caso particular da ilha da Madeira, relativamente acessível uma vez que o maior volume provém da descarga natural das nascentes, sendo recolhida e transportada pelo sistema de levadas.

De acordo com o Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Arquipélago da Madeira (PGRH10) (Nemus/Hidromod, 2014) os recursos hídricos subterrâneos constituem, na Ilha da Madeira, a principal fonte de abastecimento, satisfazendo em média 70% das necessidades de consumo da população.

O projeto CLIMAAT II apresentou os primeiros resultados quantitativos relativos aos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos da ilha da Madeira (Santos e Aguiar, 2006). O presente estudo tem como objetivo identificar e caracterizar potenciais impactos das alterações climáticas sobre o sector dos Recursos Hídricos, tendo sido, para o efeito, atualizados os estudos elaborados no âmbito do CLIMAAT II e analisados outros aspetos dos recursos hídricos, que permitiram avaliar as principais vulnerabilidades do território nesse contexto. Para o efeito, foram desenvolvidas as seguintes tarefas:

- 1) Análise do impacto das AC's na qualidade da água subterrânea, através da avaliação da concentração de cloretos nos 21 furos de captação em funcionamento;
- 2) Análise do impacto das AC's nas disponibilidades de água subterrânea, através da evolução dos níveis piezométricos dos furos de captação;
- 3) Análise do impacto das AC's nas disponibilidades de água subterrânea, por modelação dos caudais das galerias, túneis e das nascentes do maciço do Paul da Serra;
- 4) Análise do impacto das AC's sobre a procura de água a partir da avaliação dos volumes consumidos pelos diferentes sectores.

Este estudo não abrangeu a ilha do Porto Santo onde, devido à sua escassez hídrica, o abastecimento de água se faz quase exclusivamente à custa de uma central dessalinizadora, cuja operação não deverá ser significativamente afetada pelas alterações climáticas.

Por não existirem dados de escoamentos superficiais para suportar uma análise dos mesmos, os recursos hídricos superficiais não foram considerados neste estudo.

2. Avaliação da qualidade da água subterrânea: salinização dos aquíferos

2.1. Metodologia

A concentração de cloretos, medida em mg/l, pode ser considerada a principal característica numa água que permite avaliar a sua salinidade e conseqüentemente o fenómeno de intrusão salina.

A água dos furos na Região Autónoma da Madeira (RAM) é alvo de análises onde são avaliadas variadas características, entre elas a concentração de cloretos. Esta informação é compilada e organizada pela IGA (Investimentos e Gestão da Água, S.A.) instituição responsável pela exploração, tratamento e abastecimento de água para consumo.

Uma vez que não se encontra definido um plano de amostragem regular, a série de dados temporal apresenta elevada descontinuidade, com elevado número de observações em falta, mesmo quando transformada em valores médios mensais de concentração de cloretos.

Os períodos de amostragem e dimensões das amostras são variáveis para cada furo analisado tal como se apresenta no Quadro 1.

Quadro 1 – Coordenadas retangulares, distância ao mar (Fonte: Investimentos e Gestão da Água, S.A.), período de amostragem e dimensão da amostra de teores de cloretos dos furos.

Furo	M	P	DM [m]	Período de amostragem	N
Furo 1 da Ribeira dos Socorridos (JK3)	316496,7	3615139,6	2030	[Fev-98; Jul-14]	96
Furo 2 da Ribeira dos Socorridos (JK2)	316551,5	3615236,2	2170	[Fev-02; Jun-14]	89
Furo 3 da Ribeira dos Socorridos (JK1)	316535,0	3615474,3	2325	[Jun-01; Jun-14]	88

Furo	M	P	DM [m]	Período de amostragem	N
Furo 4 da Ribeira dos Socorridos (JK4)	316383,8	3614765,0	1680	[Fev-01; Jun-14]	93
Furo 5 da Ribeira dos Socorridos (JK5)	315935,9	3613717,9	600	[Fev-01; Jun-14]	103
Furo 6 da Ribeira dos Socorridos (JK16)	316040,3	3614029,1	850	[Mar-98; Set-14]	101
Furo da Ribeira de São João (JK19)	320216,8	3614105,9	1150	[Jan-98; Set-14]	85
Furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20)	320415,5	3614730,0	1525	[Mai-97; Set-14]	95
Furo da Ribeira de João Gomes (JK18)	322100,7	3614889,6	1500	[Jan-98; Jul-10]	70
Furo da Ribeira do Caniço (JK23)	328678,8	3613308,4	430	[Ago-04; Set-14]	72
Furo 1 da Ribeira do Porto Novo (JK9)	329940,3	3614985,8	1000	[Abr-00; Set-14]	92
Furo 2 da Ribeira do Porto Novo (JK10)	329743,8	3615246,0	1250	[Mar-98; Set-14]	56
Furo 1 da Ribeira da Boaventura (JK17)	331337,0	3617647,7	900	[Fev-01; Set-14]	86
Furo 2 da Ribeira da Boaventura (JK21)	331533,1	3617527,3	650	[Jan-01; Jul-14]	58
Furo 1 da Ribeira de Santa Cruz (JK14)	331346,1	3618376,8	1200	[Nov-00; Out-14]	73
Furo 2 da Ribeira de Santa Cruz (JK15)	331712,1	3618159,9	850	[Abr-01; Out-14]	86
Furo 2 da Ribeira de Machico (JK7)	333958,7	3622376,2	2150	[Fev-01; Ago-14]	111
Furo 3 da Ribeira de Machico (JK12)	333774,7	3622678,4	2125	[Set-01; Ago-14]	106
Furo 5 da Ribeira de Machico (JK8)	332392,0	3622911,0	3375	[Set-03; Ago-14]	98
Furo 1 do Santo da Serra (JK11)	329333,0	3621628,0	5000	[Fev-04; Nov-12]	28
Furo 2 do Santo da Serra (JK22)	328569,1	3621451,1	4750	[Fev-04; Out-14]	30

Face à situação supramencionada, para além das amostras não apresentarem distribuição normal, a avaliação foi realizada com recurso a métodos de modelação e testes estatísticos não paramétricos, de acordo com a metodologia apresentada na Figura 1.

Após transformar o conjunto de dados de concentração de cloretos, obtidos das análises efetuadas aos furos, numa série temporal de médias mensais, foi aplicado o operador não paramétrico robusto *Lowess*.

Essa regressão não paramétrica de alisamento (RLWRS – *robust locally weighted regression smooth*) (Cleveland, 1979), permite uma alternativa de modelação não linear quando a assunção de linearidade não é de todo ajustada. Considerado um dos mais flexíveis e utilizados algoritmos de suavização (Helsel e Hirsch, 2002) efetua um alisamento dos valores distribuídos no tempo, permitindo

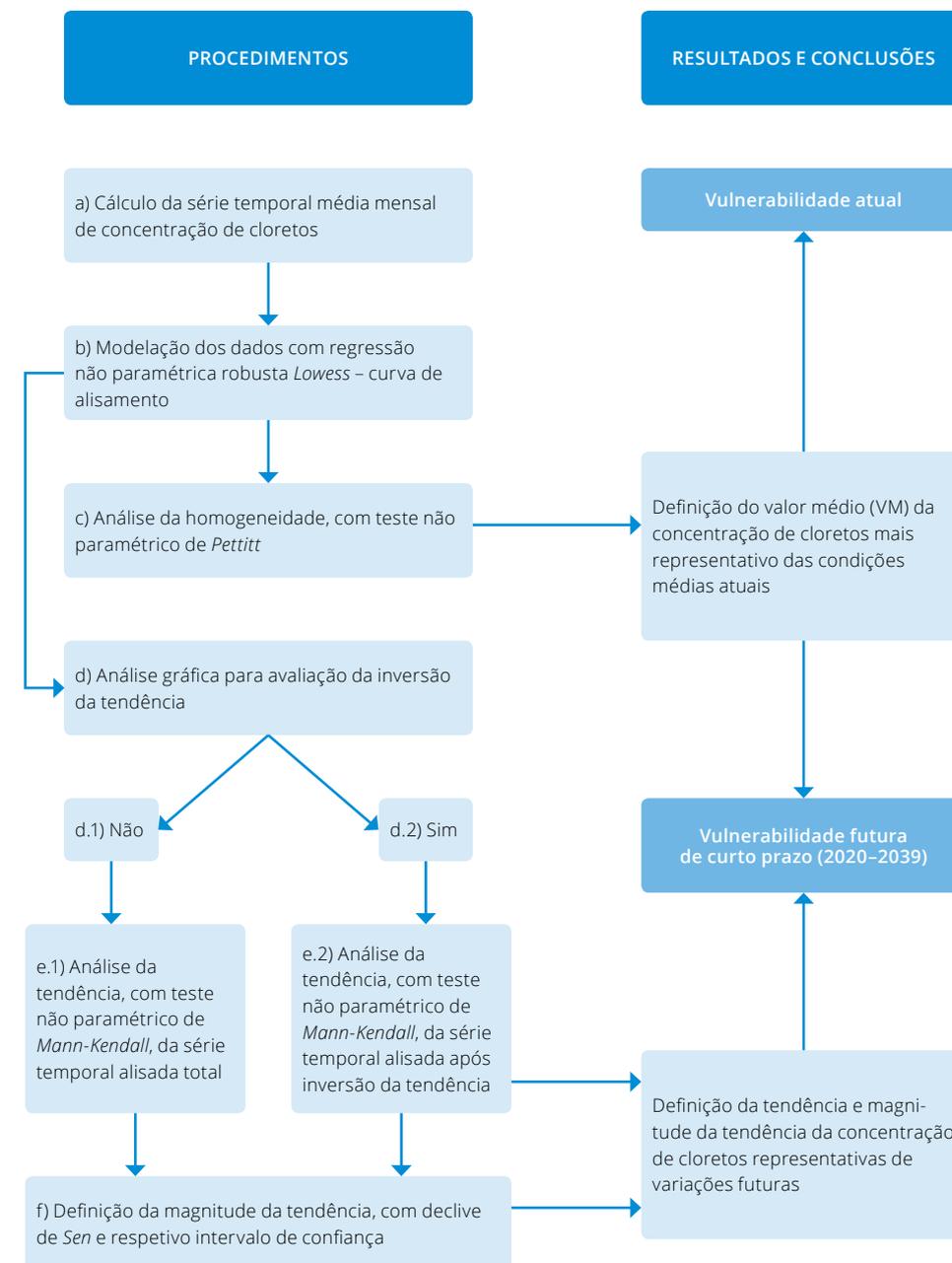


Figura 1 – Metodologia de avaliação da variação da qualidade da água subterrânea: salinização dos aquíferos (teor em cloretos), atual e futura de curto prazo.

atenuar flutuações observadas nos dados, nomeadamente devido a resultados espúrios, extremos pontuais ou efeitos de sazonalidade. Assim, mediante um procedimento de ajustamento robusto, os valores alisados não se encontram distorcidos por valores extremos ou outro tipo de pontos desviantes (Hipel e McLeod, 1994), que dificultam a avaliação da tendência da série temporal. Esta modelação tem sido aplicada em variados domínios de investigação, salientando-se, por exemplo, a sua utilização na análise de tendência de séries temporais de características que permitam aferir a qualidade de uma água (Bodo, 1989; Hipel e McLeod, 1994; McLeod, Hipel e Bodo, 1991)

No estudo da tendência da concentração de cloretos em furos da RAM desenvolvido no âmbito do CLIMAAT II, foi igualmente adotada a regressão *Lowess*, tendo sido posteriormente efetuada uma análise gráfica qualitativa da tendência.

No presente estudo, a regressão *Lowess* robusta aplicada apresentou os parâmetros enunciados no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros da regressão *Lowess*.

Parâmetros da regressão <i>Lowess</i> robusta	
Grau do polinómio	Polinómio de 1º grau
Função	<i>Kernell</i> - tricúbica
Fator de alisamento ($0 < f \leq 1$)	0,5*, com tolerância de 0,05
Observação de validação aleatória	1 observação
*Considerado um valor que produz resultados de alisamento razoáveis, quando há incerteza no valor que permite simultaneamente minimizar a variabilidade dos pontos alisados e manter o padrão fundamental ou inter-relações nos dados (Hipel 1994).	

Após a redefinição dos valores da concentração de cloretos resultantes do alisamento efetuado, toda a análise posterior incidiu sobre os mesmos.

Assumindo que a definição da vulnerabilidade percecionada atualmente deve representar não só o instante temporal atual mas sim um intervalo de tempo representativo da atualidade, foi adotado o valor médio da concentração de cloretos. No entanto, como a média resultante da análise de todo o período temporal da série, não necessariamente caracteriza a vulnerabilidade corrente, impôs-se a definição do intervalo de tempo mais representativo da atualidade e respetivo valor médio.

Nesse pressuposto considerou-se essencial avaliar se as séries temporais apresentavam alguma alteração do comportamento estatístico, designadamente com uma mudança (*change-point*) na média, ou seja um desvio da média.

Optou-se pela utilização do teste não paramétrico de *Pettitt* (Pettitt, 1979), considerado como uma ferramenta comum para a deteção da quebra da homogeneidade de séries temporais (Rybski e Neumann, 2011), que não requer nenhuma exigência na distribuição de dados, no qual a estatística desenvolvida localiza o ponto em que ocorre a mudança quando confirmada a quebra de homogeneidade.

O Quadro 3 apresenta os parâmetros adotados no teste de *Pettitt*.

Quadro 3 – Parâmetros do teste de *Pettitt*.

Parâmetros do teste de <i>Pettitt</i>	
Nível de significância, α	0,05
Determinação do p-valor	Método de Monte Carlo (10.000 simulações e 180s de tempo máximo)
H0 (Hipótese nula)	Os dados são homogéneos
H1 (Hipótese alternativa)	Há uma data em que ocorre uma alteração nos dados

Localizado o ponto de mudança, que corresponde a uma data, considerou-se o intervalo de tempo representativo da atualidade, o período desde essa data até ao registo mais recente. O valor médio da concentração de cloretos foi calculado para o período mencionado.

A definição da vulnerabilidade atual de cada furo foi efetuada tendo em conta a classificação apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – Níveis de classificação da vulnerabilidade actual decorrente da variação da qualidade da água subterrânea: salinização dos aquíferos.

Classificação	Concentração de Cl*
-3 Crítico	≥ 250 mg/l
-2 Muito negativo	[150 ; 250[mg/l
-1 Negativo	[50 ; 150[mg/l
0 Neutro	< 50 mg/l
1 Positivo	-

* VM após quebra de homogeneidade

Salienta-se que concentrações de cloretos superiores a 250 mg/l são absolutamente condicionantes, tornando a água inviável para o consumo humano.

Quando se pretende estimar tendências futuras, uma abordagem possível é avaliar historicamente o fenómeno e conjecturar que, pelo menos, num período de tempo curto a tendência atual manter-se-á, caso se mantenham constantes as tendências das variáveis influenciadoras.

Da mesma forma que a adoção do valor médio de todo o período temporal da série, não necessariamente caracteriza o cenário atual, também a identificação da tendência atual e futura com base na mudança gradual longo de todo o tempo da série não foi necessariamente considerada em todos os casos.

Se, resultado de uma análise gráfica cuidada, fosse verificada uma mudança brusca e acentuada da tendência, então a sua análise seria efetuada tendo em consideração o intervalo de tempo mais representativo da atualidade, ou seja, após a inversão de tendência. Esse intervalo de tempo não poderia, no entanto, ser inferior a 1/4 da duração total temporal da série e/ou 4 anos, para que pudesse ser assumida uma validação histórica da variação considerada. Nos casos em que tal não se verifica e, portanto a tendência atual é uma continuidade da mudança gradual verificada desde o início do registo, a análise da tendência foi realizada para a totalidade dos valores das séries temporais. Salienta-se, no entanto, que inversão da tendência não coincide necessariamente com quebra de homogeneidade, uma vez que pode ocorrer uma quebra de homogeneidade das médias de uma série sem que ocorra inversão da tendência da mesma. Assim, as datas resultantes do teste de *Pettitt* não foram consideradas aquando da determinação gráfica das datas de inversão de tendências.

Independentemente da situação em questão, o estudo das tendências foi efetuado com recurso ao teste não paramétrico de *Mann-Kendall* (Mann, 1945; Kendall, 1975)

Este teste, frequentemente utilizado na avaliação de tendências de séries históricas naturais que se distanciam da distribuição normal, como a da qualidade da água e escoamentos (Hipel e McLeod, 1994), como dados climáticos (Mirza, et al., 1998; Lazaro, et al., 2001; Libiseller e Grimvall, 2002; Portela, et al., 2011), examina se uma variável aumenta ou diminui continuamente com o tempo.

Também conhecido por *Kendall's tau*, é um método de análise resistente à influência de extremos, válido para amostras distorcidas, com elevado poder face a outros testes lineares de uso comum (Lazaro, et al., 2001; Önöz e Bayazit, 2003; Kahya, 2004).

O teste de *Mann-Kendall* clássico foi criado para ser aplicado em amostras sem sazonalidade, pelo que, quando esse princípio não é satisfeito os resultados assumem-se como indicadores grosseiros da confirmação da presença de tendências de series temporais (Hipel e McLeod, 1994).

Ainda assim, optou-se então generalizar a todos os furos a aplicação do teste clássico, desprezando o efeito da sazonalidade, nomeadamente, por dois motivos:

i) A descontinuidade das séries é elevada, comprometendo a veracidade dos resultados dos testes para avaliação da ocorrência ou não de sazonalidade (como por exemplo o teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis* (Helsel e Hirsch, 2002), ajustado para análise de séries de qualidade de água (Hipel e McLeod, 1994);

ii) O alisamento efetuado, com a regressão *Lowess*, atenua o efeito da sazonalidade, comprovado pela análise dos resultados do teste de *Mann-Kendall* clássico e sazonal, que tem em conta o efeito da sazonalidade da série (calculado o tau de *Kendall* médio relativamente a todos períodos sazonais, e o p-valor é determinado usando uma aproximação normal à distribuição do tau de *Kendall* médio). Os resultados dos dois métodos apresentam uma diferença média dos valores de tau reduzida, de cerca de 14%.

O teste de *Mann-Kendall* aplicado apresentava os parâmetros dispostos no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros do teste de *Mann-Kendall*.

Parâmetros do teste de <i>Mann-Kendall</i>	
Nível de significância, α	0,05
H0 (Hipótese nula)	Não há tendência na série
H1 (Hipótese alternativa)	Há uma tendência positiva na série

Contudo, ainda que seja possível determinar tendências estatisticamente significativas a magnitude das mesmas não é estimada. Para complementar a informação com uma medida quantitativa da tendência foi aplicado o estimador estatístico declive de Sen (Sen, 1968), considerado robusto mesmo quando na presença de *outliers* ou valores discordantes (Portela, et al., 2011).

Tendo em conta o valor médio da concentração de cloretos assumido como representativo da atualidade e a tendência e sua magnitude atual, considerando uma continuidade dos eventos verificados, efetuou-se uma estimativa da vulnerabilidade futura a curto prazo (2020-2039).

A classificação foi realizada de acordo com os critérios apresentados na Figura 2.

O princípio de base dos procedimentos apresentados é o de que a situação atual pode manter-se, agravar-se ou melhorar futuramente. A aceitação do cenário futuro depende da definição inequívoca da tendência e respetiva magnitude.

Assim, em primeiro lugar só ocorreu a análise da vulnerabilidade futura nas situações em que a tendência é significativa. Quando o intervalo de confiança do declive de Sen apresentava o mesmo sinal, sendo muito mais provável não existir uma inversão da tendência, a classificação efetuada

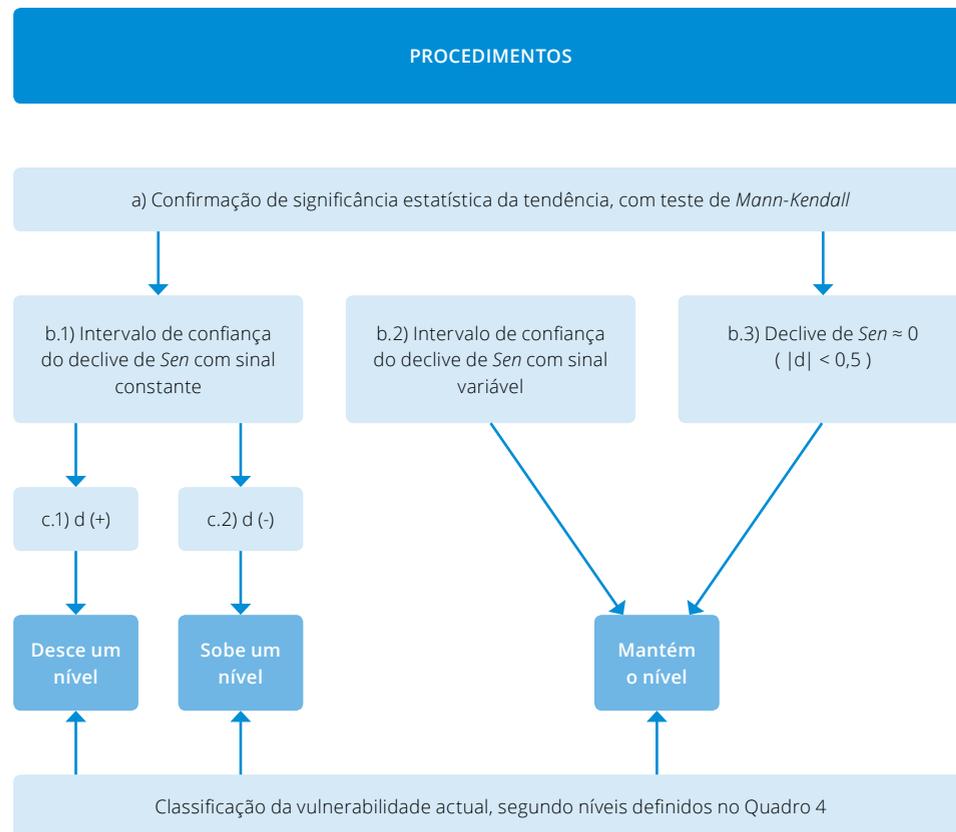


Figura 2 – Metodologia de classificação da vulnerabilidade futura de curto prazo.

da vulnerabilidade atual foi agravada ou atenuada, para tendência e respetivos declives positivos ou negativos, respetivamente. Nos casos em que o intervalo de confiança do declive de Sen apresentava variação no sinal ou quando o seu valor era aproximadamente igual a zero (valor do declive em módulo inferior a 0,5), considerou-se pertinente manter o nível de classificação atual.

Foram ainda calculadas algumas correlações entre valores reais de concentração de cloretos e os volumes de extrações e entre a concentração de cloretos e o índice de aridez (AI - *aridity index*), com intuito de concluir o tipo de relação entre as variáveis descritas e a dimensão do efeito entre as mesmas. O impacto de causas naturais e de causas humanas na concentração de cloretos dos furos pode assim ser de forma expedita analisada, aquando da apresentação das conclusões.

O índice de aridez consiste num indicador quantitativo do grau de secura do clima de um local, permitindo a definição de zonas climáticas (Maliva e Missimer, 2012). Assim, considerando-o um

indicador climático do grau de deficiência hídrica (Ranjan, Kazama, et al., 2006), a sua adequação a este estudo é manifesta, sendo correlacionável com características de água subterrânea. O índice adotado foi uma adaptação à escala mensal do índice de *Martonne* (Martonne, 1926) definido por: $AI = P / (T + 10)$, onde T é a temperatura média anual, em °C, e P a precipitação total anual, em mm. Esta expressão é adequada para temperaturas superiores a -9,9°C e decorrente da mesma observa-se que o valor de AI é tanto menor (aproximando-se de zero) quanto maior a aridez do local (Maliva e Missimer, 2012).

Tanto para o estabelecimento de correlações com os volumes extraídos como com o AI, o fator tempo foi eliminado. Para cada mês com registo de análises de concentração de cloretos foi efetuada a respetiva correspondência de volume e AI. O efeito da captação de água dos furos na concentração de cloretos foi considerado imediato devido ao efeito dos cones de depressão mas, no caso dos fatores climáticos, precipitação e temperatura, contidos no AI, os efeitos na concentração de cloretos são garantidamente diferidos no tempo dada a distância da zona de recarga, pelo que foram avaliados os efeitos com desfasamento (lag) até 12 meses.

É predominantemente nas zonas altas e planas da ilha que ocorre a recarga dos aquíferos, onde se associam simultaneamente precipitação mais intensa e formações vulcânicas mais recentes e permeáveis (Prada, et al., 2003; Prada, et al., 2005). Como a precipitação e temperatura são os fatores de exposição que influenciam a recarga, que por sua vez influencia os caudais médios de água subterrânea escoados no sentido terra-mar contrariando a intrusão salina, os valores adotados no cálculo de AI são os da zona de recarga dos furos. Estes foram disponibilizados em séries diárias e/ou séries de 10 em 10 minutos sendo posteriormente convertidos numa série mensal. Para a precipitação, os valores correspondem à precipitação total no mês e para a temperatura refletem a média mensal da temperatura média.

Para o estabelecimento de correlações foi utilizada a estatística de *Spearman* (Spearman, 1910), uma vez que sendo não paramétrica, pode ser adotada quando ocorre uma violação dos pré-requisitos paramétricos, tais como amostras sem distribuição normal. A hipótese nula define que as correlações não são diferentes de 0 e foram estabelecidas as hipóteses:

- H1.1 – Existe uma correlação negativa entre a concentração de cloretos medida nos furos e o índice de aridez associado à zona de recarga dos furos;
- H1.2 – Existe uma correlação positiva entre a concentração de cloretos medida nos furos e o volume de água captado nos furos.

Como as hipóteses são direcionais foi selecionado o teste de significância com uma extremidade (*one-tailed test*) (Field, 2005). O tipo de correlação é definida segundo o Quadro 6.

As vulnerabilidades futuras de médio e longo prazo foram definidas tendo por base a avaliação do impacto da diminuição dos níveis piezométricos. A respetiva classificação da vulnerabilidade baseou-se na consequente elevação da cunha salina, dado que a salinização do aquífero, com

comprometimento da qualidade da água subterrânea, é uma consequência dessa elevação. Há pois uma interação entre os impactos da diminuição dos níveis piezométricos e aumento do teor de cloretos.

Quadro 6 – Classificação da correlação (Franzblau, 1958).

Coefficiente de correlação	Tipo de correlação
$|r_s| < 0,20$	Negligenciável
$0,20 < |r_s| < 0,40$	Fraca
$0,40 < |r_s| < 0,60$	Moderada
$0,60 < |r_s| < 0,80$	Forte
$|r_s| > 0,80$	Muito forte

Em aquíferos livres, o nível piezométrico medido num furo coincide com nível freático, ou seja, a superfície limite entre a zona não saturada e a saturada do solo. Em circunstâncias naturais sem bombagens, tende a acompanhar o relevo da superfície.

No estudo do CLIMAT II foi efetuado uma avaliação das variações da piezometria de duas ribeiras, Machico e Socorridos. Recorrendo ao modelo matemático ASMWIN, foram simuladas as características que refletem apenas a influência de fatores climáticos, sem bombagens, com a consideração de níveis estáticos medidos aquando da execução dos furos. De acordo com a projeção de redução de recarga para os cenários climáticos futuros, obtiveram os resultados de variação dos níveis piezométricos apresentados no Quadro 7 e Quadro 8.

Quadro 7 – Redução do nível piezométrico na Ribeira dos Socorridos (Santos e Aguiar, 2006).

Socorridos - Redução do nível piezométrico [m]									
Período	Recarga [%]	Cenário	JK1	JK2	JK3	JK4	JK5	JK16	JK25
2040-2069	51	A2	2,89	2,74	2,59	2,2	1,02	1,45	1,42
	70	B2	1,77	1,68	1,59	1,35	0,62	0,89	0,87
2070-2099	42	A2	3,42	3,25	3,07	2,61	1,2	1,72	1,68
	59	B2	2,42	2,29	2,17	1,84	0,85	1,21	1,19

Quadro 8 – Redução do nível piezométrico na Ribeira de Machico (Santos e Aguiar, 2006).

Machico - Redução do nível piezométrico [m]							
Período	Recarga [%]	Cenário	JK6	JK7	JK8	JK12	JK13
2040-2069	66	A2	9,54	15,97	26,28	18,67	23,15
	57	B2	12,06	20,19	33,23	23,61	29,27
2070-2099	60	A2	11,22	18,78	30,92	21,96	27,23
	43	B2	15,99	26,76	44,06	31,3	38,8

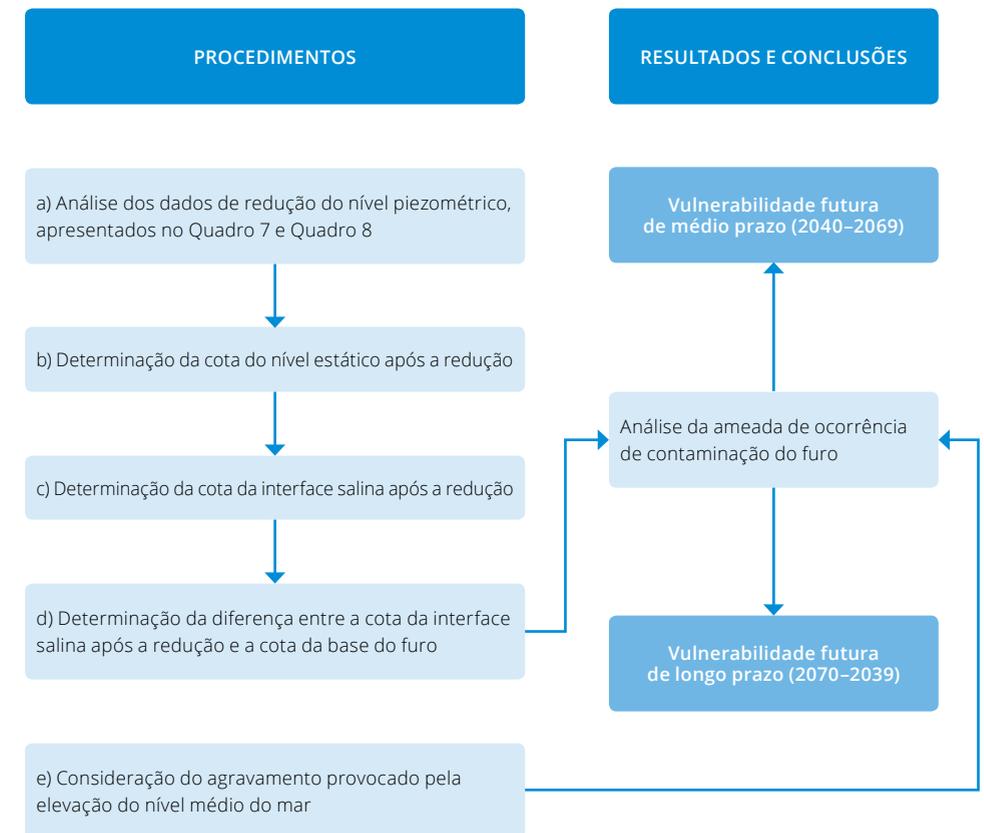


Figura 3 – Metodologia de avaliação da variação da qualidade da água subterrânea: salinização dos aquíferos, futura de médio e longo prazo.

Tendo já sido efetuada esta avaliação, tornou-se essencial a definição da sua influência e critérios de classificação da vulnerabilidade de aumento do teor de cloretos decorrente.

Assim, a primeira questão que se colocou foi a de que se estas reduções são negativas em termos de vulnerabilidade e qual o nível. Definiu-se como critério, o comprometimento da exploração dos furos por elevação da interface salina devido ao rebaixamento do nível freático, seguindo a metodologia apresentada na Figura 3.

Uma vez que a modelação efetuada, para avaliação da variação dos níveis piezométricos, teve como base os níveis estáticos dos furos, as respetivas cotas, apresentadas no Quadro 9, corresponderam aos valores de referência desta avaliação.

Os furos JK6 e JK13 da Ribeira de Machico já não se encontram em exploração, não existindo desde há muito dados sobre os mesmos, pelo que não foram considerados no presente estudo.

Quadro 9 – Coordenadas retangulares, distância ao mar e cotas de referência dos furos (Fonte: Investimentos e Gestão da Água, S.A.).

Ribeira	Furo	M	P	Distância mar [m]	Cota da base do furo [m]	Cota do nível estático [m]
Sta. Luzia	JK20	320415,5	3614730,0	1525	-36,68	24,10*
João Gomes	JK18	322100,7	3614889,6	1500	-44,50	11,02*
Socorridos	JK1	316535,0	3615474,3	2030	-77,31	4,94
	JK2	316551,5	3615236,2	2170	-83,87	3,93
	JK3	316496,7	3615139,6	2325	-76,15	4,75
	JK4	316383,8	3614765,0	1680	-60,40	5,15
	JK5	315935,9	3613717,9	600	-58,47	2,63
	JK16	316040,3	3614029,1	850	-29,64	3,06
	JK25	333958,7	3622376,2	1000	-45,57	2,73
	Machico	JK7	332392,0	3622911,0	2150	-54,88	18,06*
JK8		333774,7	3622678,4	3375	-44,78	109,92*
JK12		320415,5	3614730,0	2125	-42,94	22,2*

*A mais próxima do nível em repouso

As cotas dos níveis estáticos dos furos devem ser mais representativas da atualidade. No caso da Ribeira de Machico, após a execução do Túnel do Norte na década de 2000, verificou-se uma redução significativa dos níveis piezométricos devido à interceção do fluxo subterrâneo pelo túnel. Por esse motivo foram adotadas como cotas dos níveis estáticos dos furos JK7, JK8 e JK12, não os valores medidos na execução dos mesmos mas, os valores mais elevados registados no período de Janeiro de 2008 a Agosto de 2014. Considerou-se o valor mais elevado pois reflete o menor volume de água extraído, logo o mais aproximado do repouso.

Como referido anteriormente, o critério de avaliação da vulnerabilidade consistiu em perceber qual a perturbação gerada pela elevação da interface salina, efeito do rebaixamento do nível freático. Essa inter-relação pode ser definida pela expressão resultante do Princípio de *Ghyben-Herzberg* (Ghyben, 1889; Herzberg, 1901), que indica que o limite de água doce/água salgada se situa a uma profundidade, relativamente ao nível do mar, igual a 40 vezes da cota da água doce, na mesma vertical, tal como se apresenta esquematicamente na Figura 4.

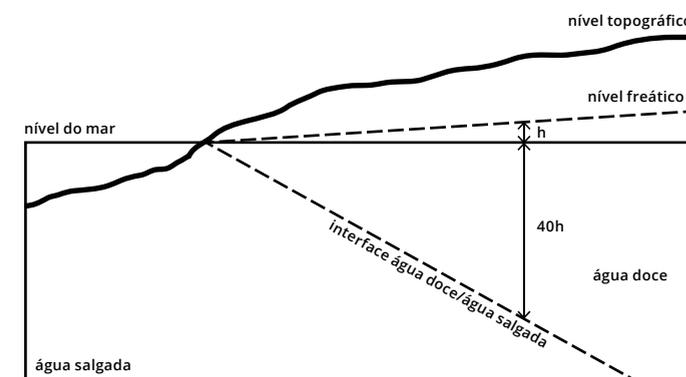


Figura 4 – Interface salina segundo o Princípio de *Ghyben-Herzberg* (Lobarinhas, Gomes, et al., 2011).

A adoção desta formulação subentende que os aquíferos costeiros analisados são livres e homogêneos e, conseqüentemente que o nível piezométrico medido nos furos coincide com nível freático. Os pressupostos exigidos foram simplificados considerados nos furos analisados significando, portanto, que as variações de níveis piezométricos estimadas são idênticas às variações dos níveis freáticos. Efetuando o produto de 40 vezes a cota do nível piezométrico projetado, obteve-se a estimativa futura da interface salina de cada furo.

De acordo com o último relatório de avaliação das alterações climáticas, IPCC AR5, as projeções que antes eram designadas por SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), passaram a ser representados por RCP (*Representative Concentration Pathways* - concentrações de CO₂ equivalentes), pelos cenários RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5. No que concerne às projeções de variação do nível

médio do mar foram adotados os cenários RCP 8.5 e RCP 6.0 (RCP) em detrimento do A2 e B2 (SRES), respetivamente. Embora o A2 não se relacione diretamente com o RCP 8.5, a alteração foi efetuada pois trata-se do cenário mais gravoso.

As projeções do aumento do nível médio do mar são para o RCP 6.0, a médio prazo, 0,18 a 0,32m e longo prazo, 0,33 a 0,63m. Quanto à projeção RCP 8.5, no médio prazo tem-se 0,22 a 0,38m e a longo prazo, 0,43 a 0,82m. Para a consideração do agravamento da elevação da interface salina por elevação do nível médio do mar, adotou-se o valor médio de subida da interface, 10,0m a médio prazo e 18,0m a longo prazo para a projeção RCP6.0 e, 12,0m e 25,2m para a projeção RCP8.5 a médio e longo prazo, respetivamente.

A posição relativa entre a interface salina e o fundo do furo correspondeu à medida de análise da maior ou menor viabilidade de comprometimento da exploração do furo por afetação negativa das reservas de água subterrâneas. Realça-se o facto de que quando a diferença de cotas é positiva, a interface salina encontra-se acima do fundo do furo, significando a contaminação total do mesmo. Para uma proximidade de cerca de 10m da interface salina ao fundo do furo, a água captada apresenta muito pouca qualidade devido ao elevado teor de cloretos.

A definição da vulnerabilidade futura de médio e longo prazo todos os furos analisados segundo esta metodologia, foi efetuada tendo em conta a classificação apresentada no Quadro 10.

Quadro 10 – Níveis de classificação da vulnerabilidade futura de médio e longo prazo decorrente da variação da qualidade da água subterrânea: salinização dos aquíferos.

Classificação	ΔCotas*
-3 Crítico	≥ -10 m
-2 Muito negativo	[-50 ; -10[m
-1 Negativo	[-100 ; -50[m
0 Neutro	< -100 m
1 Positivo	Subida do N.P.

* Cota da interface salina - Cota do fundo do furo

2.2. Resultados e discussão

Avaliando as estatísticas descritivas apresentadas no Quadro 11, confirma-se o alisamento efetuado com o modelo de *Lowess* às séries de dados de concentração de cloretos dos furos. Verifica-se, em todos os casos, uma diminuição dos valores do desvio padrão em cerca de 60%, em média, salientando-se o furo 1 da Ribeira do Porto Novo (JK9) com a menor diminuição, 28,78%, e o furo 5 da Ribeira de Machico (JK8) com a maior, 82,67%. Essa variação dos desvios padrões não implica porém diferenças significativas nas médias entre o real e alisado, verificado pelo módulo

das diferenças de apenas 1,30%, em média, com o maior valor a ser exibido pelo furo 2 da Ribeira do Porto Novo (JK10), -3,18%, e, o menor valor pelo furo 2 da Ribeira de Machico (JK7), 0,04%.

O desvio padrão é uma medida de dispersão que mede a variabilidade dos valores de uma amostra relativamente à média, sendo que, a valores menores de desvio padrão estão associadas menores dispersões nos valores das amostras (Field 2005). Analisando apenas os valores máximos e mínimos conclui-se que, com o alisamento, os valores mínimos são maiores em média cerca de 33,90% e os máximos menores em média 23,95%, resultando numa diferença média entre extremos significativamente menor (64,72%) quando comparada com a amostra real. A maior e menor diferença entre extremos ocorre, à semelhança do desvio padrão como seria expectável, no furo 5 da Ribeira de Machico e no furo 1 da Ribeira do Porto Novo, com 91,85% e 23,64%, respetivamente.

Note-se ainda que a localização dos furos, no que se refere à distância ao mar, é determinante para o valor médio da concentração de cloretos. A maior influência da proximidade ao mar no efeito do fenómeno de intrusão salina, nomeadamente por uma exposição mais direta à elevação do nível médio do mar e efeitos mais imediatos da infiltração de água salgada no sentido mar-terra, é patente no coeficiente de *Spearman*. Verificou-se uma correlação significante negativa forte entre a distância ao mar e a concentração média de cloretos nos furos ($r_s = -0,698$, $p_s(1 \text{ extrem.}) < 0,05$), sendo que a distância ao mar explica 48,7% da variabilidade da concentração de cloretos média.

Os gráficos das distribuições temporais das concentrações de cloretos reais e alisadas podem ser consultados no Anexo I.

Da aplicação do teste de *Pettitt*, verificou-se em todos os furos uma quebra da homogeneidade da série temporal de concentração de cloretos. Esta conclusão assenta no princípio de que para valores de $p < 0,05$ deve-se rejeitar a hipótese nula de que os dados são homogéneos e aceitar a hipótese alternativa de que há uma data em que ocorre uma alteração nos dados. Em todos os casos $p < 0,05$, tal como se apresenta no Quadro 12, pelo que a quebra de homogeneidade em cada furo ocorre na data indicada, tendo sido possível o cálculo do valor médio da concentração de cloretos após a quebra.

Salienta-se, no entanto, que a variação positiva ou negativa do valor médio após a quebra de homogeneidade relativamente ao valor médio da totalidade da série é de apenas 8,28%, em média, apresentando o furo 2 da Ribeira de Machico (JK7) a diferença mais baixa de -0,54% e, o furo da Ribeira do Caniço (JK23) a mais alta com -18,58%.

Em valores absolutos, pode ser verificado que o furo 2 da Ribeira da Boaventura (JK21) apresenta o maior valor médio de concentração de cloretos, com 278,90mg/l, contrastando com os 15,42mg/l do furo 2 do Santo da Serra (JK22).

Quadro 11 – Estatísticas descritivas da amostra da concentração de cloretos e da amostra alisada pelo modelo Lowess, por furo.

Furo	Amostra Cl [mg/l]				Amostra Cl alisada [mg/l] - Regressão não paramétrica Lowess			
	Mín.	Máx.	Média	SD	Mín.	Máx.	Média	SD
JK3	14,00	29,30	20,61	4,38	19,12	23,24	20,58	1,15
JK2	16,00	45,50	25,93	6,49	21,83	28,66	25,35	2,52
JK1	23,00	74,00	43,65	11,07	35,45	47,06	43,05	2,58
JK4	24,00	130,50	90,45	22,72	70,07	101,64	91,24	10,44
JK5	18,50	63,00	37,70	11,12	27,89	45,38	37,03	6,00
JK16	10,00	49,70	28,01	7,99	18,38	34,47	27,86	5,05
JK19	44,70	211,00	110,56	29,05	85,91	130,50	112,85	12,56
JK20	25,00	186,50	97,69	33,40	61,17	120,87	100,09	16,10
JK18	33,00	102,00	67,10	10,39	61,27	72,67	67,83	2,72
JK23	60,00	184,00	105,01	30,29	86,83	165,10	102,83	19,13
JK9	76,00	138,00	109,63	16,08	77,31	124,65	108,73	11,45
JK10	39,00	98,00	72,55	13,82	64,65	90,38	74,86	5,36
JK17	63,20	286,00	147,86	42,00	87,32	178,07	144,60	23,00
JK21	71,10	505,00	240,47	120,89	129,20	411,28	235,68	56,63
JK14	61,00	261,00	108,53	26,74	95,13	128,40	106,55	7,93
JK15	21,50	306,50	174,26	63,77	62,43	211,23	171,20	37,16
JK7	35,50	47,00	41,05	1,49	39,90	41,39	41,04	0,38
JK12	24,00	40,00	33,73	1,78	33,25	34,60	33,83	0,31
JK8	18,50	33,00	23,49	1,78	22,92	24,10	23,43	0,36
JK11	13,00	18,00	16,18	1,16	15,85	16,81	16,21	0,25
JK22	12,00	17,00	14,20	1,32	13,41	16,79	14,22	0,87

Quadro 12 – Resultados do teste não paramétrico de Pettitt, por furo

Teste não paramétrico de Pettitt			
Furo	t	p-valor	VM após quebra
JK3	Ago-06	< 0,0001	19,75
JK2	Mai-08	< 0,0001	22,96
JK1	Set-10	0,00	41,77
JK4	Nov-07	< 0,0001	81,64
JK5	Out-08	< 0,0001	31,26
JK16	Abr-07	< 0,0001	23,36
JK19	Dez-02	< 0,0001	119,38
JK20	Out-05	< 0,0001	88,24
JK18	Fev-07	< 0,0001	65,10
JK23	Fev-11	< 0,0001	121,93
JK9	Jan-06	< 0,0001	112,90
JK10	Jun-11	< 0,0001	80,05
JK17	Fev-09	< 0,0001	162,57
JK21	Jul-07	< 0,0001	278,90
JK14	Nov-09	< 0,0001	113,91
JK15	Out-06	< 0,0001	193,80
JK7	Nov-07	< 0,0001	41,26
JK12	Out-09	< 0,0001	34,07
JK8	Set-09	< 0,0001	23,82
JK11	Fev-09	0,008	16,52
JK22	Jun-09	0,001	15,42

Quadro 13 – Resultados do teste não paramétrico de Mann-Kendall, por furo.

Furo	Análise gráfica da inversão acentuada de tendência	Teste não paramétrico de Mann-Kendall e Declive de Sen (série total para t=0, após inversão da tendência para t≠0)			
		Teste da tendência		Magnitude da tendência	
		Tau	p-valor	Declive de Sen	Intervalo de confiança
JK3	-	-0,772	<0,0001	-0,036	] -0,123 ; 0,040 [
JK2	Mai-06	-0,443	<0,0001	-0,100	] -0,319 ; 0,083 [
JK1	Mai-07	-0,662	<0,0001	-0,092	] -0,393 ; 0,188 [
JK4	-	-0,730	<0,0001	-0,341	] -0,843 ; 0,062 [
JK5	Jul-06	-0,944	<0,0001	-0,271	] -0,460 ; -0,058 [
JK16	Jul-04	-0,954	<0,0001	-0,192	] -0,331 ; -0,068 [
JK19	Mar-06	-0,711	<0,0001	-0,222	] -0,979 ; 0,402 [
JK20	-	-0,893	<0,0001	-0,553	] -1,159 ; 0,018 [
JK18	Fev-03	-0,926	<0,0001	-0,223	] -0,491 ; -0,045 [
JK23	Ago-10	0,980	<0,0001	1,932	] 0,831 ; 5,250 [
JK9	Fev-09	-0,964	<0,0001	-0,520	] -0,928 ; -0,182 [
JK10	Fev-10	0,890	<0,0001	0,655	] -0,016 ; 1,624 [
JK17	-	0,904	<0,0001	0,853	] 0,008 ; 2,026 [
JK21	-	0,701	<0,0001	2,902	] -1,652 ; 8,612 [
JK14	Nov-09	0,961	<0,0001	0,760	] 0,260 ; 1,756 [
JK15	-	0,502	<0,0001	0,951	] -0,845 ; 4,082 [
JK7	Set-09	-0,693	<0,0001	-0,008	] -0,033 ; 0,011 [
JK12	Set-06	0,720	<0,0001	0,011	] -0,006 ; 0,031 [
JK8	Set-06	0,760	<0,0001	0,015	] -0,009 ; 0,040 [
JK11	-	0,407	0,003	0,018	] -0,074 ; 0,117 [
JK22	-	0,260	0,046	0,037	] -0,113 ; 0,392 [

Independentemente de ter sido identificada graficamente uma inversão acentuada da tendência de algumas das séries temporais e a respetiva data em que ocorre, verificou-se que todos os valores de tau são significantes ($p < 0,05$), sendo aceite a hipótese alternativa de que há tendência no tempo das séries de concentração de cloretos em todos os furos analisados, tal como apresentado no Quadro 13.

Verificaram-se tendências positivas em 10 dos 21 furos analisados, com o furo 2 da Ribeira da Boaventura a apresentar a maior magnitude com um declive de 2,902 e, o furo 3 da Ribeira de Machico a menor com um declive de 0,011.

Dos 11 furos com tendências negativas o maior declive está associado ao furo da Ribeira de Santa Luzia, com -0,553, e o menor ao furo 2 da Ribeira de Machico, com -0,008.

Ao analisar os resultados apresentados no Quadro 14, verificou-se que perspetiva-se uma elevação da interface salina de tal forma acentuada em diversos furos, nos dois cenários climáticos, que as captações ficarão totalmente comprometidas a médio e/ou longo prazo por contaminação de água salgada.

Quadro 14 – Diferença entre a cota da interface salina e a cota da base dos furos.

Ribeira	Furo	Médio prazo		Longo prazo	
		RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 6.0
Socorridos	JK1	7,31	-39,49	41,71	-4,29
	JK2	48,27	3,87	81,87	37,47
	JK3	1,75	-40,25	34,15	-7,85
	JK4	-45,60	-81,60	-16,00	-52,80
	JK5	6,07	-11,93	26,47	6,47
	JK16	-22,76	-47,16	1,24	-25,16
	JK25	5,17	-18,83	28,77	3,17
Machico	JK7	-16,72	>0	>0	>0
	JK8	-3288,82	-3012,82	-3090,02	-2570,42
	JK12	-86,26	>0	58,54	>0

No cenário RCP 8.5, a médio prazo, no furo JK2 a interface salina encontrar-se-á 48,27m acima do fundo do furo e, a longo prazo, nos furos JK1, JK2, JK3, JK5 e JK25, salientando-se também o furo JK2 com o valor mais elevado de 81,87m e o furo JK5 com o menor valor de 26,47m. No cenário RCP 6.0 só a longo prazo a água salgada invadirá o furo JK5 com altura de água salgada sobre o fundo do furo de 6,47m. No entanto, a médio prazo o furo JK2 já apresentará uma qualidade muito reduzida, uma vez que a cunha salina encontrar-se-á a cerca de 12m de distância do fundo do furo.

Como pode ser verificado nos furos JK7 e JK12, a médio e longo prazo não são apresentados alguns valores exatos. Não foram efetuados os cálculos descritos em 2.1, uma vez que a diminuição do nível piezométrico estimada quando relacionada com o nível estático, resultaria numa cota do nível estático após a redução inferior ao nível médio do mar. Ainda que a aplicação da formulação para o cálculo da interface salina se encontre inviabilizada, tal situação é já demonstrativa da gravidade do cenário, assumindo-se a contaminação total do furo em questão.

Quadro 15 – Matriz de vulnerabilidades da diminuição da qualidade da água subterrânea: salinização dos aquíferos (versão completa no Anexo IV).

Furo	Atual	Curto prazo (2020-2039)	Médio prazo		Longo prazo	
			RCP8.5	RCP6.0	RCP8.5	RCP6.0
Furo 1 da Ribeira dos Socorridos (JK3)	0	0	-3	-2	-3	-3
Furo 2 da Ribeira dos Socorridos (JK2)	0	0	-3	-3	-3	-3
Furo 3 da Ribeira dos Socorridos (JK1)	0	0	-3	-2	-3	-3
Furo 4 da Ribeira dos Socorridos (JK4)	0	0	-2	-1	-2	-1
Furo 5 da Ribeira dos Socorridos (JK5)	0	0	-3	-2	-3	-3
Furo 6 da Ribeira dos Socorridos (JK16)	0	0	-2	-2	-3	-2
Furo da Ribeira de São João (JK19)	-1	-1	-	-	-	-
Furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20)	-1	0	-	-	-	-
Furo da Ribeira de João Gomes (JK18)	-1	-1	-	-	-	-
Furo da Ribeira do Caniço (JK23)	-1	-2	-	-	-	-
Furo 1 da Ribeira do Porto Novo (JK9)	-1	0	-	-	-	-
Furo 2 da Ribeira do Porto Novo (JK10)	-1	-2	-	-	-	-
Furo 1 da Ribeira da Boaventura (JK17)	-2	-3	-	-	-	-
Furo 2 da Ribeira da Boaventura (JK21)	-3	-3	-	-	-	-
Furo 1 da Ribeira de Santa Cruz (JK14)	-1	-2	-	-	-	-
Furo 2 da Ribeira de Santa Cruz (JK15)	-2	-3	-	-	-	-
Furo 2 da Ribeira de Machico (JK7)	0	0	-2	-3	-3	-3
Furo 3 da Ribeira de Machico (JK12)	0	0	-1	-3	-3	-3
Furo 5 da Ribeira de Machico (JK8)	0	0	0	0	0	0
Furo 1 do Santo da Serra (JK11)	0	0	-	-	-	-
Furo 2 do Santo da Serra (JK22)	0	0	-	-	-	-

Na avaliação do impacto efetuada e correspondente classificação da vulnerabilidade, apresentada no Quadro 15, considerou-se que o grau de confiança associado é muito alto para a vulnerabilidade atual e baixo para a futura.

A confiança atual é muito alta pois a análise foi efetuada tendo como base dados reais e séries temporais com pelo menos 10 anos. A confiança futura é baixa pois o teor de cloretos é maioritariamente dependente da ação humana pela extração de água nos furos, como apresentado em 2.3. Esta evidência resulta que qualquer alteração futura significativa nas tendências históricas dos volumes elevados, resultará numa resposta correspondente da variação da concentração de cloretos independentemente da alteração climática.

A modelação realizada para avaliar a diminuição futura dos níveis baseou-se apenas no valor do nível estático medido durante a execução dos furos. Como esse valor pode não ser representativo da evolução posterior do nível piezométrico em repouso, considerou-se uma confiança baixa.

2.3. Conclusão

Avaliando o impacto potencial de diminuição da qualidade da água subterrânea por salinização dos aquíferos, concluiu-se que dos 21 furos analisados, ocorrerá um provável agravamento do teor em cloretos em apenas 6, como se poderá constatar pela Figura 5. Os furos 1 da Ribeira de Santa Cruz (JK14) e 2 da Ribeira do Porto Novo (JK10) e o furo da Ribeira do Caniço (JK23), atualmente com uma vulnerabilidade classificada com Negativo face à concentração média de cloretos, a curto prazo poderão passar a exibir uma classificação de Muito Negativo devido à tendência de aumento da concentração. Os furos 1 da Ribeira da Boaventura (JK17) e 2 da Ribeira de Santa Cruz (JK15) estão na mesma situação mas com níveis mais gravosos, atualmente muito negativo podendo num cenário de curto prazo passar a crítico. O furo 2 da Ribeira da Boaventura (JK21) já se apresenta numa condição crítica e a perspetiva é de que a tendência continue a ser de aumento da concentração de cloretos. Numa posição inversa, o furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20) e o furo 1 da Ribeira do Porto Novo (JK9) apresentam uma tendência de melhoria da qualidade da água, por diminuição da concentração de cloretos, passando atualmente do estado negativo para neutro.

Os furos da Ribeira de João Gomes (JK18) e de São João (JK19) apresentam uma vulnerabilidade atual e futura (2020-2039) negativa. Os restantes 11 furos encontram-se atualmente num estado neutro que se manterá futuramente a curto prazo.

Analisando um exemplo de furo, para cada tipo de aumento ou diminuição da classificação da vulnerabilidade, foi possível obter conclusões consistentes da influência dos fatores de exposição (precipitação e temperatura) e um dos fatores de sensibilidade (volumes captados para satisfação de necessidades de consumo).

Estabelecidas correlações entre as concentrações de cloretos e o índice de aridez concluiu-se que é consistente a correlação negativa, ou seja, que ocorre uma diminuição da concentração de cloretos com o aumento do índice de aridez, como apresentado no Quadro 16.

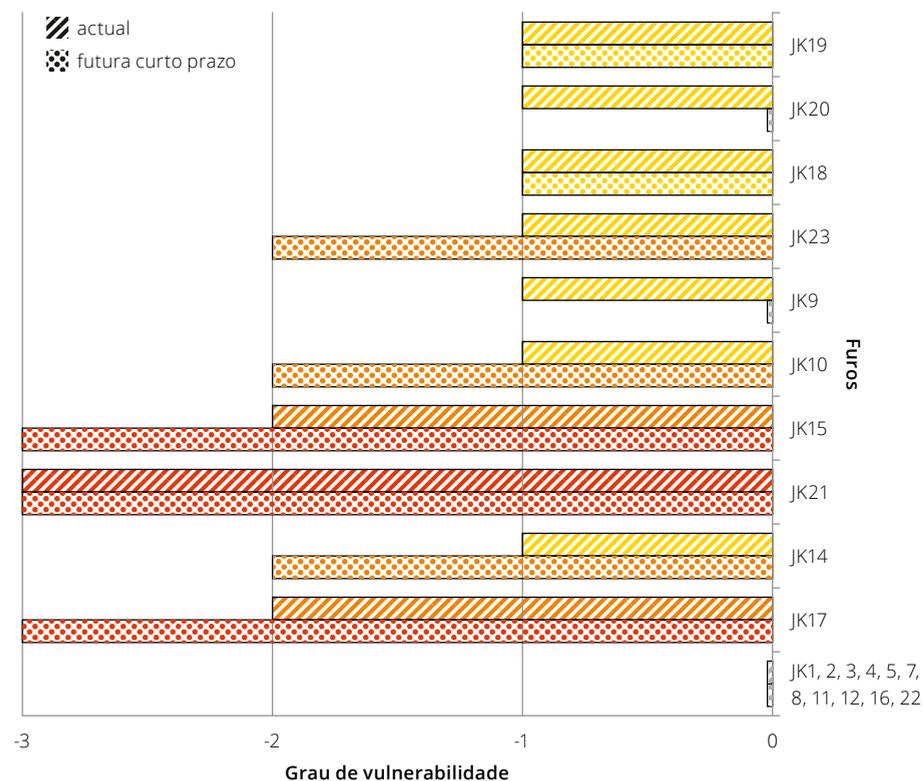


Figura 5 – Vulnerabilidade atual e futura a curto prazo por salinização dos aquíferos.

Quadro 16 – Resultados do teste de correlação de Spearman entre a concentração de cloretos e o índice de aridez

Varição da classificação da vulnerabilidade	Furo	Zona de recarga	Lag AI [meses]	r_s	P_s (1 extremidade)	r_s^2 [%]
-1 à 0	JK20	Areiro	3	-0,314	<0,01	9,86
-1 à -2	JK23	Sto. Serra	1	-0,475	<0,01	22,56
-2 à -3	JK15	Sto. Serra	1	-0,534	<0,01	28,52

Da análise da evolução climática futura, elaborada, devido ao método adoptado, apenas para curto prazo (2020-2039), prevê-se que a temperatura média anual na Madeira suba entre 0,5 a 0,9 °C e que a precipitação anual média diminua entre 9 a 28 %. Estas condições são

determinantes para uma redução da recarga e consequentemente dos caudais de escoamento subterrâneo que são responsáveis por contrariar o fenómeno de intrusão salina.

Analisando o impacto no índice de aridez, conclui-se que ocorre uma diminuição significativa do mesmo promovido simultaneamente pelo aumento da temperatura e diminuição da precipitação. Assim, e face aos resultados apresentados anteriormente, seria expectável que, a ocorrer uma variação da classificação da vulnerabilidade, esta fosse sempre no sentido do agravamento das condições de qualidade da água por aumento da concentração de cloretos. A situação apresentada para todos os furos com diminuição da concentração de cloretos, particularmente, para o furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20) é contrária ao expectável.

Conclui-se portanto que, ainda que ocorram correlações significantes entre o teor de cloretos registado nos furos e o índice de aridez, desfasado para afetar o intervalo de tempo necessário para que se façam sentir os efeitos, estas são fracas a moderadas.

O que se verificou é que o efeito dos volumes extraídos parece ser consideravelmente mais determinante na variação da concentração de cloretos, Quadro 17, com correlações significativas fortes que explicam em média 50% da variabilidade da concentração de cloretos.

Quadro 17 – Resultados do teste de correlação de Spearman entre a concentração de cloretos e o volume elevado

Varição da classificação da vulnerabilidade	Furo	r_s	P_s (1 extremidade)	r_s^2 [%]
-1 à 0	JK20	0,671	<0,01	45,02
-1 à -2	JK23	0,751	<0,01	56,40
-2 à -3	JK15	0,712	<0,01	50,69

Assim, analisando a tendência dos volumes com o teste de Mann-Kendall após alisamento com o modelo de Lowess, verificam-se valores de tau consistentes com tendências positivas iguais a 0,394 e 0,488 ($p_s < 0,05$) para os furo da Ribeira do Caniço (JK23) e furo 2 da Ribeira de Santa Cruz (JK15), respetivamente. Já o furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20), justificando a redução da concentração de cloretos verificada, tem registado uma diminuição dos volumes elevados de acordo com o tau de Kendall igual a -0,636, $p < 0,05$.

Os gráficos das séries temporais de volumes extraídos alisadas podem ser observados no Anexo II.

Ainda que haja uma influência das alterações climáticas na concentração de cloretos motivada pela diminuição da recarga, verifica-se que o efeito da extração de água dos furos, para suprir parcialmente as necessidades de consumo, é o fator determinante na sua evolução.

Da análise da evolução dos níveis piezométricos, conclui-se que a qualidade da água subterrânea na zona litoral do aquífero de base ficará muito diminuída a médio e longo prazo.

Verifica-se, de acordo com o Quadro 15, que para o cenário climático RCP8.5, o furo JK16 da Ribeira dos Socorridos e furo JK7 da Ribeira de Machico passarão de um estado muito negativo a médio prazo para um cenário crítico a longo prazo, sendo que neste cenário o aumento mais acentuado é do furo JK12 que passa do negativo para o crítico. Os furos JK2, JK3 e JK5 que a médio prazo já se encontrarão num cenário crítico manterão a longo prazo a mesma classificação. No cenário climático RCP6.0 verifica-se agravamento do impacto nos furos JK1, JK3 e JK5, sendo que os restantes apresentarão a mesma vulnerabilidade.

Salienta-se que o furo JK4 da Ribeira dos Socorridos, a longo prazo para os cenários RCP8.5 e RCP6.0, apresentam resultados muito próximos da situação crítica e muito negativa respetivamente. Com efeito, caso fosse adotado o valor mais condicionante de subida do nível médio do mar para os cenários climáticos referidos, o acréscimo de 7,6m do RCP 8.5 de elevação da cunha salina resultaria numa classificação crítica e não muito negativa. Por outro lado, o acréscimo de 6m do RCP 6.0, resultaria numa mudança de negativa para muito negativo. Para o furo JK5 da mesma ribeira, mas agora a médio prazo, a utilização do máximo valor prospetivado para o cenário RCP 6.0, resultará num acréscimo de 2,8m, suficientes para a vulnerabilidade passar de muito negativa a crítica.

3. Avaliação da disponibilidade de água subterrânea: níveis piezométricos

3.1. Metodologia

À semelhança da metodologia apresentada no Capítulo 2.1, foi considerado simplificada que os aquíferos costeiros são livres, significando que o nível piezométrico coincide com o nível freático.

Face ao exposto, é válido assumir que numa avaliação de disponibilidades hídricas subterrâneas, o nível piezométrico apresenta-se como um indicador da quantidade de água disponível.

Foram considerados os valores de variação dos níveis piezométricos apresentados nos Quadro 7 e Quadro 8 obtidos no estudo do CLIMAT_II.

Com base nessa avaliação, definiu-se a sua influência e critérios de classificação das vulnerabilidades decorrentes. Definiu-se como critério, o comprometimento da exploração dos furos devido ao rebaixamento do nível freático, seguindo-se a metodologia apresentada na Figura 6.

As cotas dos níveis estáticos dos furos, apresentadas no Quadro 9, corresponderam aos valores de referência desta avaliação.

Para os furos das Ribeiras de Machico, Santa Luzia e João Gomes tendo sido disponibilizados registos de níveis piezométricos e, portanto, definidos valores estáticos mais atuais, foi definida a vulnerabilidade atual.

A projeção das cotas dos níveis piezométricos futuros consistiu em afetar o nível estático inicial das variações estimadas, apresentadas no Quadro 7 e Quadro 8.

A posição relativa entre a cota estática após redução no nível piezométrico e o fundo do furo correspondeu à medida de análise da maior ou menor viabilidade de comprometimento da exploração do furo por afetação negativa das reservas de água subterrâneas. Realça-se o facto

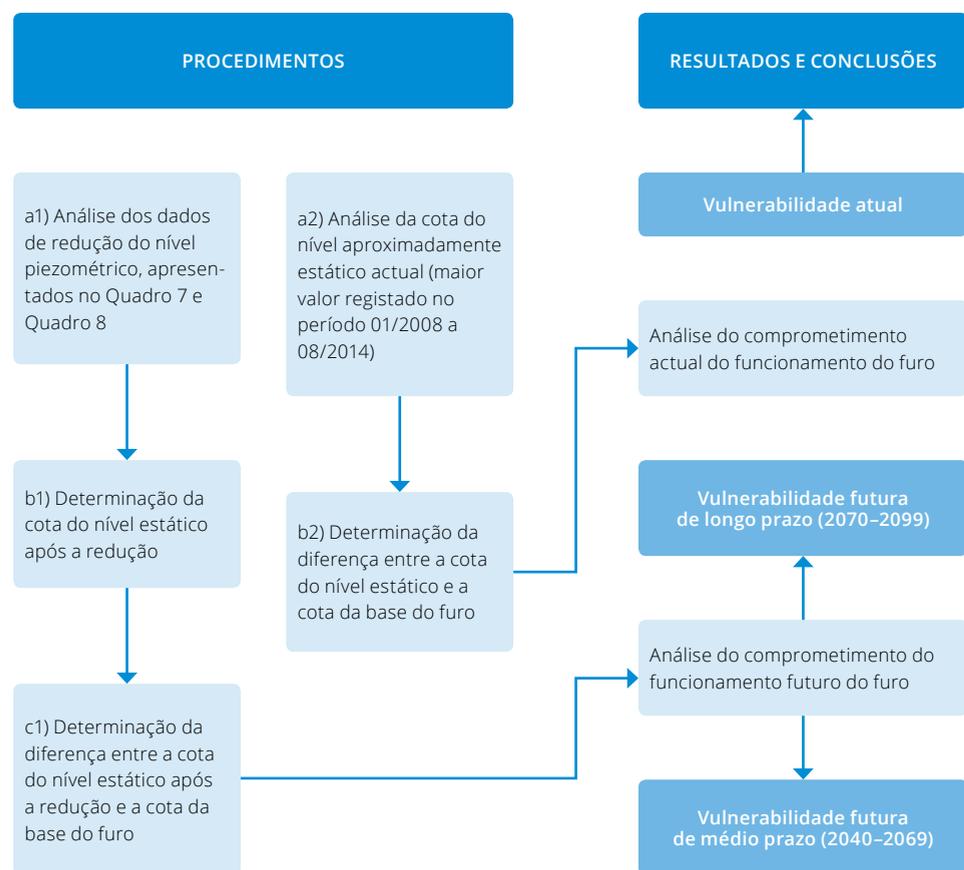


Figura 6 – Metodologia de avaliação da variação da quantidade da água subterrânea: níveis piezométricos.

Quadro 18 – Níveis de classificação da vulnerabilidade decorrente da variação da quantidade da água subterrânea: níveis piezométricos.

Classificação	ΔCotas*
-3 Crítico	< 5 m
-2 Muito negativo	[25 ; 5[m
-1 Negativo	[50 ; 25[m
0 Neutro	> 50 m

* Cota do nível piezométrico reduzido - Cota do fundo do furo

de que quando a diferença de cotas é inferior a 5m, dada a proximidade à bomba, a extração fica comprometida. Salienta-se que atualmente, no sentido de evitar rebaixamentos do nível piezométrico de tal forma elevados que comprometam a integridade de funcionamento do sistema de elevação, sempre que o nível desça a uma altura inferior a 1m da bomba, o sistema suspende a bombagem de água.

A definição da vulnerabilidade actual nos furos da Ribeira de Machico, Santa Luzia e João Gomes e futura dos furos da Ribeira de Machico e Socorridos foi efetuada tendo em conta a classificação apresentada no Quadro 18.

3.2. Resultados e discussão

Ao analisar os resultados apresentados no Quadro 19, verificou-se que perspetiva-se uma elevada diminuição do nível piezométrico estático mas sem que ocorra o comprometimento a médio e/ou longo prazo do funcionamento dos furos.

Quadro 19 – Diferença entre a cota do nível estático e a cota da base dos furos.

		Atual	Médio prazo (2040-2069)		Longo prazo (2070-2099)	
Ribeira	Furo	-	A2	B2	A2	B2
Sta. Luzia	JK20	62,78	-	-	-	-
João Gomes	JK18	55,52	-	-	-	-
Socorridos	JK1	-	79,36	80,48	78,83	79,83
	JK2	-	85,06	86,12	84,55	85,51
	JK3	-	78,31	79,31	77,83	78,73
	JK4	-	63,35	64,20	62,94	63,71
	JK5	-	60,08	60,48	59,90	60,25
	JK16	-	31,25	31,81	30,98	31,49
	JK25	-	46,88	47,43	46,62	47,11
Machico	JK7	72,94	56,97	52,75	54,16	46,18
	JK8	154,7	128,4	121,50	123,80	110,60
	JK12	65,14	46,47	41,53	43,18	33,84

Quadro 20 – Matriz de vulnerabilidades da diminuição da quantidade de água subterrânea: níveis piezométricos (versão completa no Anexo IV).

Ribeira	Furo	Atual	Médio prazo (2040-2069)		Longo prazo (2070-2099)	
		-	A2	B2	A2	B2
Sta. Luzia	JK20	0	-	-	-	-
João Gomes	JK18	0	-	-	-	-
	JK1	-	0	0	0	0
	JK2	-	0	0	0	0
	JK3	-	0	0	0	0
Socorridos	JK4	-	0	0	0	0
	JK5	-	0	0	0	0
	JK16	-	-1	-1	-1	-1
	JK25	-	-1	-1	-1	-1
	JK7	0	0	0	0	-1
Machico	JK8	0	0	0	0	0
	JK12	0	-1	-1	-1	-1

A médio e longo prazo, apenas os furos JK16 e JK25 da Ribeira dos Socorridos e JK12 da Ribeira de Machico apresentarão níveis estáticos mais próximos do fundo do furo. Mas ainda assim com colunas de água entre 25 a 50m relativamente à base dos furos. Dos furos referidos o JK16 da Ribeira dos Socorridos é o que terá menor diferença de cota, na ordem dos 31m.

Dos furos analisados para a vulnerabilidade atual, todos apresentam diferenças de cotas superiores a 50m.

A confiança atual, associada à vulnerabilidade apresentada no Quadro 20, foi considerada média uma vez que os níveis estáticos adotados correspondem a meses em que o volume extraído é muito reduzido, quase desprezável face aos restantes meses do ano.

Como referido anteriormente no Capítulo 2.2, a modelação realizada para avaliar a diminuição futura dos níveis piezométricos baseou-se apenas no valor do nível estático. Face à possibilidade de pouca representatividade desse valor relativamente à evolução, posterior à execução dos furos, do nível piezométrico em repouso a confiança é muito baixa.

3.3. Conclusão

Da análise da evolução dos níveis piezométricos, conclui-se que as disponibilidades de água subterrânea na zona litoral do aquífero de base ficarão diminuídas.

Verifica-se, de acordo com o Quadro 20, que a médio e longo prazo, apenas os furos JK16 e JK25 da Ribeira dos Socorridos e JK12 da Ribeira de Machico apresentarão um cenário negativo. No cenário B2 só a longo prazo se verificará a mesma classificação para o furo JK7 da Ribeira de Machico.

Em todos os outros furos, para todos os períodos, incluindo o atual e para todos os cenários climáticos, a classificação atribuída foi neutra.

O furo JK12 da Ribeira de Machico é o único furo, comprovado pela análise efetuada, que apresentará um agravamento da sua classificação atual de neutra para negativa a curto prazo, tal como se apresenta na Figura 7.

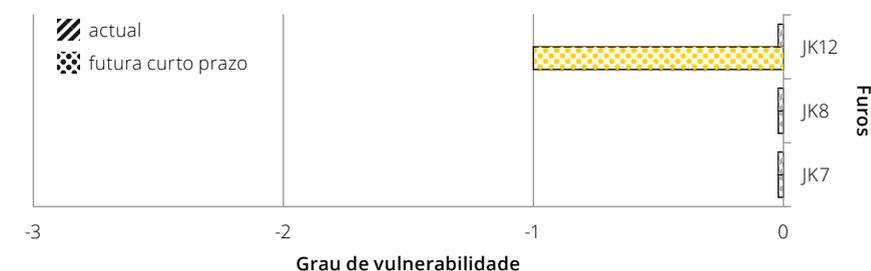


Figura 7 – Vulnerabilidade atual e futura a curto prazo dos níveis piezométricos.

Salienta-se, no entanto, estes resultados são relativos a valores de níveis piezométricos estáticos ou aproximadamente em repouso, ou seja, sem interferência da ação humana por captação de água dos furos. Qualquer exploração que conduza a diferenças de cotas entre o nível piezométrico e o fundo do furo menores do que 5m resultará numa suspensão da captação de água. Caso ocorra uma sobre-exploração, impedindo a recuperação natural das reservas de água nos aquíferos costeiros, a decorrente redução do nível significará a inutilização das captações nos furos comprometidos.

4. Avaliação da disponibilidade de água subterrânea: caudais de galerias, túneis e nascentes

4.1. Metodologia

Na Madeira, tal como noutros ambientes insulares vulcânicos, a captação da água subterrânea processa-se através de perfurações horizontais, as galerias e os túneis; de perfurações verticais de pequeno diâmetro, os furos; e do aproveitamento da descarga natural das nascentes.

O aproveitamento do caudal das nascentes faz-se através de um sistema de levadas que contornam a ilha numa extensão total superior a 1000km, recolhendo e conduzindo as águas drenadas pelas centenas de nascentes existentes, contrariando o seu curso normal para o mar.

As galerias, projetadas para captar recursos subterrâneos, são construídas em zonas elevadas da ilha (com a precaução de não passar sobre o nível freático), de modo a atravessar formações mais recentes e mais transmissivas, onde a qualidade da água é a melhor, possibilitando, ainda, que a água circule por gravidade. Penetram sub-horizontalmente no terreno (500m a 3000m), com declive suave para a boca, até cortarem o nível de saturação. Contudo, devido à existência, por vezes, de longos troços impermeáveis, a água nem sempre surge ao atravessar da superfície freática virtual mas ao intercalar o primeiro troço ou estrutura permeável (falhas), em conexão com o sistema hidráulico com o qual contacta.

Os túneis são, normalmente, perfurações sub-horizontais nos maciços, executados com o objetivo de fazer a ligação entre duas zonas de difícil acesso ou apenas de encurtar o percurso entre elas. Podem ser hidráulicos, rodoviários ou mistos, variando a sua dimensão de acordo com a função a que se destinam. A finalidade inicial da execução de um túnel não é a de captar recursos hídricos subterrâneos, até porque a maioria passa acima do nível freático. No entanto, quando acidentalmente intercalam formações ou acidentes tectónicos produtivos, esses recursos são aproveitados com algumas vantagens: A qualidade da água é superior

quando captada em altitude, do que captada nas zonas litorais do aquífero de base; Não há consumo de energia na sua captação, dado que esta drena por gravidade, ao contrário da captada nos furos; Em termos económicos, o mesmo investimento tem duas aplicações.

O registo contínuo dos caudais das galerias e túneis está a cargo da IGA. As coordenadas, o período de registo e a dimensão das amostras utilizadas apresentam-se no Quadro 21.

Quadro 21 – Coordenadas UTM das galerias (Prada et al., 2011), período e dimensão da amostra

Maciço	Galeria	Cota (m)	X	Y	Período de registo	N
Paul da Serra	Rabaçal	1020	301410,5	3626301,5	[Jun-10; Jun-14]	44
	Rabaças	1010	305603,0	3624252,4	[Jul-96; Ago-14]	39
	Fajã da Ama	630	308265,1	3628406,1	[Jun-10; Out-14]	42
	T. Encumeada	460	310240,2	3626950,3	[Jun-09; Set-14]	51
Areeiro/Santo da Serra	Túnel 4 - Tornos	600	320754,8	3618640,3	[Fev-06; Set-14]	99
	Porto Novo	1300	327097,8	3617991,2	[Abr-09; Set-14]	66
	Fontes Vermelhas	350	330568,1	3622928,9	[Jan-08; Set-14]	81
	Túnel do Norte	260	331038,0	330937,9	[Jan-08; Set-14]	81

A avaliação da diminuição da disponibilidade de água subterrânea por análise dos caudais das galerias, túneis e nascentes foi realizada de acordo com a metodologia descrita na Figura 8.

A análise da vulnerabilidade atual foi efetuada com recurso a métodos de modelação matemática e testes estatísticos não paramétricos, de acordo com uma metodologia semelhante à apresentada no capítulo 2.

Após transformar o conjunto de dados de caudais, em séries temporais de médias mensais, com recurso ao operador não paramétrico robusto *Lowess*, com os mesmos parâmetros enunciados no Quadro 2.

Para a definição da vulnerabilidade atual, foram analisadas a totalidade das séries temporais ou um intervalo de tempo representativo da atualidade, tendo sido a avaliação histórica da tendência dos caudais a referência para a classificação. A análise da vulnerabilidade atual só se realizou nas situações em que a tendência é significativa.

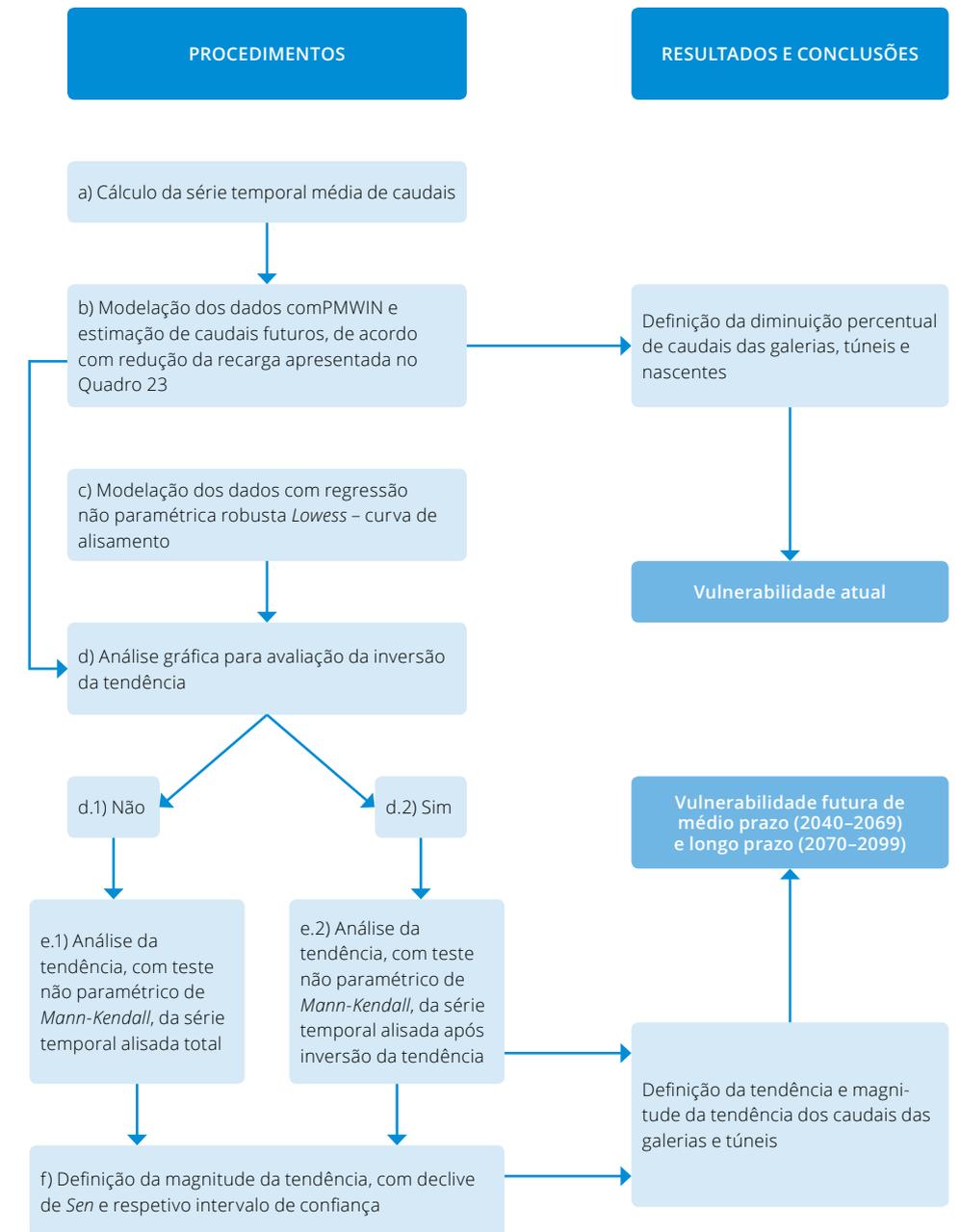


Figura 8 – Metodologia de avaliação da disponibilidade de água subterrânea: caudais de galerias, túneis e nascentes.

Após uma análise gráfica cuidada, quando verificada uma mudança brusca e acentuada da tendência, a avaliação foi realizada tendo em consideração o intervalo de tempo mais representativo da atualidade, ou seja, após a inversão de tendência. Quando a tendência se apresentava com sinal constante, a análise foi realizada para a totalidade dos valores das séries temporais. O estudo das tendências foi realizado novamente com recurso ao teste não paramétrico de *Mann-Kendall*, com os mesmos parâmetros apresentados no Quadro 5, e a magnitude com o estimador estatístico declive de Sen.

A definição da vulnerabilidade atual de cada galeria ou túnel foi efetuada tendo em conta o critério apresentado no Quadro 22.

Quadro 22 – Níveis de classificação da vulnerabilidade actual decorrente da variação da disponibilidade de água subterrânea: caudais de galerias e túneis

Classificação	Tendência dos caudais
-2 Muito negativo	Tendência (-) sem inversão e IC do declive de Sen com sinal constante
-1 Negativo	Tendência (-) sem inversão e IC do declive de Sen com sinal variável
0 Neutro	Inversão da tendência de (+) para (-) de (-) para (+) ou séries de dados muito curtas
1 Positivo	Tendência (+) sem inversão e IC do declive de Sen com sinal variável

O intervalo de confiança do declive de Sen influencia a classificação pois quando os seus extremos apresenta o mesmo sinal, é mais plausível que a tendência estimada apresente efetivamente o sinal enunciado.

Quando ocorre uma inversão da tendência, sendo a inversão recente, os efeitos são menos negativos/positivos quando comparados com uma continuidade de tendência num período mais alargado.

A vulnerabilidade futura foi efetuada com recurso a modelação do escoamento subterrâneo no Maciço do Paul da Serra, a cotas superiores a 600 m, utilizando o programa automático PMWIN 5.3, o qual incluiu o programa MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988).

O maciço central não foi possível modelar por falta de dados da descarga das nascentes.

O modelo numérico foi construído a 3D, utilizando-se uma malha com duas camadas, de células quadradas com dimensão máxima de 100 x 100 m, subdividida em células de 20 x 20 m nas zonas das galerias de captação de água subterrânea. O Maciço foi modelado como “aquífero suspenso”, i.e. como zona vadosa, permitindo que cada célula tivesse comportamento seco ou

saturada, consoante a variação do nível piezométrico. Para isso, a camada superior foi considerada como zona vadosa/aquífero suspenso, entre 1500 m e 600 m de altitude e a camada inferior como o nível saturado do maciço. O nível piezométrico para início da simulação foi considerado abaixo dos 600m de altitude. A simulação da zona vadosa foi realizada com o recurso ao módulo *Wetting Capability* do MODFLOW, utilizando-se o fator de humedecimento (*wetting factor*) de 0,5.

A simulação da drenagem do Maciço, através das galerias, túneis e nascentes foi realizada através do módulo *Drain* do MODFLOW, utilizando-se os parâmetros: condutância do dreno e cota das emergências ou das galerias. As entradas no sistema hidrogeológico simulado foram de 0,00414 m/dia no topo do Paul da Serra e de 0,0005 m/dia nas suas vertentes. As saídas do sistema foram definidas nas seguintes categorias: nascentes acima dos 1300m de altitude, nascentes aos 1000m de altitude e nascentes aos 800m de altitude, a galeria do Rabaçal aos 1020m, a galeria das Rabaças aos 2010m, o Túnel da levada do Seixal aos 835m e a galeria da Fajã da Ama aos 630m de altitude.

A calibração do modelo foi efetuada sobre a condutância das nascentes e galerias de modo a que os caudais simulados, em condições de regime permanente, fossem o mais próximo possível dos caudais drenados reais. Foi obtida uma boa calibração para todas as descargas abaixo dos 1300m de altitude.

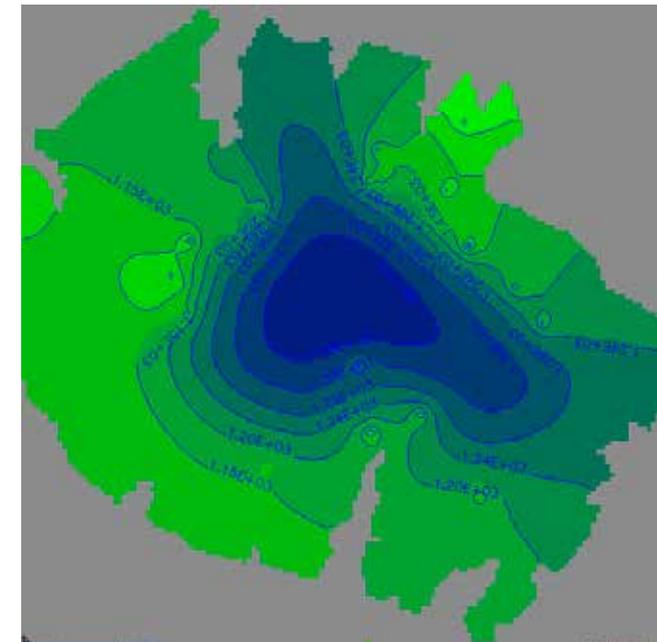


Figura 9 – Piezometria atual do maciço do Paul da Serra estimada por modelação.

A previsão da resposta das galerias, túneis e nascentes do Paul da Serra às alterações climáticas foi simulada, de acordo com os valores anuais médios estimados no âmbito do CLIMAAT II, para a diminuição da recarga no contexto dos vários cenários climáticos, apresentada no Quadro 23.

Quadro 23 – Valores anuais médios estimados para a redução da recarga (Santos e Aguiar, 2006)

	Médio prazo (2040-2069)		Longo prazo (2070-2099)	
	A2	B2	A2	B2
Redução da recarga [%]	31	29	46	39

A definição da vulnerabilidade futura de cada galeria, túnel e conjuntos de nascentes foi efetuada tendo em conta o critério apresentado no Quadro 24.

Quadro 24 – Critério de classificação da vulnerabilidade futura decorrente da redução dos caudais subterrâneos

Classificação	Redução dos caudais
-3 Crítico	≥ 50 %
-2 Muito negativo	[30; 50[%
-1 Negativo	[10; 30[%
0 Neutro	[-10 ; 10[%

4.2. Resultados e discussão

Avaliando as estatísticas descritivas apresentadas no Quadro 25, confirma-se, à semelhança do que já foi descrito no capítulo 3, o alisamento efetuado com o modelo de *Lowess* às séries de dados de caudais das galerias e furos. Confirma-se, em todos os casos, uma diminuição dos valores do desvio padrão com diferenças reduzidas nas médias entre o real e alisado, valores mínimos maiores e máximos menores dos dados alisados face aos reais.

Os gráficos das distribuições temporais dos caudais reais e alisados podem ser consultados no Anexo III.

Quadro 25 – Estatísticas descritivas da amostra de caudais e da amostra alisada pelo modelo *Lowess*, por galeria/túnel.

Galeria/Túnel	Amostra Q [l/s]				Amostra Q alisada [l/s] - Regressão não paramétrica <i>Lowess</i>			
	Mín.	Máx.	Média	S	Mín.	Máx.	Média	S
Rabaçal	62,08	73,67	66,65	2,97	64,47	70,10	66,74	1,92
Rabaças	84,20	116,16	105,52	6,85	102,60	112,03	106,20	2,19
Fajã da Ama	92,59	138,33	112,25	9,54	103,73	123,37	112,51	4,60
Encumeada	14,94	62,89	30,69	12,26	24,16	56,02	31,05	6,02
Túnel 4 - Tornos	206,65	390,11	295,11	36,47	240,39	325,34	294,54	20,86
Porto Novo	61,40	83,00	74,31	5,12	63,55	79,53	73,93	4,19
Fontes Vermelhas	51,40	76,00	65,28	7,45	48,01	71,43	64,61	6,33
Túnel do Norte	63,50	79,14	73,30	4,87	63,40	77,34	73,21	4,10

Em valores absolutos, pode ser verificado que no Túnel 4 – Tornos é obtido o maior valor médio de caudal e no Túnel da Encumeada o menor.

Todos os valores de tau são significantes ($p < 0,05$), sendo aceite a hipótese alternativa de que há tendência no tempo das séries de caudais em todas as galerias e túneis analisados, tal como apresentado no Quadro 26, com ou sem inversão clara da tendência.

Verificou-se uma tendência atual positiva apenas nas Rabaças, que iniciou-se a Janeiro de 2009. Essa situação deve-se ao facto de ter sido desviado um caudal excedente proveniente de nascentes para uma zona alta plana, permitindo uma recarga artificial.

A tendência passou de positiva para negativa na Fajã da Ama, Porto Novo, Fontes Vermelhas e Túnel do Norte em 2011/12. Nestas galerias/túneis é onde se verificam os maiores declives.

Os resultados da modelação mostram reduções significativas nos caudais drenados, quer pelas nascentes, quer pelas galerias. Na situação mais extrema de redução da recarga, em 46% do volume médio atual, o caudal das nascentes acima dos 1300m é drasticamente reduzido, podendo a maioria das nascentes secar, ficando, no entanto, favorecido o fluxo vertical descendente para zonas mais profundas. Como resultado, verifica-se um ligeiro aumento do nível piezométrico a cotas inferiores e conseqüente aumento dos caudais drenados por essas galerias, tal como se apresenta no Quadro 27 e no Quadro 28.

Quadro 26 – Resultados do teste não paramétrico de Mann-Kendall, por galeria/túnel.

Galeria/Túnel	Análise gráfica da inversão clara de tendência	Teste não paramétrico de Mann-Kendall e Declive de Sen (série total para t=0, após inversão da tendência para t≠0)			
		Teste da tendência		Magnitude da tendência	
		Tau	p-valor	Declive de Sen	Intervalo de confiança
Rabaçal	-	-0,641	<0,0001	-0,130	] -0,495 ; 0,143[
Rabaças	Jan-09	0,890	<0,0001	0,612	] -0,059 ; 1,509 [
Fajã da Ama	Jul-11	-0,802	<0,0001	-0,460	] -1,378 ; 0,314 [
Encumeada	-	27))-0,686	<0,0001	-0,295	] -1,477 ; 0,375 [
Túnel 4 - Tornos	-	-0,885	<0,0001	-0,611	] -1,916 ; 0,019 [
Porto Novo	Mar-12	-1,000	<0,0001	-0,282	] -0,340 ; -0,231 [
Fontes Vermelhas	Jun-11	-0,997	<0,0001	-0,162	] -0,213 ; -0,119 [
Túnel do Norte	Fev-12	-0,988	<0,0001	-0,072	] -0,097 ; -0,046 [

Quadro 27 – Resultados da modelação dos caudais subterrâneos do Paul da Serra

Galerias, túneis e nascentes	Caudal médio (m³/dia)	Caudal simulado (m³/dia)			
		Médio prazo (2040-2069)		Longo prazo (2070-2099)	
		A2	B2	A2	B2
Rabaças (1010m)	9100	6171	6378	4946	5123
Rabaçal (1020m)	5500	3181	3349	2255	2487
Nascentes (1000m)	43200	26678	27691	21192	21179
Túnel do Seixal (835m)	7776	5983	6106	5364	5289
Nascentes (800m)	34560	26964	27384	24743	24441
Fajã da Ama (630m)	9677	8175	8274	7756	7485

Quadro 28 – Percentagens de redução dos caudais subterrâneos do Paul da Serra de acordo com a redução da recarga

Galerias, túneis e nascentes	Percentagem de redução do caudal (%)			
	Médio prazo (2040-2069)		Longo prazo (2070-2099)	
	A2 (31%)	B2 (29%)	A2 (46%)	B2 (39%)
Rabaças (1010m)	32,2	29,9	45,6	43,7
Rabaçal (1020m)	42,2	39,1	59,0	54,8
Nascentes (1000m)	38,2	35,9	50,9	51,0
Túnel do Seixal (835m)	23,1	21,5	31,0	32,0
Nascentes (800m)	22,0	20,8	28,4	29,3
Fajã da Ama (630m)	15,5	14,5	19,9	22,7

Quadro 29 – Matriz de vulnerabilidades da diminuição da disponibilidade de água subterrânea: caudais de galerias, túneis e nascentes (versão completa no Anexo IV)

Maciço	Galerias/Túneis /Nascentes	Vulnerabilidade Atual	Vulnerabilidade Futura			
			Médio prazo (2040-2069)		Longo prazo (2070-2099)	
			A2	B2	A2	B2
Paul da Serra	Rabaças (1010m)	0	-2	-1	-2	-2
	Rabaçal (1020m)	0	-2	-2	-3	-3
	Nascentes (1000m)	0	-2	-2	-3	-3
	Túnel do Seixal (835m)	0	-1	-1	-2	-2
	Nascentes (800m)	0	-1	-1	-1	-1
	Fajã da Ama (630m)	0	-1	-1	-1	-1
	Túnel Encumeada	0	-	-	-	-
Areiro/Santo da Serra	Túnel 4 - Tornos	-1	-	-	-	-
	Porto Novo	0	-	-	-	-
	Fontes Vermelhas	0	-	-	-	-
	Túnel do Norte	0	-	-	-	-

4.3. Conclusão

A avaliação do impacto potencial da diminuição da disponibilidade de água subterrânea através da redução dos caudais das galerias, túneis e nascentes, permitiu concluir que atualmente apenas o Túnel 4 dos Tornos apresenta uma vulnerabilidade atual classificada com Negativo, dada a tendência sistemática de diminuição dos seus caudais. No entanto, devido à forma de contabilização do caudal captado neste túnel (é apenas medida a água fornecida para abastecimento e rega, sendo excluída a água descarregada para a ribeira), a confiança associada foi considerada baixa.

As galerias do Porto Novo, das Fontes Vermelhas e o Túnel do Norte apresentam-se atualmente num cenário neutro, uma vez que a tendência crescente observada no início da série se inverte nos últimos 2 a 3 anos. Verifica-se que a inversão é caracterizada por uma tendência de magnitude reduzida e acompanha a variação da precipitação nesses mesmos anos (decrecente). Considerou-se que o grau de confiança associado à avaliação da vulnerabilidade atual é alto pois a análise teve como base dados reais e análise estatística com resultados significantes.

A galeria das Rabaças exibe uma vulnerabilidade atual neutra, devido à alternância da tendência ora crescente, ora decrescente do caudal, sendo que a justificação para tal facto é o incremento de recarga que vem sendo aplicado à área plana sobre a galeria por intervenção da IGA, com o desvio do caudal excedente de dois cursos de água para aquela zona. O grau de confiança associado é alto.

O túnel da Encumeada e as galerias do Rabaçal e da Fajã da Ama, com 4 anos apenas de registos, revelam uma tendência atual decrescente, coincidente com a variação da precipitação, pelo que se considerou uma vulnerabilidade atual neutra. O grau de confiança, devido à dimensão da amostra é médio.

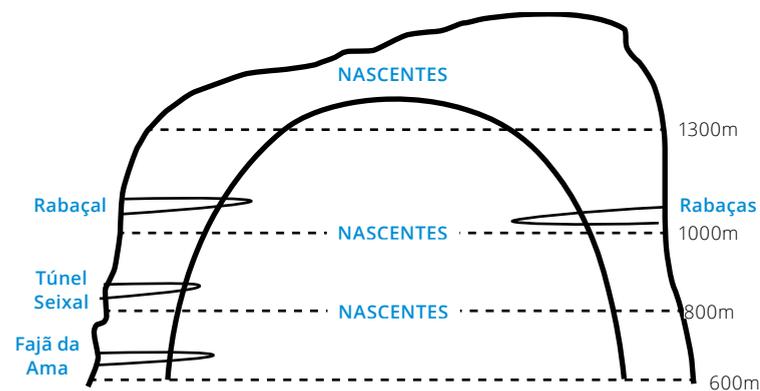


Figura 10 – Esquema simplificado do modelo hidrogeológico do Paul da Serra.

As galerias e grupos de nascentes situadas nas cotas mais elevadas do Paul da Serra, dos 1000m para cima, são as mais vulneráveis à redução da recarga, uma vez que à medida que o nível piezométrico baixa, começa por afetar primeiro os caudais das captações mais elevadas cuja situação se torna crítica no caso das nascentes acima da cota 1000m e na galeria do Rabaçal, como se verifica na Figura 10.

No que concerne à vulnerabilidade futura de médio e longo prazo, a confiança associada é média pois foi efetuada uma modelação matemática com um elevado grau de simplificação que poderá não refletir a elevada heterogeneidade do meio vulcânico.

Uma vez que na avaliação da recarga na ilha da Madeira não é considerado o contributo da precipitação oculta – a que resulta da interceção do nevoeiro pela vegetação (Figueira *et al.* 2013; Prada e Silva 2001; Prada *et al.* 2006, 2008, 2009, 2010a, 2010b, 2012, 2013, 2014) – a diminuição do caudal das nascentes, a médio e longo prazo, prevista pela modelação matemática, poderá estar sobreavaliada. Prada *et al.* (2015) demonstram que a água drenada por algumas nascentes é uma mistura de água do nevoeiro e de água da chuva. Desta forma, a precipitação oculta poderá compensar parte da redução da chuva prevista, levando à atenuação da diminuição dos caudais das nascentes. No entanto, o comportamento futuro da precipitação oculta, num cenário de alterações climáticas, é ainda muito incerto. Sperling *et al.* (2004), num estudo sobre o efeito das alterações climáticas na altitude do mar de nuvens das ilhas Canárias, refere uma diminuição da altitude deste, devido a uma diminuição da altitude da camada de inversão atmosférica associada a uma maior intensidade na circulação de ar no anticiclone dos Açores, que também influencia a Madeira. Esta diminuição poderia levar a uma menor frequência do nevoeiro nas zonas mais altas da ilha, o que implicaria, também, um impacto negativo nos caudais das nascentes. Estudos mais aprofundados sobre este tema poderão revelar-se muito úteis na confirmação das projeções atuais.

5. Avaliação das necessidades de água por uso

5.1. Metodologia

De acordo com o Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Arquipélago da Madeira (PGRH10) na Ilha Madeira a principal fonte de abastecimento de água é proveniente da água subterrânea ou predominantemente subterrânea (levadas), complementada, normalmente apenas no Inverno, com aproveitamento de parte do escoamento superficial de algumas ribeiras. No mesmo estudo foram enunciados os valores de necessidades registadas para período 2006-2012, tal como apresentado no Quadro 30.

Quadro 30 – Necessidades por tipo de uso (PGRH10, 2014).

Tipo de uso	Necessidades [hm ³]						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Agricultura e pecuária	54,54	54,05	44,14	44,02	44,20	43,45	42,06
Indústria ¹	1,90	1,86	1,70	1,56	1,61	1,60	1,49
Doméstico/residencial	41,64	37,83	32,97	33,15	33,40	36,02	37,09
Turismo ²	4,08	3,92	3,88	3,49	3,25	3,59	3,62
Outros usos urbanos	7,96	11,34	16,04	17,69	18,14	14,73	15,00
«Livre serviço» ³	0,53	0,53	0,30	0,31	0,30	0,25	0,29
Total	110,65	109,52	99,03	100,23	100,91	99,65	99,55

¹ Sistemas dedicados e urbanos de abastecimento público

² População flutuante (satisfeitas por sistemas urbanos) e de rega de campos de golfe

³ População não atendida por sistemas urbanos, satisfeita através de sistemas precários

Tendo em conta que o valor médio das necessidades hídricas *per capita*, baseado no Quadro 30 e em indicadores demográficos regionais (2014), por tipo de uso, no período histórico 2006-2012 constituiu-se como a referência para avaliar a vulnerabilidade atual e futura de curto prazo, os procedimentos metodológicos adotados apresentam-se na Figura 11.

Salienta-se que foi adotada uma análise do valor das necessidades por habitante uma vez que todos os usos são diretamente ou indiretamente influenciados pela população.

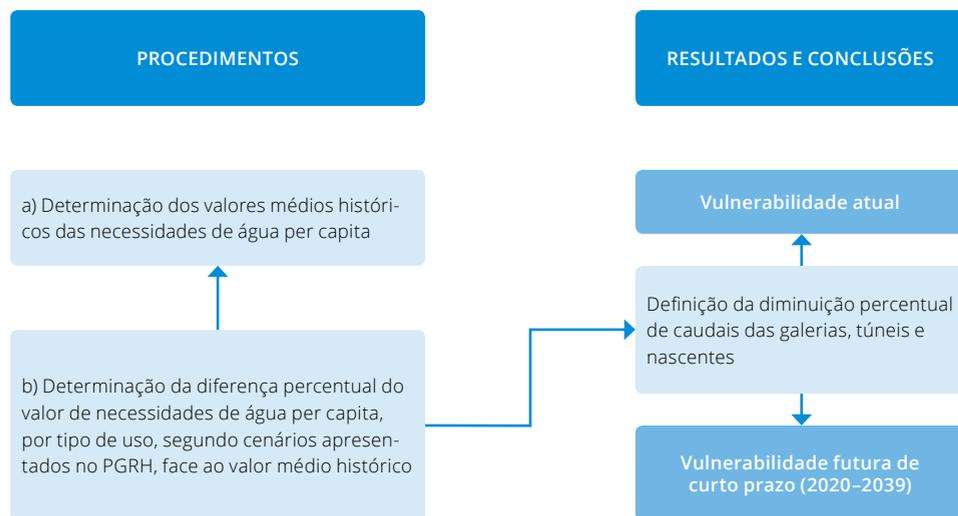


Figura 11 – Metodologia de avaliação da variação das necessidades de água por uso.

Após a determinação dos valores médios, foi efetuada a análise dos valores das necessidades por uso para os anos 2015, 2021 e 2027, estimadas segundo 3 cenários:

- i) Cenário base (B) referente à evolução dependente de um conjunto de indexantes, apresentados no Quadro 31;
- ii) Cenários alternativos (A e C) com variações de - 10% e + 10% face às necessidades de água apresentadas em B.

Quadro 31 – Indexantes por tipo de uso (PGRH10, 2014).

Tipo de Uso	Indexante
Agricultura e pecuária	VAB setor primário
Indústria	VAB setor secundário
Setor doméstico/residencial	População residente (hab)
Turismo – Pop. flutuante	População flutuante (hab.equivalentes/ano)
Turismo - Golfe	Consumo médio (l)
Usos urbanos - Total	População residente (hab)
«Livre Serviço»	População residente (hab)

Quadro 32 – Análise prospetiva das necessidades de água por tipo de uso (PGRH10, 2014).

Tipo de uso	Cenário	Necessidades [hm ³]			
		2009	2015	2021	2027
Agricultura e pecuária	A	44,02	37,61	38,32	39,32
	B	44,02	41,79	42,58	43,69
	C	44,02	45,97	46,84	48,06
Indústria ¹	A	1,56	1,32	1,34	1,38
	B	1,56	1,47	1,49	1,53
	C	1,56	1,62	1,64	1,68
Doméstico/residencial	A	33,15	33,06	31,83	30,37
	B	33,15	36,74	35,37	33,74
	C	33,15	40,41	38,91	37,12
Turismo ²	A	3,49	3,50	3,70	3,90
	B	3,49	3,89	4,11	4,33
	C	3,49	4,28	4,52	4,77

Tipo de uso	Cenário	Necessidades [hm ³]			
		2009	2015	2021	2027
Outros usos urbanos	A	17,69	13,07	12,26	11,30
	B	17,69	14,52	13,62	12,56
	C	17,69	15,98	14,98	13,82
«Livre serviço» ³	A	0,31	0,25	0,25	0,24
	B	0,31	0,28	0,28	0,27
	C	0,31	0,31	0,30	0,30
Total	A	100,23	88,82	87,70	86,52
	B	100,23	98,69	97,45	96,13
	C	100,23	108,56	107,19	105,74

¹ Sistemas dedicados e urbanos de abastecimento público

² População flutuante (satisfeitas por sistemas urbanos) e de rega de campos de golfe

³ População não atendida por sistemas urbanos, satisfeita através de sistemas precários

Os valores, apresentados no Quadro 32, foram igualmente convertidos em necessidades por habitante e a classificação da vulnerabilidade atual, baseada na estimativa de 2015, e futura de curto prazo, fundamentada nos resultados mais condicionantes (mais negativos) das estimativas de 2021 e 2027, foi efetuada tendo em conta a diferença percentual entre as estimativas e médias históricas, de acordo com o Quadro 33.

Quadro 33 – Níveis de classificação da vulnerabilidade atual e futura decorrente da variação das necessidades de água.

Classificação	ΔNecessidades
-3 Crítico	> 25 %
-2 Muito negativo	[5 ; 25[%
-1 Negativo	[1 ; 5[%
0 Neutro	] -1; 1[%
1 Positivo	< -1 %

Saliente-se que a situação atual avaliada pode agravar-se ainda que o valor futuro apresente uma diferença percentual negativa relativamente à média histórica. Assim, quando a classificação futura se mantém positiva ainda que se verifiquem variações das diferenças percentuais positivas, indicando um aumento das necessidades, a classificação da vulnerabilidade foi agravada um nível.

5.2. Resultados e discussão

Analisando os valores de necessidades registadas no PGRH10 para período 2006-2012, é na vertente Sul Este, que corresponde à zona mais urbanizada e industrializada do arquipélago, que se observam as maiores necessidades globais e, é maioritariamente ao consumo das populações e abastecimento agropecuário que os recursos hídricos destinam-se, tal como apresentado no Quadro 34.

Quadro 34 – Valor médio das necessidades per capita, por tipo de uso.

Tipo de uso	Período 2006-2012 [m ³ /hab.ano]	
	Valor médio	SD
Agricultura e pecuária	176,41	21,05
Indústria ¹	6,33	0,62
Doméstico/residencial	136,24	13,14
Turismo ²	13,96	1,18
Outros usos urbanos	54,40	13,33
«Livre serviço» ³	1,36	0,46
Total	388,70	21,40

¹ Sistemas dedicados e urbanos de abastecimento público

² População flutuante (satisfeitas por sistemas urbanos) e de rega de campos de golfe

³ População não atendida por sistemas urbanos, satisfeita através de sistemas precários

Como pode ser observado no Quadro 33 e Quadro 34, as necessidades totais de água médias anuais, no período de 2006-2012 foram de cerca de 388,70 m³/hab, valor que de acordo com as estimativas, segundo o cenário B, será mais reduzido até 2027, altura em que passaremos a registar 397,89 m³/hab. Nos cenários menos e mais favoráveis os valores estimados serão sempre inferiores e superiores ao valor médio histórico, respetivamente. Em todos os casos, de 2015 a 2027, prevê-se continuamente um aumento progressivo das necessidades totais com variações de -12,99 a -7,87% no cenário A, -3,33 a 2,36 no cenário B e 6,34 a 12,60% no cenário C.

Por tipo de uso, igualmente foi estimado para qualquer um dos cenários, que as necessidades aumentem no período de 2015-2027, exceto para uso doméstico/residencial e outros usos urbanos.

De acordo com a análise efetuada no PGRH (2014), o aumento das necessidades associadas ao uso turístico são justificadas pelo aumento esperado da respetiva oferta e procura e, no sector primário, principalmente no que se refere à agricultura pelo seu desenvolvimento aproximando-se mais do tempo em que foi uma das principais atividades económicas regionais. A indústria ainda que mantendo valores de consumo residuais face ao total, registará um aumento relativo considerável, só superior ao valor médio histórico em 2025 no cenário mais gravoso. O livre serviço para além de continuar a apresentar valores muito reduzidos, face ao valor total, registará aumentos pouco expressivos no período de 2015 a 2027.

No sector doméstico/residencial, as diminuições estimadas são decorrentes da redução do indexante, população residente na RAM. Os outros usos urbanos, nomeadamente com os setores terciários como o comércio e serviços, apresentam tendências de diminuição das pressões sobre os sistemas urbanos compatíveis com o decréscimo das atividades.

Quadro 35 – Valor médio estimado das necessidades per capita, por uso, e correspondente variação percentual face ao valor médio histórico.

		Vulnerabilidade atual		Vulnerabilidade futura de curto prazo (2020-2039)			
Tipo de uso	Cenário	2015		2021		2027	
		Nec. [m³/hab]	ΔNec. [%]	Nec. [m³/hab]	ΔNec. [%]	Nec. [m³/hab]	ΔNec. [%]
Agricultura e pecuária	A	143,20	-18,82	151,43	-14,16	162,75	-7,74
	B	159,12	-9,80	168,26	-4,62	180,84	2,51
	C	175,04	-0,78	185,10	4,93	198,92	12,76
Indústria ¹	A	5,03	-20,63	5,30	-16,38	5,71	-9,80
	B	5,60	-11,61	5,89	-7,02	6,33	0,01
	C	6,17	-2,59	6,48	2,35	6,95	9,81
Doméstico/residencial	A	125,88	-7,60	125,78	-7,68	125,70	-7,73
	B	139,89	2,68	139,77	2,59	139,65	2,51
	C	153,87	12,94	153,76	12,86	153,64	12,77

		Vulnerabilidade atual		Vulnerabilidade futura de curto prazo (2020-2039)			
Tipo de uso	Cenário	2015		2021		2027	
		Nec. [m³/hab]	ΔNec. [%]	Nec. [m³/hab]	ΔNec. [%]	Nec. [m³/hab]	ΔNec. [%]
Turismo ²	A	13,33	-4,52	14,62	4,76	16,14	15,66
	B	14,81	6,12	16,24	16,36	17,92	28,41
	C	16,30	16,76	17,86	27,97	19,74	41,46
Outros usos urbanos	A	49,77	-8,52	48,45	-10,95	46,77	-14,03
	B	55,29	1,63	53,82	-1,07	51,99	-4,44
	C	60,85	11,85	59,20	8,81	57,20	5,15
«Livre serviços» ³	A	0,95	-29,89	0,99	-27,23	0,99	-26,83
	B	1,07	-21,47	1,11	-18,50	1,12	-17,69
	C	1,18	-13,06	1,19	-12,68	1,24	-8,54
Total	A	338,19	-12,99	346,56	-10,84	358,11	-7,87
	B	375,77	-3,33	385,09	-0,93	397,89	2,36
	C	413,35	6,34	423,58	8,97	437,67	12,60

¹ Sistemas dedicados e urbanos de abastecimento público

² População flutuante (satisfeitas por sistemas urbanos) e de rega de campos de golfe

³ População não atendida por sistemas urbanos, satisfeita através de sistemas precários

Na avaliação do impacto efetuada e definição correspondente da classificação da vulnerabilidade atual e futura, apresentada no Quadro 36, considerou-se que a confiança é alta e baixa, respetivamente.

Como referido anteriormente a avaliação baseou-se em indicadores sócio-económicos, pelo que a confiança futura dos resultados é baixa pois não considera a afetação das alterações climáticas futuras expectáveis. Os resultados obtidos para o ano de 2015 que caracterizam a atualidade, podem ser considerados representativos das necessidades reais sendo a confiança alta.

Quadro 36 – Matriz de vulnerabilidades do aumento das necessidades de água, por uso (versão completa no Anexo IV).

Tipo de uso	Cenário	Vulnerabilidade actual	Vulnerabilidade futura de curto prazo (2020-2039)
Agricultura e pecuária	A	1	0
	B	1	-1
	C	0	-2
Indústria ¹	A	1	0
	B	1	0
	C	1	-2
Doméstico/residencial	A	1	1
	B	-1	-1
	C	-2	-2
Turismo ²	A	1	-2
	B	-2	-3
	C	-2	-3
Outros usos urbanos	A	1	1
	B	-1	1
	C	-2	-2
«Livre serviço» ³	A	1	0
	B	1	0
	C	1	0
Total	A	1	0
	B	1	-1
	C	-2	-2

¹ Sistemas dedicados e urbanos de abastecimento público² População flutuante (satisfeitas por sistemas urbanos) e de rega de campos de golfe³ População não atendida por sistemas urbanos, satisfeita através de sistemas precários

5.3. Conclusões

De acordo com o Quadro 36 verifica-se que o uso doméstico/residencial, outros usos urbanos e turismo apresentam classificações atuais negativas nos cenários B e C. No cenário otimista e em todos os outros tipos de atividades e usos foram classificados positivamente (exceto o cenário C da agricultura e pecuária com neutro), evidenciando uma diminuição do consumo face ao valor médio para o período 2006-2012.

Excetuando o uso doméstico/residencial e outros usos urbanos onde se perspetiva uma diminuição das necessidades hídricas, em todos os usos e em todos os cenários ou se manteve uma classificação negativa, ou ocorreu um agravamento da classificação.

Salienta-se o caso da agricultura e pecuária que nos cenários B e C passa de uma classificação positiva e neutra para negativa e muito negativa, respetivamente, demonstrando o agravamento acentuado a curto prazo das necessidades de água.

O turismo é o único sector que apresenta classificações futuras críticas nos cenários B e C, evidenciando que de uma situação atual já muito negativa em termos de consumo face ao passado pode-se ainda, a curto prazo, verificar um aumento.

Apresenta-se de seguida, na Figura 12, a vulnerabilidade atual e curto prazo do aumento das necessidades de água por uso, segundo o cenário prospetivo base, B.

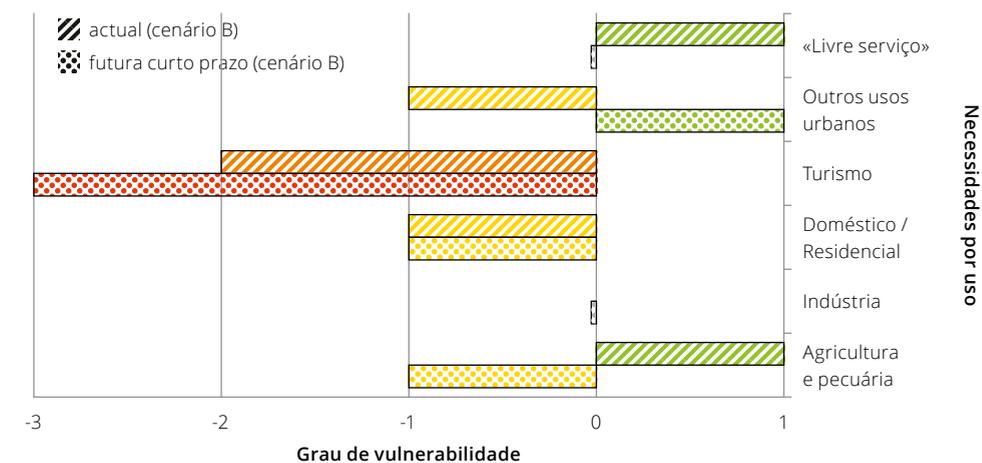


Figura 12 – Vulnerabilidade atual e futura a curto prazo das necessidades de água por uso.

Evidencia-se que esta avaliação não analisa a influência das alterações climáticas nas variações das necessidades de água. A curto prazo (2020-2039), o aumento da temperatura média anual na Madeira em 0,5 a 0,9°C e a diminuição da precipitação anual média em 9 a 28%, originará um aumento das necessidades em todos os sectores para compensar as maiores exigências associadas ao calor e as carências de água decorrentes da diminuição da pluviosidade.

No caso do uso doméstico/residencial e outros usos urbanos a diminuição das necessidades verificadas só é justificada pelo facto das variações dos indexantes serem mais condicionantes na sua diminuição relativamente aos efeitos climáticos sentidos e efeitos decorrentes no consumo.

Conclui-se ainda que o impacto na diminuição das disponibilidades hídricas é afetado sob duas vias pelas alterações climáticas. A dupla influência verifica-se pela diminuição do excedente subdividido em recarga e escoamento superficial e pelo aumento das necessidades de consumo da população, nos diversos usos, provocado pelo aumento de temperatura e redução de água das chuvas.

Referências bibliográficas

- › Bodo, B. A. (1989). Robust graphical methods for diagnosing trend in irregularly spaced water quality time series. *Environmental Monitoring and Assessment*, 12, 407–428.
- › Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368), 829–836.
- › Field, A. 2005. *Discovering statistics using SPSS*. London: SAGE Publications.
- › Figueira, C., Menezes de Sequeira, M., Vasconcelos, R., Prada, S. 2013. Cloud water interception in the temperate laurel forest of Madeira Island. *Hydrological Sciences Journal* 58(1):152-161
- › Franzblau, A. N. 1958. *A primer of statistics for non-statisticians*: Harcourt, Brace.
- › Ghyben, W. B. 1889. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. *The Hague, Netherlands, Tijdschrift van Het Koninklijk Instituut van Ingenieurs*: 8-22.
- › Helsel, D. R., Hirsch, R. M. 2002. Statistical methods in water resources. *Techniques of Water Resources Investigations Book 4, Hydrologic Analysis and Interpretation, chapter A3*, edited. : U.S. Geological Survey.
- › Herzberg, A. 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *Wasserversorgung* 44: 815-844.
- › Hipel, K. W., McLeod, A. D. 1994. *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- › Kahya, E., Kalayci, S. 2004. Trend analysis of streamflow in Turkey. *Journal of Hydrology* 289: 128-144.
- › Kendall, M. G. 1975. *Rank Correlation Methods*: Charles Griffin.

- › Lazaro, R., Rodrigo, F.S., Gutierrez, L., Domingo, F., Puigdefabregas, J. 2001. Analysis of a 30-year rainfall record (1967-1997) in semi-arid SE Spain for implications on vegetation. *Journal of Arid Environment* 48: 373-395.
- › Libiseller, C., Grimvall, A. 2002. Performance of partial Mann-Kendall test for trend detection in the presence of covariates. *Environmetrics* 13: 71-84.
- › Lombarinhas, D., Gomes, R., Lima, A., Ferreira da Silva, J. 2011. Determinação da interface água doce/água salgada no litoral de Viana do Castelo (NW de Portugal) com recurso ao método da resistividade eléctrica. Comunicação apresentada no VI Congresso do Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Ilha da Boa Vista, Cabo Verde.
- › Maliva, R., Missimer, T. 2012. Arid Lands Water Evaluation and Management. *Environmental Science and Engineering*.
- › Mann, H. B. 1945. Non-parametric test against trend. *Econometrica* 13: 245-259.
- › Martonne, E. 1926. Aréisme et indice aridité. *Comptes Rendus de L'Acad Sci* 182: 1395-1398.
- › McDonald, MG & Harbaugh, AW (1988). MODFLOW, A modular three dimensional finite difference ground-water flow model. US Geological Survey, Open-file report 83-875, chapter A1.
- › McLeod, A. L., Hipel, K. W., Bodo, B. A. 1991. Trend analysis methodology for water quality time series. *Environmetrics* 2(2): 169-200.
- › Mirza, M. Q., Warrick, R. A., Ericksen, N. J., Kenny, G. J. 1998. Trends and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna river basins. *Hydrologic Sciences* 43: 845-858.
- › Önöz, B., Bayazit, M. 2003. The power of statistical tests for trend detection. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 27: 247-251.
- › Pettitt, A. N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28(2): 126-135.
- › Nemus/Hidromod. 2014. Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Arquipélago da Madeira (RH10). Funchal, Consórcio NEMUS-HIDROMOD.
- › Portela, M. M., Quintela, A. C., Santos, J. F., Vaz, C., Martins, C. 2011. Tendências em séries temporais de variáveis hidrológicas. *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos* 32(1): 43-60.
- › Prada, S., Cruz, J. V., Silva, M. O., Figueira, C. 2010a. Contribution of cloud water to the groundwater recharge in Madeira Island: preliminary isotopic data. *Proceedings of the Fifth International Conference on Fog, Fog Collection and Dew*, Münster, Germany.

- › Prada, S., Cruz, J.V., Figueira, C. (2015) Using stable isotopes to infer the sources of groundwater recharge in a volcanic island - Madeira Island, Portugal - Part I: Perched water bodies (submitted article).
- › Prada, S., Figueira C., Menezes de Sequeira, M., Pontes A., Silva, M.O. 2008. Importância da Água do Nevoeiro para os Recursos Hídricos da Ilha da Madeira. In: "*Documentos Técnicos e Divulgativos, DVD do Guia da Água na Macaronésia Europeia*". AQUAMAC. Suarez, B.P., Rodríguez, G.M., Peña, L.M., Marfil, M.A., González, J.F. (Coord.). Edição do Instituto Tecnológico de Canárias, S.A.
- › Prada, S., Figueira, C., Aguiar, N., Cruz, J.V. 2014. Stable isotopes in rain and cloud water in Madeira – contribution for the hydrogeologic framework of a volcanic island. *Environmental Earth Sciences* DOI: 10.1007/s12665-014-3270-1
- › Prada, S., Gaspar, M. A., Silva, M. O., Cruz, J. V., Portela, M. M., Hora, G. R. 2003. Recursos Hídricos da Ilha da Madeira. *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro* Tomo 90: 125-142.
- › Prada, S., Menezes de Sequeira, M., Figueira, C., Prior, V., Silva, M. O. 2010b. Response to "Comment on fog precipitation and rainfall interception in the natural forests of Madeira Island (Portugal)". *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1154-1157
- › Prada, S., Menezes de Sequeira, M., Figueira, C., Silva, M. O. 2009. Fog precipitation and rainfall interception in the natural forests of Madeira Island (Portugal). *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1179-1187
- › Prada, S., Menezes de Sequeira, M., Figueira, C., Vasconcelos, R. 2013. Reply to comment on Prada et al. 2012. 'Cloud water interception in the high altitude tree heath forest (*Erica arborea* L.) of Paul da Serra massif (Madeira island). *Hydrological Processes* 26:202-212. *Hydrological Processes* 27:1518-152
- › Prada, S., Menezes de Sequeira, M., Figueira, C., Vasconcelos, R. 2012. Cloud water interception in the high altitude tree heath forest (*Erica arborea* L.) of Paul da Serra Massif (Madeira, Portugal). *Hydrological Processes* 26: 202-212
- › Prada, S., Silva, M. O., Cruz, J. V. 2005. Groundwater behaviour in Madeira, volcanic island (Portugal). *Hydrogeology Journal* 13(5): 800-812.
- › Prada, S., Silva, M., Figueira, C., Sequeira, M., Gaspar, A., Cruz, J.V., 2006. Impactos das Alterações Climáticas sobre os Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira – Medidas de Adaptação. *Livro de Resumos de comunicações e lista de posters do V Congresso Ibérico de Gestão e Planeamento da Água*, Faro, edição da Fundação Nova Cultura da Água e Universidade do Algarve.
- › Prada, S., Silva, M.O. 2001. Fog precipitation on the island of Madeira (Portugal). *Environmental Geology* 41:384-389

- › Prada, S., Mendonça, J., Silva, M. 2011. Delimitação dos Perímetros de Protecção das Galerias de Captação de Água da Ilha da Madeira. Relatório técnico elaborado pela Universidade da Madeira para a Investimentos e Gestão da Água S.A., 82 pág., Junho de 2011.
- › Ranjan, P., S. Kazama, et al. 2006. Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources. *Global Environmental Change* 16(4): 388-399.
- › Rybski, D. and J. Neumann 2011. A Review on the Pettitt Test Pettitt-test. *In Extremis*, edited by J. Kropp and H.-J. Schellnhuber, 202-213: Springer Berlin Heidelberg.
- › Santos, F. D., Aguiar, R. (Eds.) 2006. Impactos e medidas de adaptação às alterações climáticas no Arquipélago da Madeira – Projecto CLIMAAT II. Direcção Regional do Ambiente da Madeira, Funchal
- › Sen, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of American Statistics Association* 63: 1379-1389.
- › Spearman, C. 1910. Correlation calculated with faulty data. *British Journal of Psychology* 3: 271-295.
- › Sperling, F. N., Washington, R. and Whittaker, R., 2004. Future climate change of the subtropical North Atlantic: implications for the cloud forests of Tenerife. *Climatic Change*, 65 (1-2), 103-123.

Anexos

Anexo I – Gráficos das séries temporais de concentração de cloretos nos furos (valores reais e regressão de alisamento Lowess)

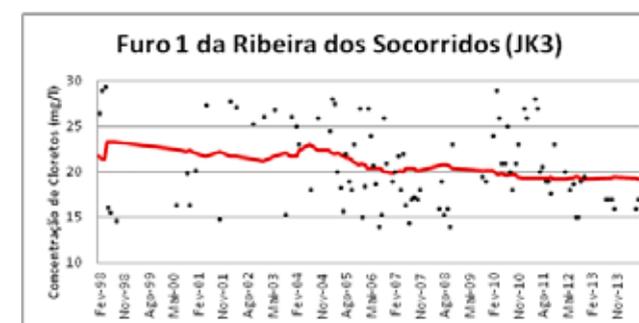


Figura 13 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 1 da Ribeira dos Socorridos (JK3).

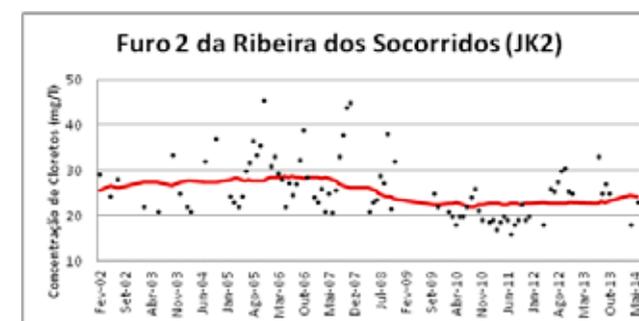


Figura 14 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 2 da Ribeira dos Socorridos (JK2).

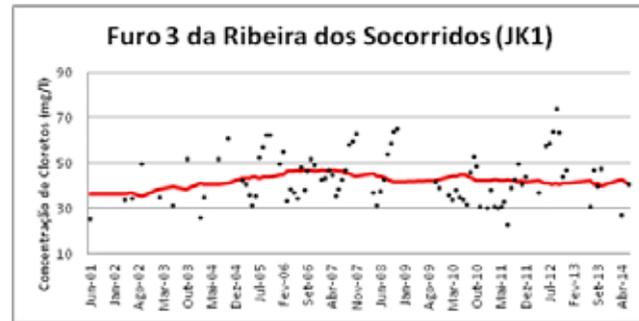


Figura 15 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 3 da Ribeira dos Socorridos (JK1).

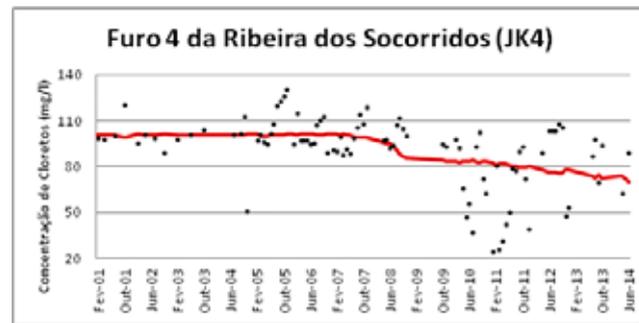


Figura 16 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 4 da Ribeira dos Socorridos (JK4).

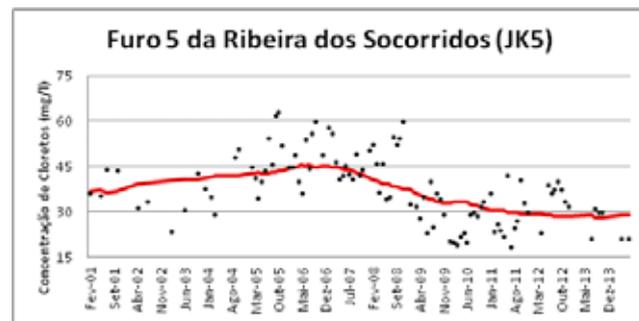


Figura 17 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 5 da Ribeira dos Socorridos (JK5).

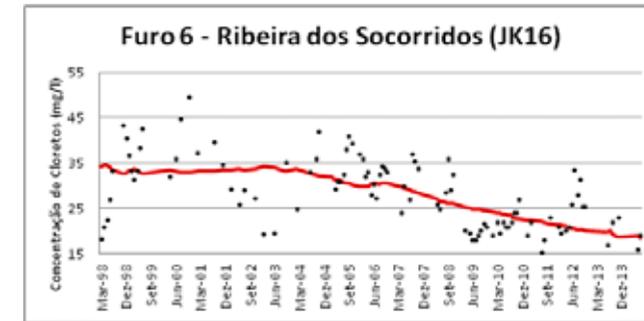


Figura 18 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 6 da Ribeira dos Socorridos (JK16).

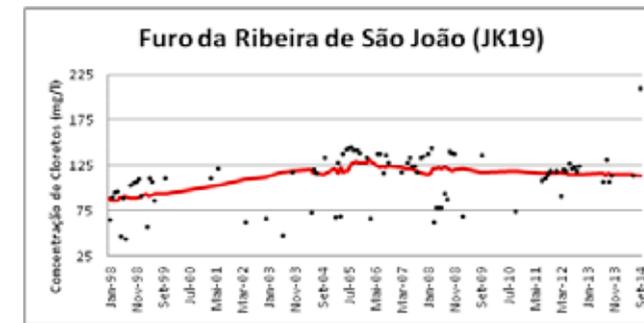


Figura 19 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo da Ribeira de São João (JK19).

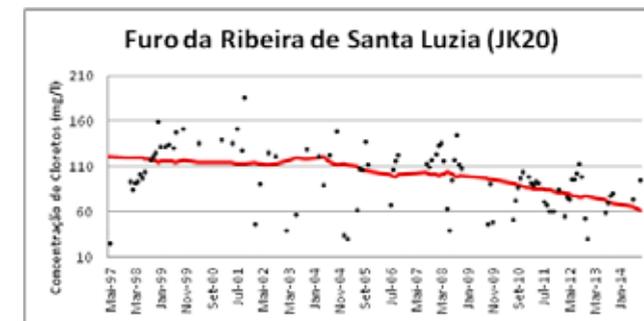


Figura 20 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20).

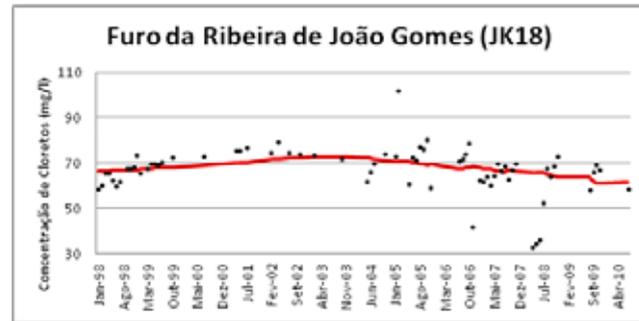


Figura 21 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo da Ribeira de João Gomes (JK18).

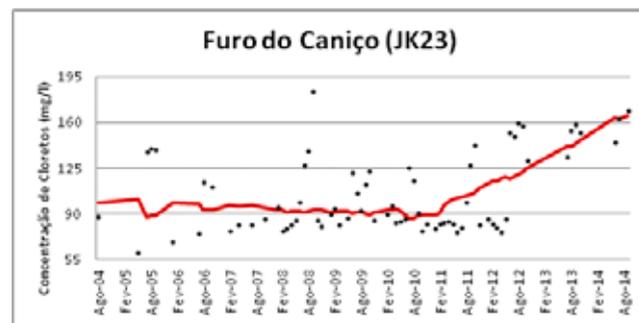


Figura 22 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo do Caniço (JK23).

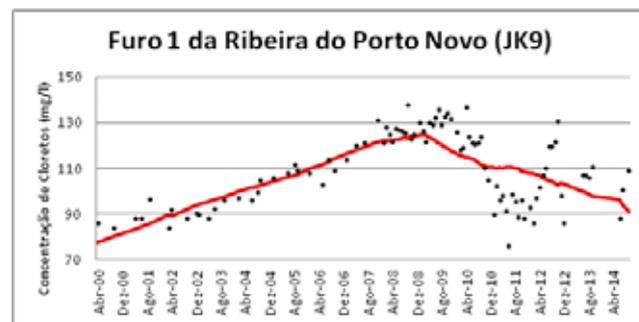


Figura 23 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 1 da Ribeira do Porto Novo (JK9).

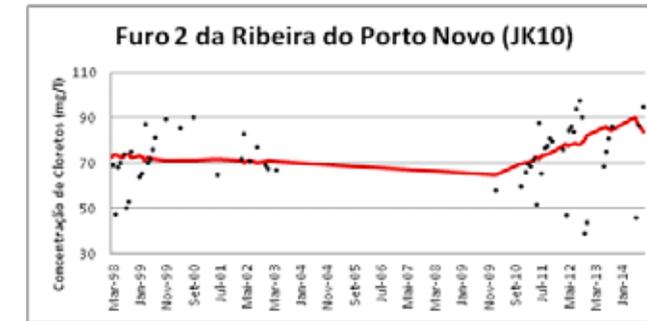


Figura 24 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 2 da Ribeira do Porto Novo (JK10).

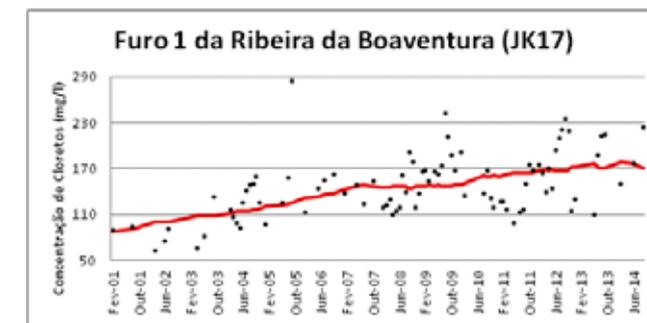


Figura 25 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 1 da Ribeira da Boaventura (JK17).

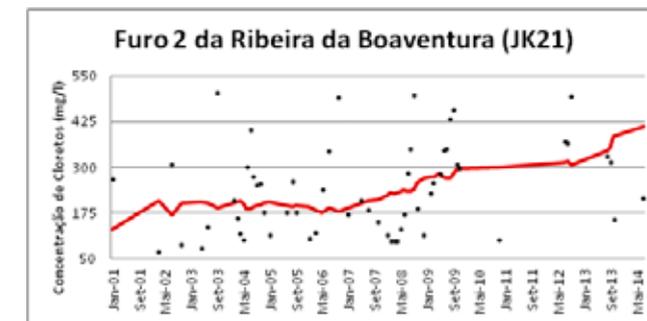


Figura 26 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 2 da Ribeira da Boaventura (JK21).

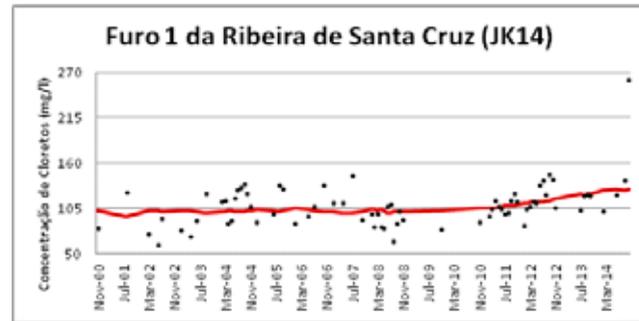


Figura 27 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 1 da Ribeira de Santa Cruz (JK14).

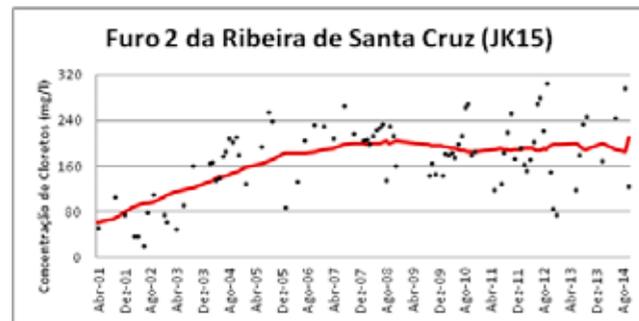


Figura 28 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 2 da Ribeira de Santa Cruz (JK15).

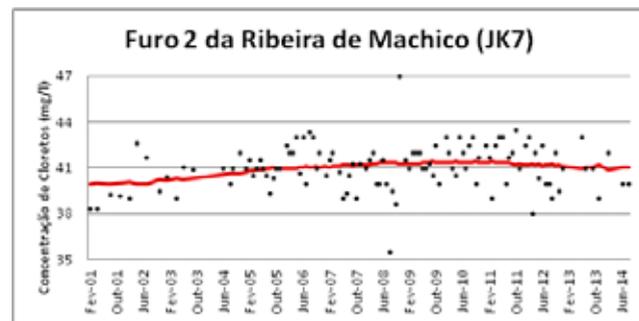


Figura 29 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 2 da Ribeira de Machico (JK7).

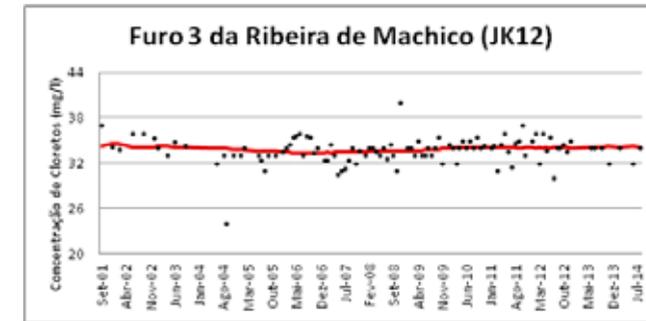


Figura 30 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 3 da Ribeira de Machico (JK12).

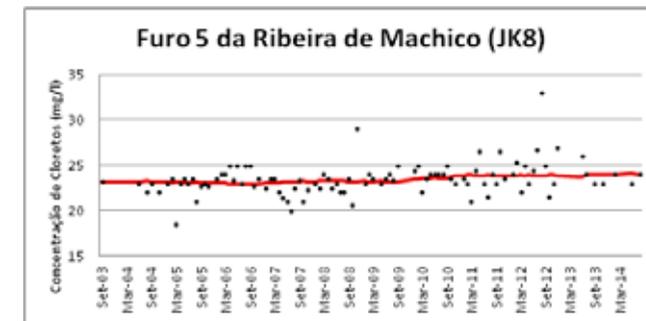


Figura 31 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 5 da Ribeira de Machico (JK8).

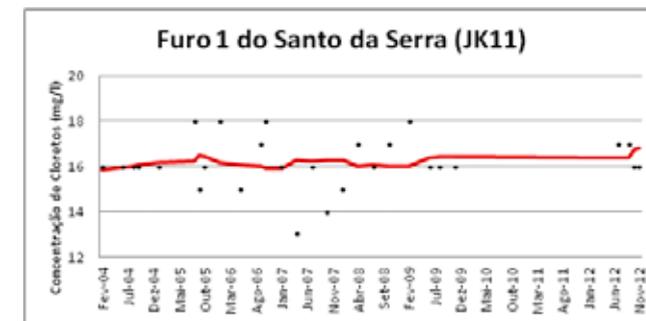


Figura 32 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 1 do Santo da Serra (JK11).

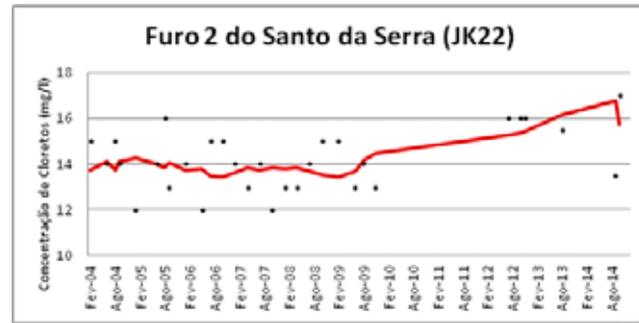


Figura 33 – Série temporal de concentração de cloretos e regressão de alisamento Lowess - Furo 2 do Santo da Serra (JK22).

Anexo II – Gráficos das séries temporais de volumes extraídos nos furos (valores reais e regressão de alisamento Lowess)

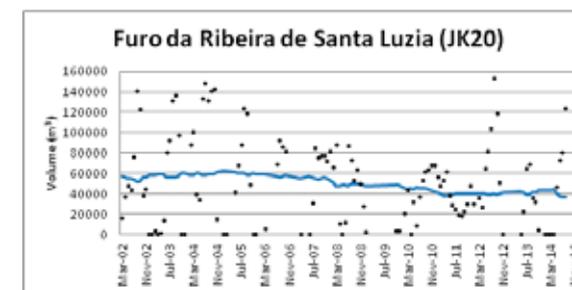


Figura 34 – Série temporal do volume extraído e regressão de alisamento Lowess - Furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20).

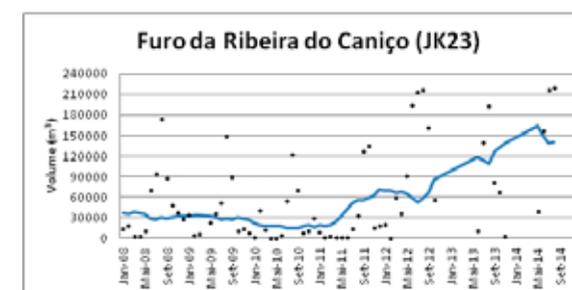


Figura 35 – Série temporal do volume extraído e regressão de alisamento Lowess - Furo da Ribeira do Caniço (JK23).

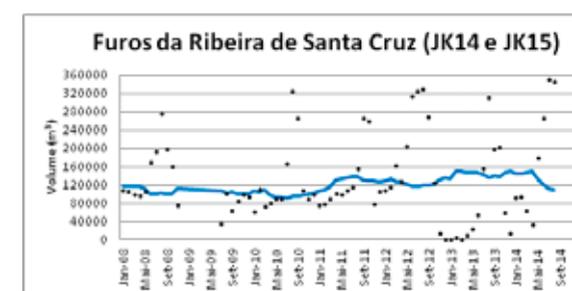


Figura 36 – Série temporal do volume extraído e regressão de alisamento Lowess - Furo da Ribeira de Santa Cruz (JK14 e JK15).

Anexo III – Gráficos das séries temporais de caudais das galerias e túneis (valores reais e regressão de alisamento Lowess)

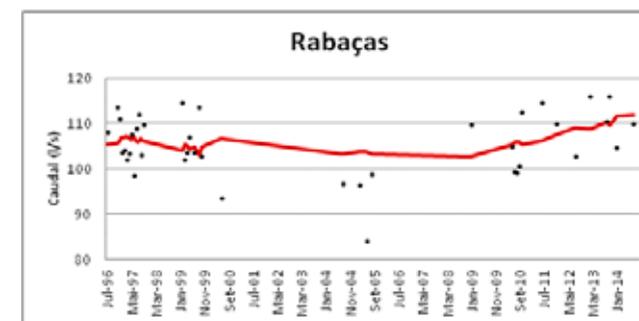


Figura 37 – Série temporal do caudal da Galeria das Rabaças e respetiva regressão de alisamento de Lowess.

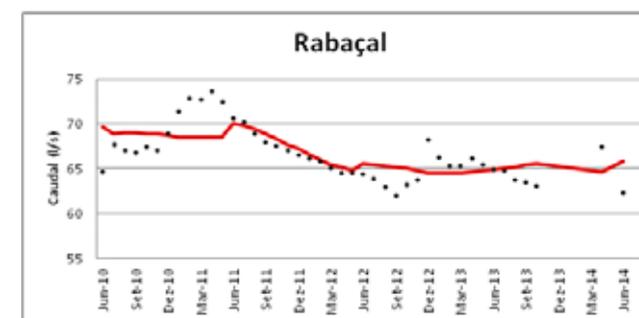


Figura 38 – Série temporal do caudal da Galeria do Rabaçal e respetiva regressão de alisamento de Lowess.

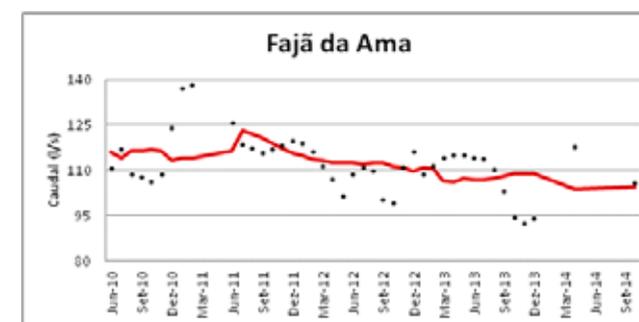


Figura 39 – Série temporal do caudal da Galeria da Fajã da Ama e respetiva regressão de alisamento de Lowess.

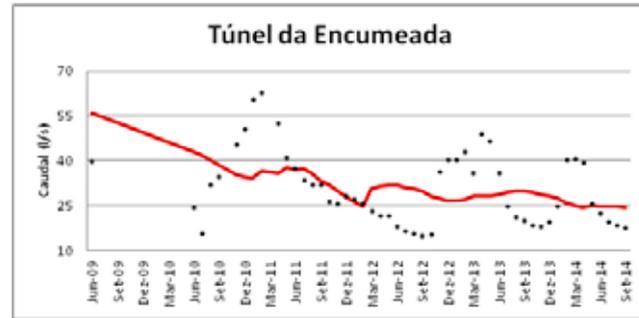


Figura 40 – Série temporal do caudal do Túnel da Encumeada e respetiva regressão de alisamento de Lowess.

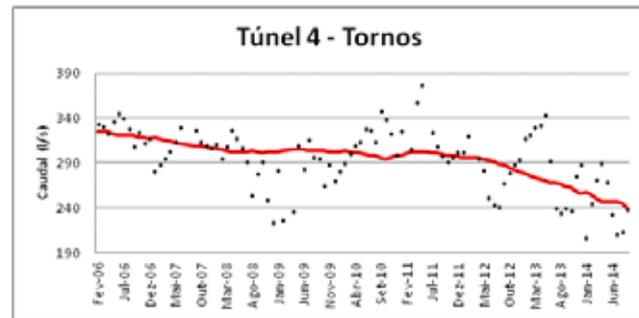


Figura 41 – Série temporal do caudal do Túnel 4 - Tornos e respetiva regressão de alisamento de Lowess.

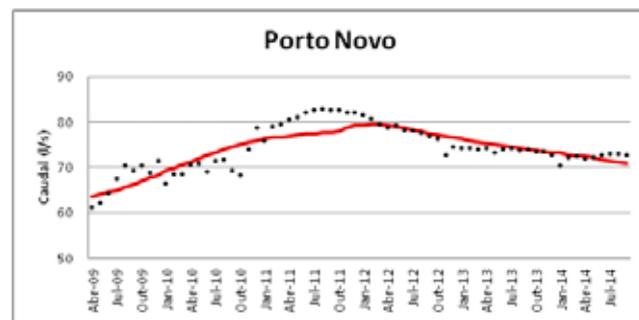


Figura 42 – Série temporal do caudal da Galeria do Porto Novo e respetiva regressão de alisamento de Lowess.

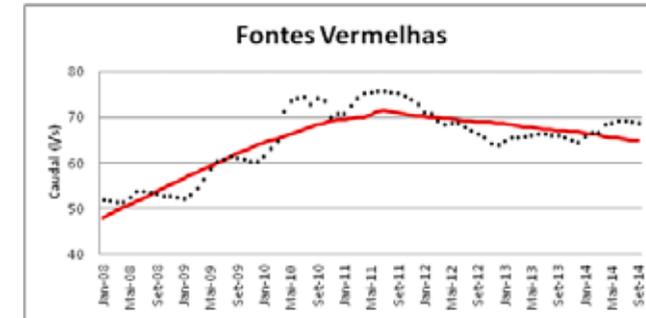


Figura 43 – Série temporal do caudal da Galeria das Fontes Vermelhas e respetiva regressão de alisamento de Lowess.

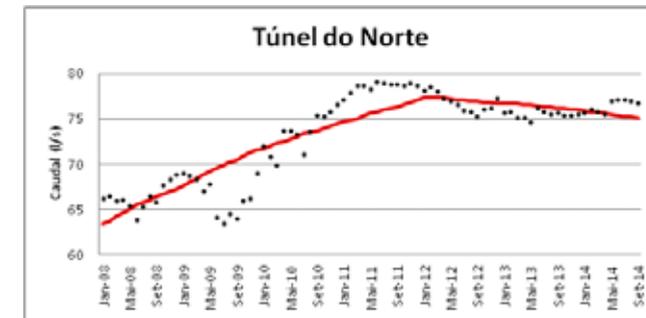


Figura 44 – Série temporal do caudal do Túnel do Norte e respetiva regressão de alisamento de Lowess.

Anexo IV – Matrizes de Vulnerabilidades

Impactos identificados	Exposição	Sensibilidade	Capacidade adaptativa		Vulnerabilidade atual	Confiança atual	Vulnerabilidade futura				Confiança futura	
							Curto (2020-2039)	Médio (2040-2069)		Longo (2070-2099)		
								RCP8.5	RCP6.0	RCP8.5		RCP6.0
Qualidade da água subterrânea: salinização dos aquíferos	Precipitação; Temperatura; Precipitação oculta; Nivel médio do mar.	Extensão da costa; Permeabilidade; Uso e ocupação do solo; Declive; Coberto vegetal.	Gestão da extração da água nos furos; Otimização das redes de distribuição; Reflorestação; Dessalinização na ilha do Porto Santo; Recarga artificial nas Rabatças; Seccionamento da rede em baixa e monitorização de caudais com contadores distribuídos; Incentivos para manter a agricultura em poios; Capacidade de armazenamento de água; Rede de água residual tratada na cidade do Funchal.	Furo da Ribeira de São João (JK19)	-1	Muito Alta	-1	-	-	-	-	Baixa
				Furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20)	-1		0	-	-	-	-	
				Furo da Ribeira de João Gomes (JK18)	-1		-1	-	-	-	-	
				Furo 1 da Ribeira dos Socorridos (JK3)	0		0	-3	-2	-3	-3	
				Furo 2 da Ribeira dos Socorridos (JK2)	0		0	-3	-3	-3	-3	
				Furo 3 da Ribeira dos Socorridos (JK1)	0		0	-3	-2	-3	-3	
				Furo 4 da Ribeira dos Socorridos (JK4)	0		0	-2	-1	-2	-1	
				Furo 5 da Ribeira dos Socorridos (JK5)	0		0	-3	-2	-3	-3	
				Furo 6 da Ribeira dos Socorridos (JK16)	0		0	-2	-2	-3	-2	
				Furo 2 da Ribeira de Machico (JK7)	0		0	-2	-3	-3	-3	
				Furo 3 da Ribeira de Machico (JK12)	0		0	-1	-3	-3	-3	
				Furo 5 da Ribeira de Machico (JK8)	0		0	0	0	0	0	
				Furo da Ribeira do Caniço (JK23)	-1		-2	-	-	-	-	
				Furo 1 da Ribeira do Porto Novo (JK9)	-1		0	-	-	-	-	
				Furo 2 da Ribeira do Porto Novo (JK10)	-1		-2	-	-	-	-	
				Furo 1 da Ribeira da Boaventura (JK17)	-2		-3	-	-	-	-	
				Furo 2 da Ribeira da Boaventura (JK21)	-3		-3	-	-	-	-	
				Furo 1 da Ribeira de Santa Cruz (JK14)	-1		-2	-	-	-	-	
				Furo 2 da Ribeira de Santa Cruz (JK15)	-2		-3	-	-	-	-	
				Furo 1 do Santo da Serra (JK11)	0		0	-	-	-	-	
				Furo 2 da Ribeira de Santa Cruz (JK12)	0		0	-	-	-	-	

Figura 45 – Matriz de vulnerabilidades da diminuição da qualidade da água subterrânea: salinização dos aquíferos

Anexo V – Cadeia de Impactos

Impactos identificados	Exposição	Sensibilidade	Capacidade adaptativa		Vulnerabilidade atual	Confiança atual	Vulnerabilidade futura						Confiança futura	
							Curto (2020–2039)		Médio (2040–2069)		Longo (2070–2099)			
							A2	B2	A2	B2	A2	B2		
Disponibilidade de água subterrânea: níveis piezométricos dos furos	Precipitação; Temperatura; Precipitação oculta.	Extensão da costa; Permeabilidade; Uso e ocupação do solo; Declive; Coberto vegetal.	Otimização das redes de distribuição; Reflorestação; Dessalinização na Ilha do Porto Santo; Recarga artificial nas Rabaças; Seccionamento da rede em baixa e monitorização de caudais com contadores distribuídos; Rede de água residual tratada na cidade do Funchal; Incentivos para manter a agricultura em poios; Capacidade de armazenamento de água.	Furo da Ribeira de Santa Luzia (JK20)	0	Média	-	-	-	-	-	-	-	
				Furo da Ribeira de João Gomes (JK18)	0		-	-	-	-	-	-	-	-
				Furo 1 da Ribeira dos Socorridos (JK3)	-	-	-	-	0	0	0	0		
				Furo 2 da Ribeira dos Socorridos (JK2)	-	-	-	-	0	0	0	0		
				Furo 3 da Ribeira dos Socorridos (JK1)	-	-	-	-	0	0	0	0		
				Furo 4 da Ribeira dos Socorridos (JK4)	-	-	-	-	0	0	0	0		
				Furo 5 da Ribeira dos Socorridos (JK5)	-	-	-	-	0	0	0	0		
				Furo 6 da Ribeira dos Socorridos (JK16)	-	-	-	-	-1	-1	-1	-1		
				Furo da Ribeira dos Socorridos (JK15)	-	-	-	-	-1	-1	-1	-1		
				Furo 2 da Ribeira de Machico (JK7)	0		-	-	0	0	0	-1		
				Furo 3 da Ribeira de Machico (JK12)	0	Média	-	-	-1	-1	-1	-1		
				Furo 5 da Ribeira de Machico (JK8)	0		-	-	0	0	0	0		

Figura 46 – Matriz de vulnerabilidades da diminuição da quantidade de água subterrânea: níveis piezométricos.

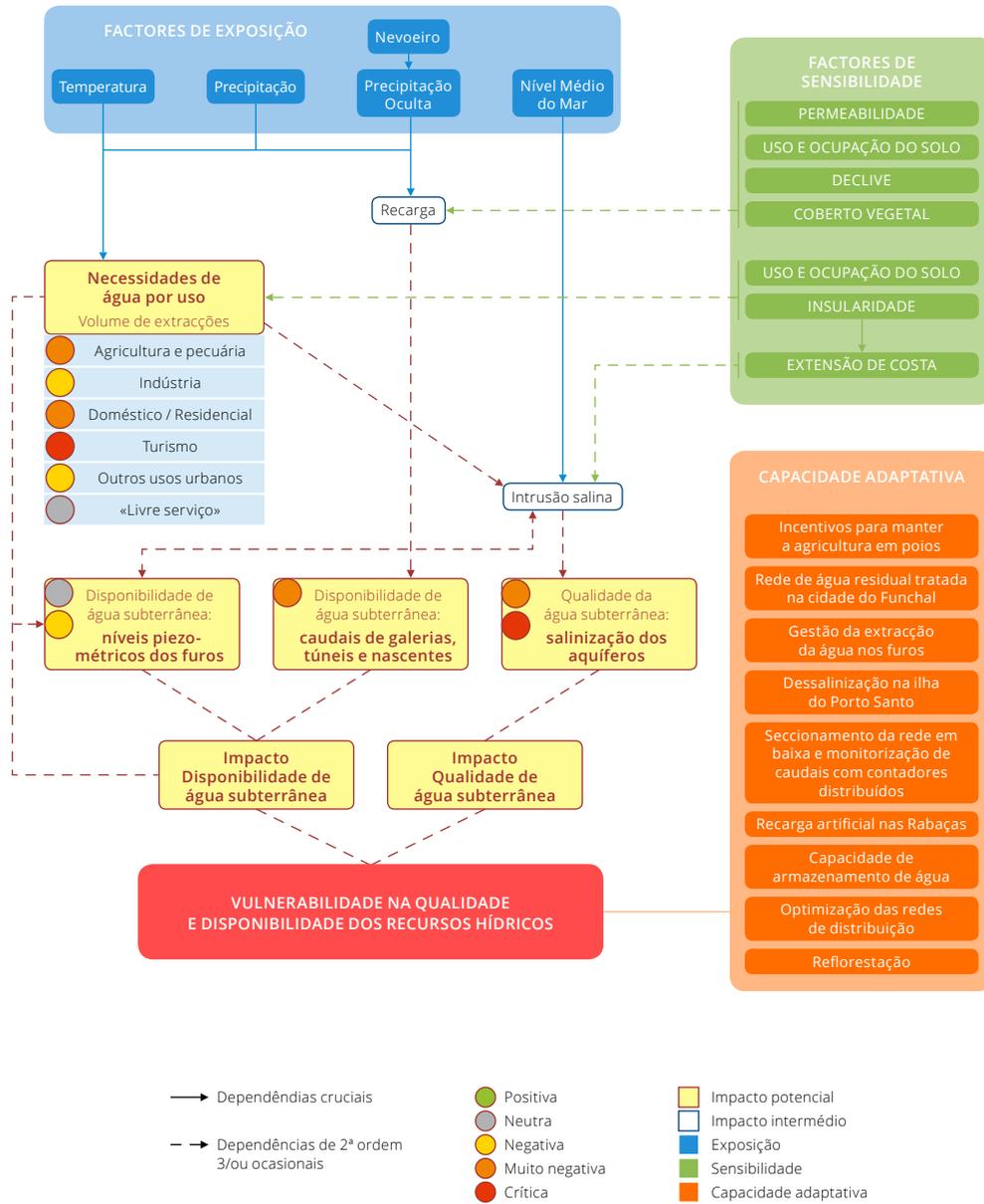
Impactos identificados	Exposição	Sensibilidade	Capacidade adaptativa		Vulnerabilidade atual	Confiança atual	Vulnerabilidade futura						Confiança futura	
							Curto (2020–2039)		Médio (2040–2069)		Longo (2070–2099)			
							A2	B2	A2	B2	A2	B2		
Disponibilidade de água subterrânea: caudais de galerias, túneis e nascentes	Precipitação; Temperatura; Precipitação oculta.	Permeabilidade; Uso e ocupação do solo; Declive; Coberto vegetal.	Reflorestação; Recarga artificial nas Rabaças; Capacidade de armazenamento de água; Incentivos para manter a agricultura em poios.	Paul da Serra	Rabaçal (1020m)	0	Média	-	-	-2	-2	-3	-3	Média
					Rabaças (1010m)	0	Alta	-	-	-2	-1	-2	-2	
					Nascentes (1000m)	-	-	-	-	-2	-2	-3	-3	
					Túnel Lev. do Seixal (835m)	-	-	-	-	-1	-1	-2	-2	
					Nascentes (800m)	-	-	-	-	-1	-1	-1	-1	
				Fajã da Ama (630m)	0	Média	-	-	-1	-1	-1	-1		
				Areeiro/Santo da Serra	Túnel Encumeada (460m)	0	-	-	-	-	-	-	-	
					Túnel 4 - Tornos (600m)	-1	Baixa	-	-	-	-	-	-	
					Porto Novo (600m)	0	Média	-	-	-	-	-	-	
					Fontes Vermelhas (350m)	0	-	-	-	-	-	-	-	
Túnel do Norte (260m)	0	-	-		-	-	-	-	-					

Figura 47 – Matriz de vulnerabilidades da diminuição da disponibilidade de água subterrânea: caudais de galerias, túneis e nascentes.

Impactos identificados	Exposição	Sensibilidade	Capacidade adaptativa		Vulnerabilidade atual			Confiança atual	Vulnerabilidade futura									Confiança futura
					A	B	C		Curto (2020–2039)			Médio (2040–2069)			Longo (2070–2099)			
									A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Necessidades de água por uso - volumes de extrações	Precipitação; Temperatura; Precipitação oculta.	Insularidade Uso e ocupação do solo;	Incentivos para manter a agricultura em poios.	Agricultura e pecuária	1	1	0	Alta	0	-1	-2	-	-	-	-	-	-	Baixa
				Indústria	1	1	1		0	0	-2	-	-	-	-	-		
				Doméstico/Residencial	1	-1	-2		1	-1	-2	-	-	-	-	-		
				Turismo	1	-2	-2		-2	-3	-3	-	-	-	-	-		
				Outros usos urbanos	1	-1	-2		1	1	-2	-	-	-	-	-		
				«Livre serviço»	1	1	1		0	0	0	-	-	-	-	-		

Figura 48 – Matriz de vulnerabilidades do aumento das necessidades de água, por uso.

DISPONIBILIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA DA REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA



RECURSOS HÍDRICOS

adaptação às
alterações climáticas

AUTORES

Susana Prada, Joana André Reis, Vítor Barreto

2015

1. Introdução

Os recursos hídricos subterrâneos, que apresentam uma importância muito significativa na satisfação das necessidades da população, são muito dependentes das condições climáticas e, portanto, condicionadas por potenciais alterações climáticas futuras (Figura 1 - Esquema conceptual dos Recursos Hídricos).

Evoluções nos valores médios de temperatura, precipitação e nível do mar contribuem para ocorrência de impactos na disponibilidade e qualidade da água dos aquíferos. A subida da temperatura e diminuição da precipitação, para além de eventuais alterações nos níveis de precipitação oculta, potenciados por fatores de sensibilidade como a ocupação e uso do solo, o coberto vegetal, o declive do terreno e a permeabilidade do meio geológico, poderão ter efeitos profundos no ciclo hidrológico nomeadamente ao nível da recarga dos aquíferos, comprometendo a quantidade de água doce disponível. A diminuição de recarga devido a reduções de água infiltrada e aumento da evapotranspiração, resultam numa diminuição das reservas de água subterrânea e dos caudais médios de água subterrânea escoados no sentido terra-mar promovendo também o avanço de água salgada no sentido mar-terra.

Para além da diminuição da recarga, a elevação do nível médio do mar influencia as áreas emersas bem como a salinização dos aquíferos. Dessa alteração do equilíbrio dinâmico água doce/água salgada com subida da interface salina resulta um aumento do teor de cloretos. Com efeito, mesmo para variabilidades positivas do nível médio do mar ainda que ligeiras são expectáveis reduções da espessura da lente de água doce nas zonas costeiras de ilhas como a Madeira.

A origem de desequilíbrios pode ser também promovida quando a exploração de água subterrânea para consumo das populações, resulta em volumes captados superiores à recarga, criando-se um défice de água doce, com redução dos níveis piezométricos para além do avanço perigoso da cunha salina.

Da avaliação da evolução dos caudais das galerias, túneis e nascentes bem como dos níveis piezométricos dos furos, constatou-se a influência da variação da recarga nos valores analisados. No entanto, no caso dos furos, os volumes extraídos para suprir as necessidades de consumo

das populações constituem, atualmente e a curto prazo, uma maior influência. Essa maior vulnerabilidade dos furos ao fator humano de extrair água é notória também no que se refere à qualidade da água, particularmente no que se refere à salinização dos aquíferos.

Após a análise dos impactos provocados pelas alterações climáticas na disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos subterrâneos foi essencial compreender quais as medidas já implementadas no sentido de os minimizar e, quais as estratégias necessárias para complementar as atuais medidas no sentido de contrariar a vulnerabilidade atual e futura.

Constituem-se como objetivos principais do presente relatório, integrado no projeto CLIMA-Madeira:

- A validação e exposição da Capacidade Adaptativa (CA) atual dos vários sistemas considerada aquando da avaliação das vulnerabilidades;
- Definição de Medidas de Adaptação (MA) integradas numa estratégia de “Adaptação Planeada”, onde são apresentadas propostas de ações para lidar com as vulnerabilidades futuras identificadas.

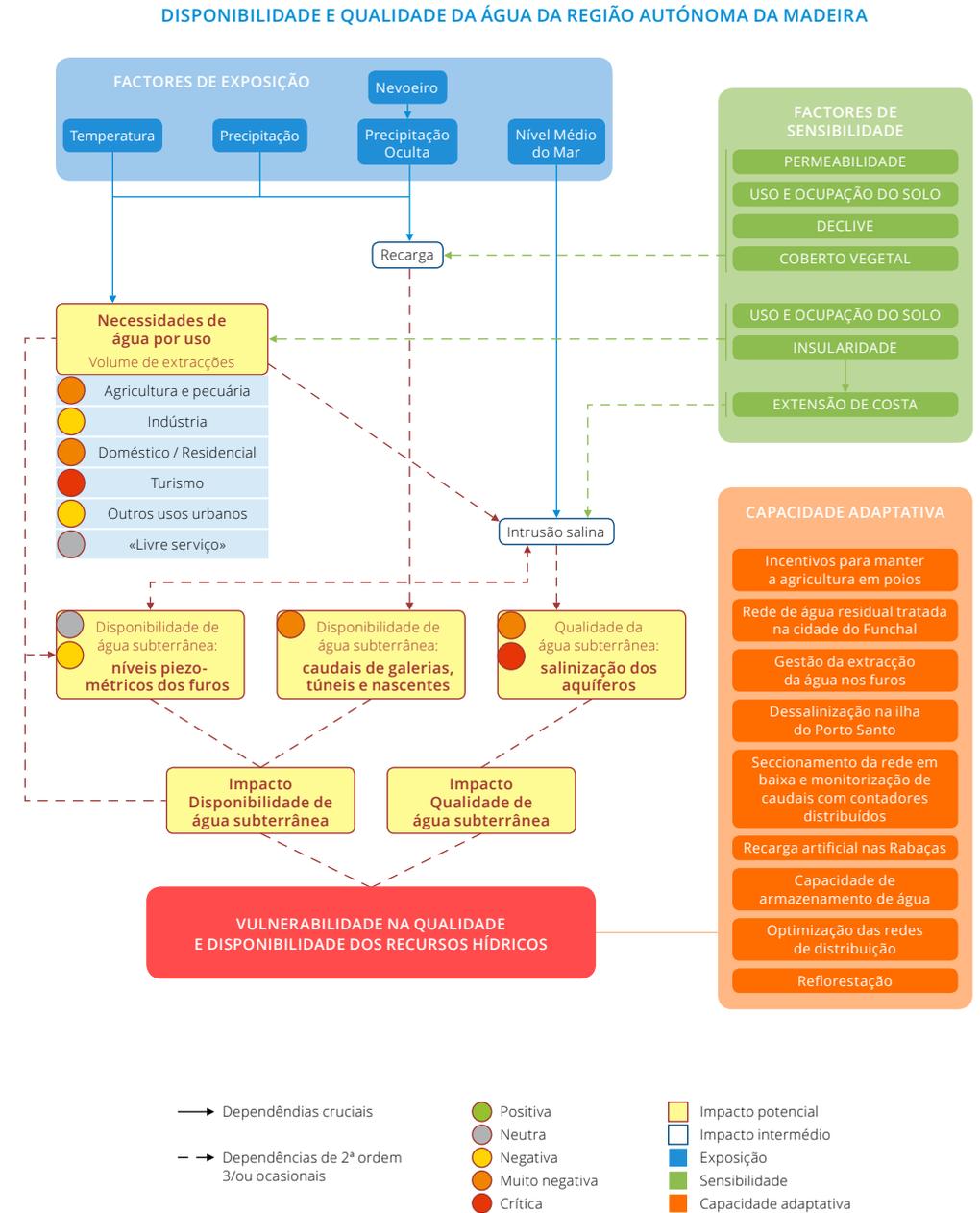


Figura 1 – Esquema conceptual dos Recursos Hídricos

2. Metodologia

Para cada impacto das alterações climáticas (AC's) identificado na primeira fase do projeto, tal como se apresentam na Tabela 1 - Impactos das AC's nos Recursos Hídricos subterrâneos, foi realizada uma pesquisa de ações ou iniciativas que já tenham sido implementadas ou em curso que permitam moderar os seus efeitos negativos.

Essa consulta foi realizada por inquirição direta da entidade responsável pela exploração, tratamento e abastecimento de água para consumo, a IGA (Investimentos e Gestão da Água, S.A.) e por informações que foram sendo transmitidas pela comunicação social.

Tabela 1 - Impactos das AC's nos Recursos Hídricos subterrâneos.

Impactos	
Qualidade da água subterrânea	Salinização dos aquíferos
	Níveis piezométricos dos furos
Disponibilidade de água subterrânea	Caudais de galerias, túneis e nascentes
	Necessidades de água por uso - volumes de extrações

A designada capacidade adaptativa (CA) pode atuar direta ou indiretamente num fator de exposição ou sensibilidade, e constituindo-se muitas vezes uma adaptação autónoma as medidas em curso não são uma resposta consciente aos estímulos climáticos, nem pretendem atuar especificamente sobre o impacto particular nos recursos hídricos.

A CA identificada foi validada e complementada por agentes externos convidados, aquando da realização do workshop de 12 de Fevereiro de 2015.

Nesse evento, para além da CA, foi efetuada uma sondagem às possíveis medidas de adaptação (MA) que podem ser definidas para contrariar as vulnerabilidades futuras identificadas na primeira fase do projeto. As MA sugeridas no workshop, complementaram outras já identificadas (Prada *et al.* 2006 e Santos e Aguiar, 2006).

3. Resultados e Discussão

3.1. Lacunas de conhecimento

Para identificar e caracterizar os potenciais impactos das AC's sobre o setor Recursos Hídricos, permitindo avaliar as principais vulnerabilidades do território nesse contexto, foi realizada uma pesquisa sobre toda a informação disponível.

Verificou-se que, embora já haja alguma investigação internacional e regional neste domínio, estudos ajustados às particularidades naturais, geográficas e socioculturais da Região Autónoma da Madeira (RAM) são ainda escassos. Salienta-se, que para além da incerteza face aos cenários climáticos, é ainda desconhecido o comportamento futuro da precipitação oculta, se esta poderá aumentar ou diminuir.

Os dados disponibilizados para realizar a análise, de um modo geral, indicavam que a monitorização é relativamente recente e, que em alguns casos não se encontra definido um plano de amostragem regular. As séries de dados temporais apresentavam elevada descontinuidade, com elevado número de observações em falta e/ou registos pouco fidedignos, mesmo quando transformadas em valores médios mensais.

Para contrariar essas limitações, em algumas análises foram adotados métodos de modelação e testes estatísticos não paramétricos. No entanto, previamente foi realizada uma avaliação cuidada dos dados, com cruzamento de informação com outros registos diretamente correlacionáveis, no sentido de aceitar/declinar os registos considerados como potenciais *outliers*. Sempre que ocorriam, ainda assim, dúvidas sobre registos foram contactadas as instituições responsáveis para obter mais informações sobre os mesmos.

O grau de confiança associada aos impactos e vulnerabilidade está intimamente relacionado com limitações associadas aos dados e lacunas na adequabilidade dos estudos às especificidades da RAM e relação com AC's. Como se pode verificar na Tabela 2 - Confiança associada aos impactos e vulnerabilidade, o grau foi definido tendo em atenção cada metodologia de análise e qualidade dos dados associados.

Tabela 2 – Confiança associada aos impactos e vulnerabilidade.

Impacto	Vulnerabilidade	Confiança	Justificação
Qualidade da água subterrânea: Salinização dos aquíferos	Atual	Muito Alta	Análise estatística com resultados significantes efetuada com dados reais e séries temporais com pelo menos 10 anos.
	Futura: curto prazo	Baixa	O teor de cloretos é maioritariamente dependente da extração de água nos furos. Logo, alterações futuras significativas nas tendências históricas dos volumes elevados, resultará numa variação da concentração de cloretos independentemente da alteração climática.
	Futura: médio e longo prazo	Baixa	A avaliação da diminuição futura dos níveis baseou-se apenas no valor do nível estático medido durante a execução dos furos, podendo não ser representativo da evolução posterior do nível piezométrico em repouso.
Disponibilidade de água subterrânea: Níveis piezométricos dos furos	Atual	Média	Os níveis estáticos adotados correspondem a meses em que o volume extraído é muito reduzido, quase desprezável face aos restantes meses do ano.
	Futura: médio e longo prazo	Muito Baixa	A avaliação da diminuição futura dos níveis baseou-se apenas no valor do nível estático medido durante a execução dos furos, podendo não ser representativo da evolução posterior do nível piezométrico em repouso.
Disponibilidade de água subterrânea: Caudais de galerias, túneis e nascentes	Atual	Baixa	Túnel 4 dos Tornos - A contabilização do caudal apenas regista a água fornecida para abastecimento e rega, sendo excluída a água descarregada para a ribeira.
	Atual	Alta	Galerias do Porto Novo, das Fontes Vermelhas, Rabaças e o Túnel do Norte - A análise estatística com resultados significantes teve como base dados reais.
	Atual	Média	Túnel da Encumeada e as galerias do Rabaçal e Fajã da Ama - Dimensão da amostra reduzida.
	Futura: médio e longo prazo	Média	Modelação matemática adotada com um elevado grau de simplificação que poderá não refletir a elevada heterogeneidade do meio vulcânico.
Disponibilidade de água subterrânea: Necessidades de água por uso - volumes de extrações	Atual	Alta	Os resultados obtidos para o ano de 2015 considerados representativos das necessidades reais atuais
	Futura: curto prazo	Baixa	Avaliação baseou-se em indicadores socioeconómicos, não considerando a afetação das alterações climáticas futuras expectáveis.

3.2. Capacidade adaptativa

Como referido anteriormente, ainda que uma CA não seja deliberadamente implementada no sentido de atuar sobre um determinado impacto, o facto dessa medida, atualmente em vigor, contribuir para a sua atenuação constitui-se uma resposta positiva para a diminuição da vulnerabilidade. A CA identificada apresenta-se na Tabela 3 - Capacidade adaptativa.

Salienta-se que, sempre que uma CA influenciar direta ou indiretamente a redução da exploração de furos, túneis, galerias e nascentes e/ou permitir um aumento da recarga, o aumento da reserva subterrânea decorrente, desagrava o avanço da cunha salina possibilitando uma redução do teor em cloretos e aumento da qualidade da água dos aquíferos costeiros.

Tabela 3 – Capacidade adaptativa.

Capacidade Adaptativa	Qualidade da água subterrânea		Disponibilidade de água subterrânea	
	Salinização dos aquíferos	Níveis piezométricos dos furos	Caudais de galerias, túneis e nascentes	Necessidades de água por uso
Incentivos para manter a agricultura em poios	x	x	x	x
Rede de água residual tratada na cidade do Funchal	x	x		
Seccionamento da rede em baixa e monitorização de caudais com contadores distribuídos	x	x		
Recarga artificial nas Rabaças	x	x	x	
Capacidade de armazenamento de água	x	x	x	
Otimização das redes de distribuição	x	x		
Gestão da extração da água nos furos	x			
Reflorestação	x	x	x	
Dessalinização na ilha do Porto Santo	x	x		

Ainda que o objetivo principal não seja o de minimizar os impactos negativos na disponibilidade de água subterrânea, os incentivos verificados para manter a agricultura em poios, demonstra uma gestão no uso e ocupação do solo, permitindo criar zonas de maior infiltração.

Ainda, no sentido de diminuir o impacto do consumo nas disponibilidades de água subterrânea, a Câmara Municipal do Funchal disponibiliza, ainda que com uma abrangência reduzida, uma rede alternativa de águas residuais tratadas para rega de jardins, utilização da protecção civil e outras utilizações que não exijam água potável.

É expectável a conclusão do seccionamento da rede em baixa e colocação de contadores com intuito de monitorizar com mais rigor perdas e consumos ilegais e sua localização.

No Paul da Serra, foi efetuado um desvio de caudal de linhas de água para a área plana do maciço, permitindo uma recarga artificial da galeria das Rabaças. Esta constitui-se como uma medida adaptativa com impactos benéficos notórios ao nível da disponibilidade de água nessa galeria.

No sentido de garantir abastecimento principalmente para rega em períodos de défice de água, nomeadamente nos meses mais quentes e secos, foram executadas infraestruturas de elevada dimensão para armazenamento de água. Essas construções, sob a forma de lagoas, permitem a retenção de um considerável volume de água nos meses de maior precipitação.

Também, obras nas redes de distribuição de água, nomeadamente em alta, foram executadas no sentido de diminuir as elevadas perdas e, portanto, reduzir a extração de água para suprir as necessidades de consumo.

Verificou-se ainda que, dado o conhecimento empírico da correlação positiva entre a extração e a concentração de cloretos, a IGA tem reagido no sentido de moderar danos potenciais. A capacidade adaptativa tem sido demonstrada pela gestão dos volumes elevados, diminuindo ou suspendendo pontualmente a extração nos furos onde se verificam aumentos da concentração. As necessidades são pois satisfeitas por outros furos com concentrações de cloretos menos críticas.

No caso dos furos da Ribeira de Machico, onde após a execução do Túnel do Norte e, face à constatação de uma redução média superior a 20m dos níveis piezométricos, foram reduzidos substancialmente os caudais de exploração, como apresentado na Figura 2 – Caudais de exploração iniciais e atuais dos furos da Ribeira de Machico.

A reflorestação que tem sido realizada, particularmente após os incêndios de 2010, no pressuposto que renova o coberto vegetal endémico com benefícios ao nível da infiltração de água da chuva e aumento da precipitação oculta, constitui-se uma medida com efeitos benéficos no aumento da recarga dos aquíferos.

Este estudo não abrangeu a ilha do Porto Santo onde, devido à sua escassez hídrica, o abastecimento de água se faz quase exclusivamente à custa de uma central dessalinizadora, cuja operação não deverá ser significativamente afetada pelas alterações climáticas. Esta situação constitui-se, no entanto, como uma medida adaptativa à reduzida disponibilidade de água potável para consumo.

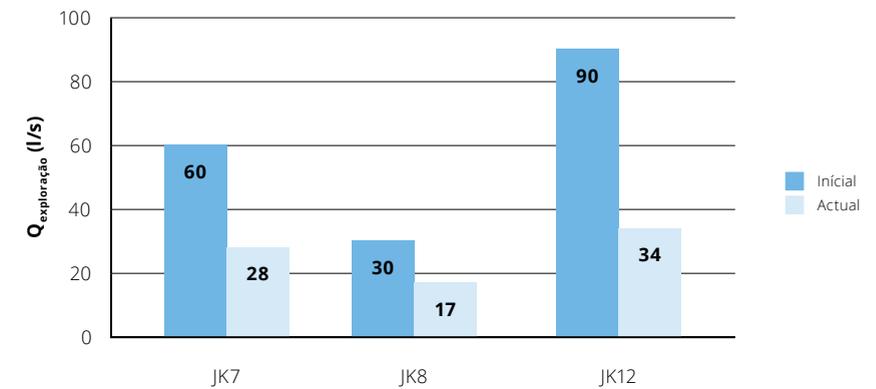


Figura 2 – Caudais de exploração iniciais e atuais dos furos da Ribeira de Machico.

3.3. Medidas de adaptação

Através da capacidade adaptativa que vem sendo implementada, para que os sistemas naturais ou humanos se ajustem às alterações climáticas, tem havido uma atitude ativa no sentido de contrariar os impactos sentidos nos recursos hídricos. Deverá ser salvaguardada a continuidade das ações implementadas, fomentando a criação de condições favoráveis para o seu ideal funcionamento e resultado.

Instalação de equipamentos de medição para monitorização mais precisa dos caudais e da qualidade ao nível das captações e pontos de entrega

A monitorização das quantidades no início e final da rede permite não só ter um conhecimento mais preciso das disponibilidades de água mas também das perdas e consumos ilegais verificados.

A definição de um plano de amostragem regular para aferição da qualidade da água garante a manutenção das condições necessárias para consumo, bem como identifica eventuais contaminações.

Melhoria da rede hidrométrica

A melhoria da rede hidrométrica com recolha permanente de dados permitirá a caracterização de fenómenos climáticos e hidrológicos, no tempo e no espaço, possibilitando, entre outras: a avaliação das disponibilidades hídricas; a análise de eventos extremos de secas e cheias; a disponibilização de informação de base para aplicação de modelos e respetiva calibração.

Todo o desenvolvimento de investigação será consolidado em bases reais rigorosas mas também será possível um controlo ajustado com carácter preventivo em oposição a uma abordagem reativa.

Desenvolvimento e aprofundamento da investigação científica para suportar as políticas de gestão da água

A aposta na investigação válida com adequação prática efetiva, permitirá a adoção de medidas e estratégias mais sustentáveis em todos os seus domínios - social, económico e ambiental.

Este desenvolvimento basear-se-á muito no melhoramento dos sistemas de monitorização com registo rigoroso de dados para que a avaliação seja mais precisa.

Aprofundar o conhecimento dos hábitos de consumo de água das populações e do seu conhecimento e sensibilidade face aos impactos associados à disponibilidade e qualidade do recurso

A implementação de políticas que envolvam diretamente a população carece de um conhecimento socio-cultural que permita obter uma maior abrangência, comprometimento e reduzida contestação, resultando em medidas globalmente bem sucedidas.

Elaboração e implementação de um Programa Regional para o Uso Eficiente da Água

A água é um bem precioso que deverá ser utilizado com eficiência e racionalidade para benefício da população em geral e para os diferentes sectores de atividade económica, sem pôr em causa a sustentabilidade do recurso.

Um programa para o uso eficiente da água deverá ser uma ferramenta de gestão, centrada na problemática das perdas de água, no melhor rendimento do seu uso, mas também tendo em vista as alterações climáticas e as situações que esta problemática poderá gerar.

Delimitação dos perímetros de proteção das captações de águas destinadas ao consumo humano

No sentido de salvaguardar a integridade das zonas de captação de água subterrânea é imperioso garantir que o seu acesso seja restrito, vigiado e fiscalizado.

Ajustamento das tarifas da água para consumo

A adequação das tarifas da água, particularmente o seu aumento, servirá como fator desencorajador do consumo desregrado de água pelas populações. Esse aumento deverá ser ajustado à realidade socioeconómica mas, fundamentado pela adoção do princípio do utilizador-pagador, garantindo este recurso natural seja taxado pela sua utilização mas de forma mais consciente.

Sensibilização e educação ambiental das populações

Ainda que se implementem medidas dissuasoras de práticas ambientalmente pouco

sustentáveis relacionadas com a água, a eficácia e eficiência das mesmas só é alcançada quando estas se enraízam nas consciências e hábitos gerais das populações. A sua aceitação tem muitas vezes uma duração superior, muitas vezes só conseguida pelas gerações seguintes. A premência de resultados suporta que a sensibilização e educação das populações seja, ainda que com efeitos imediatos pouco significativos, consistente e contínua.

Investimento em soluções e campanhas de poupança de água

Todos os sectores de consumo de água devem adotar soluções que permitam a poupança deste recurso. Face ao desconhecimento geral da população, estas são informações que podem constar em ações de sensibilização e, caso necessário, a disponibilização de linhas de financiamento específicas. Salienta-se, por exemplo, a implementação de sistemas de rega mais eficientes face ao mais amplamente utilizado na ilha da Madeira, o método por alagamento. Das medidas sem custos associados, evidencia-se a adoção de caudais ecológicos nas torneiras das habitações, serviços hoteleiros e outros, com limitação dos caudais.

Melhoria das redes de distribuição

Após a otimização das redes de distribuição em alta, a melhoria das mesmas em baixa permitirá diminuir as perdas da rede, em alguns casos muito superiores a 50%, verificadas na maioria do território. A diminuição das perdas (fugas) nas redes de distribuição de água para consumo urbano e para regadio agrícola permitirá uma otimização dos volumes disponibilizados para consumo, reduzindo o sobreconsumo provocado para compensá-las.

Reutilização de águas residuais tratadas

A água disponibilizada no sistema de distribuição não deve ser desperdiçada em utilizações que não exijam os padrões de qualidade que esta apresenta. Por exemplo, a rega de jardins, lavagem de espaços exteriores e utilização pela Proteção Civil, poderá ter como base o abastecimento de águas residuais tratadas. Assim, a rede já disponibilizada em zonas restritas do Funchal deverá ser alargada não só a esse concelho mas a toda a região.

Relocalização dos furos de captação de água

No caso da extração de água dos furos ficar comprometida com o avanço da cunha salina, a solução poderá passar por escavar furos a montante dos atuais de modo que seja possível extrair água de melhor qualidade.

Recarga artificial

Sempre que se verifique a possibilidade, deverá ser contemplada a possibilidade de reproduzir o que foi realizado na zona da galeria das Rabaças, o desvio de caudais excedentes de linhas de

água para uma zona plana, permeável, com reflexos benéficos ao nível da recarga do aquífero.

Reflorestação adequada (espécies indígenas) e sua manutenção; Prevenção da destruição do coberto vegetal endémico; Controlo de espécies invasoras.

Todas estas medidas enquadram-se no grande domínio da gestão do coberto vegetal. Particularmente, afeto aos recursos hídricos, o coberto vegetal deve apresentar as características que promovam o aumento da recarga, incluindo a preservação de níveis elevados de precipitação oculta.

Recurso a águas superficiais armazenadas em altitude em grandes reservatórios

O reforço de armazenamento de águas superficiais em altitude em lagoas de armazenamento poderá permitir menor extracção do volume de água dos furos de captação, com redução do avanço da cunha salina e do consumo energético, com o aproveitamento da queda útil de água das lagoas de armazenamento/albufeiras para a produção de energia eléctrica.

A execução de mais reservatórios deverá ser realizada, tendo em conta a sua localização e respectivas dimensões do reservatório, no sentido de não ficarem comprometidas zonas de infiltração que habitualmente recarregam os aquíferos.

Recurso a águas superficiais armazenadas em pequenos reservatórios

Garantir a quantidade de água necessária ao adequado funcionamento do sector agrícola de regadio é necessário, particularmente nos períodos de défice de água.

O estabelecimento de pequenos reservatórios ou pequenas reservas de água junto a aglomerados parcelares poderá ser uma importante de forma a garantir essa disponibilidade de água sem que ocorra sobrecarga do sistema nesses períodos.

4. Conclusão

Decorrente da realização do presente trabalho, considera-se pertinente acentuar resumidamente os seguintes aspetos:

- › São indiscutivelmente necessários mais estudos, nomeadamente nas áreas avaliadas no presente projeto, no sentido de caracterizar adequadamente e com maior grau de confiança a realidade da RAM no contexto dos recursos hídricos subterrâneos. A monitorização deve ser aperfeiçoada no sentido de consubstanciar devidamente a investigação necessária para sustentar o conhecimento e eventuais políticas de gestão de água.
- › A auscultação dos participantes do *workshop*, provenientes de várias áreas profissionais do domínio público, empresarial e civil, foi muito pertinente para avaliar não só o nível de conhecimento e envolvimento de uma amostra da população à temática, mas também para obter um contributo muito significativo na identificação de várias medidas com potenciais efeitos positivos sobre os impactos.
- › Reconhece-se a sensibilidade demonstrada pelas das entidades relacionadas com a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no sentido de implementar medidas que contrariem impactos decorrentes da atividade humana. Para além disso foi demonstrado um manifesto interesse na adoção de estratégias que evitem um agravamento da vulnerabilidade face ao efeito de potenciais alterações climáticas.
- › Ainda que as ações atualmente em funcionamento se revelem insuficientes, a capacidade adaptativa identificada demonstra que, nos casos em que a influência nos recursos hídricos é direta e deliberadamente planeada, há uma crescente preocupação com a preservação do recurso água.
- › Consideram-se todas as medidas de adaptação apresentadas pertinentes e de elevada relevância dada a possibilidade de, uma vez implementadas, contrariar os impactos negativos expectáveis.

5. Referências Bibliográficas

- › Prada, S., Silva, M., Figueira, C., Sequeira, M., Gaspar, A., Cruz, J.V., 2006. Impactos das Alterações Climáticas sobre os Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira – Medidas de Adaptação. *Livro de Resumos de comunicações e lista de posters do V Congresso Ibérico de Gestão e Planeamento da Água*, Faro, edição da Fundação Nova Cultura da Água e Universidade do Algarve.
- › Santos, F. D., Aguiar, R. (Eds.) 2006. Impactos e medidas de adaptação às alterações climáticas no Arquipélago da Madeira – Projecto CLIMAAT II. Direcção Regional do Ambiente da Madeira, Funchal.

