

# Usos Múltiplos da Água no Empreendimento de Alqueva: Uma Abordagem Multi-Objectivo

Rui Fragoso †  
Vladimir Bushenkov ‡  
Carlos Marques \*

† Universidade de Évora, Departamento de Gestão, Instituto de Ciências Agrárias Mediterrânicas (ICAM), Centro de estudos e Formação Avançada em Gestão e Economia (CEFAGE)  
[rfragoso@uevora.pt](mailto:rfragoso@uevora.pt)

‡ Universidade de Évora, Departamento de Matemática, Centro de Investigação em Matemática Aplicada (CIMA)  
[bushen@uevora.pt](mailto:bushen@uevora.pt)

\* Universidade de Évora, Departamento de Gestão, Instituto de Ciências Agrárias Mediterrânicas (ICAM), Centro de estudos e Formação Avançada em Gestão e Economia (CEFAGE)  
[cmarques@uevora.pt](mailto:cmarques@uevora.pt)

---

## Abstract

The Alqueva project foresees water supplies for irrigation, electric energy production, urban-industrial consumption, ecological and environmental aims. These multi-purpose water uses compete among themselves. It raises the problem of water resource distribution among different users while maintaining good environmental conditions in the Guadiana river basin. The objective of the present study is to formulate criteria and to develop a methodology of efficient water use. The proposed methodology is based on the Feasible Goals Method/Interactive Decision Maps (FGM/IDM) technique applied to a linear multi-objective model of the Alqueva water system.

## Resumo

O Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva, prevê o abastecimento de água à agricultura, a produção de energia hidroelétrica, o consumo urbano-industrial e o aproveitamento da albufeira de Alqueva para fins náuticos e de turismo e lazer, o que coloca o problema da partilha da água entre os utilizadores e do seu uso sustentável na bacia hidrográfica do Rio Guadiana. O artigo tem por objectivo desenvolver uma metodologia que permita definir critérios de uso eficiente da água entre os utilizadores. A metodologia utilizada baseia-se no desenvolvimento de um modelo multi-objectivo adaptado às condições de utilização da água nos diferentes usos. Para a análise e selecção das soluções óptimas Pareto recorre-se à técnica do Método dos Objectivos Atingíveis/Mapas Interactivos de Decisão (FGM/IDM).

**Keywords:** water management, Alqueva, multiple objective programming, feasible goals method, decision support systems.

**Title:** Multi-purpose use of water in the Alqueva project: a multi-objective programming approach.

---

## **1 Introdução**

O Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA) constitui, para a Região Alentejo no Sul de Portugal, uma operação de desenvolvimento centrada no recurso água. Com uma capacidade de armazenamento útil de 3,35 mil hm<sup>3</sup>, a Barragem de Alqueva é a principal infra-estrutura do empreendimento, que permite aumentar consideravelmente a disponibilidade de água no Sul do País e em especial na Região Alentejo, constituindo uma reserva estratégica de água capaz de ultrapassar os efeitos das secas prolongadas e de criar condições de abastecimento regular às populações e às actividades económicas. Para além da regularização do rio Guadiana em Portugal e do abastecimento urbano-industrial, o EFMA prevê a instalação de novos regadios e a produção de energia hidroeléctrica.

O sector urbano-industrial inclui o abastecimento de água domiciliário à região e, eventualmente, também à península de Setúbal, ao Sotavento Algarvio e à Baixa da Andaluzia em Espanha, o que poderá beneficiar mais de 200 mil pessoas, e o abastecimento de água à indústria e ao sector do turismo (HP, 1995).

No âmbito da valia agrícola prevê-se a instalação de 110 mil hectares de regadio nos melhores solos do Alentejo. O sistema de rega integra, para além da Barragem de Alqueva, mais quinze barragens de regularização e subdivide-se em três subsistemas: cerca de 64% da área beneficiada com regadio pertence ao subsistema de Alqueva que com origem de água na Barragem de Alqueva beneficiará as zonas do Baixo Alentejo a Oeste de Beja e do Alentejo Central; cerca de 27% está afecto ao subsistema de Pedrógão que com origem de água na albufeira de Pedrógão irá permitir regar zonas do Baixo Alentejo a Este de Beja até ao rio Guadiana; e os restantes 9% relativos ao subsistema do Ardila também com origem de água na albufeira de Pedrógão permitirão a rega na margem esquerda do Guadiana, nos concelhos de Moura e Serpa.

Desde há muito que um dos principais objectivos do EFMA é a produção de energia hidroeléctrica. A Barragem de Alqueva integra uma central hidroeléctrica com uma potência instalada de 240 GWh e que desde o início da sua exploração em 2004 até ao final de 2006 já produziu mais de 400 GWh para a rede eléctrica nacional (EDIA, 2006). A energia é produzida na Barragem de Alqueva e a água é conduzida pelo Rio Guadiana até à albufeira de Pedrógão. Aí, pode ser utilizada novamente para abastecimento urbano-industrial e na rega dos sub-sistemas de Pedrógão e da margem esquerda do Guadiana ou, caso seja necessário, ser novamente recuperada por bombagem inversa para a Barragem de Alqueva.

O uso múltiplo da água em Alqueva coloca o problema da partilha do recurso entre os diferentes sectores utilizadores e em especial entre os de maior consumo, como a agricultura e o ambiente que exige níveis mínimos de água na albufeira de Alqueva e de caudais ecológicos no rio Guadiana, ou eventualmente a produção de energia hidroeléctrica. Numa região, como o Alentejo em que água é necessariamente um bem escasso, este problema deve ser abordado de forma integrada, considerando simultaneamente todos os usos da água e os conflitos que se geram entre si na competição pelo recurso.

O Relatório da Organização das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Humano de 2006 (ONU, 2006), sublinha que a gestão da água e dos recursos relacionados com a sua utilização, deve ser realizada de forma integrada de modo permitir maximizar os resultados económicos e o bem-estar social, sem comprometer a sustentabilidade vital dos ecossistemas. Este conceito, constitui uma revolução na governação da água, sendo talvez a principal desde a Conferência Internacional da Água de 1992. O conceito de

gestão integrada da água estabelece como orientações o princípio ecológico, o princípio institucional e o princípio económico.

O princípio ecológico defende que a gestão da água deve ser preconizada ao nível da bacia hidrográfica e não de forma independente pelas instituições que representam os diferentes sectores utilizadores e por razões ambientais deve incorporar simultaneamente a gestão da terra. De acordo com o princípio institucional, a gestão da bacia hidrográfica deve privilegiar o diálogo e a participação de todos intervenientes. O princípio económico pretende uma maior utilização dos princípios económicos de valorização da água como instrumento de promoção da eficiência da sua utilização.

O ponto de partida para a gestão integrada de recursos hídricos, é que a água deve ser tratada como um único recurso ambiental e deve ser distribuída pelos seus diferentes sectores utilizadores com base em políticas públicas coerentes, que tenham em conta as necessidades, a equidade no acesso e os limites ecológicos do uso da água, nomeadamente, o facto do ambiente ser tratado com um sector utilizador com os seus próprios direitos de acesso à água.

A afecção da água no EFMA entre a agricultura, a produção de energia eléctrica, os usos ambientais e o consumo urbano-industrial e os efeitos na qualidade da água, configuram um complexo problema de índole social, económica e ambiental. Neste âmbito, o objectivo deste artigo é propor e testar uma metodologia que considere simultaneamente os objectivos múltiplos da utilização da água e princípios de negociação na sua afectação eficiente. Para o efeito foi utilizado a técnica do Método dos Objectivos Atingíveis/Mapas Interactivos de Decisão (Feasible Goals Method/Interactive Decision Maps), que permite analisar todo o conjunto de soluções óptimas Pareto resultantes da optimização multi-objectivo (Lotov et al., 2004).

Para além desta introdução, o artigo compreende mais três partes: a metodologia, que apresenta o Método dos Objectivos Atingíveis e o modelo de programação multi-objectivo utilizado para modelar a utilização da água no EFMA; os resultados, de que consta a análise e discussão dos compromissos entre os objectivos múltiplos do uso da água; e por último a conclusão, onde se processa a escolha da solução final de compromisso e se identifica as suas consequências em termos dos objectivos múltiplos de utilização da água.

## **2 Metodologia**

### **2.1 O método FGM/IDM**

Os problemas de decisão estão geralmente relacionados com um número infinito de soluções possíveis, que não podem de ser analisadas na sua totalidade. O procedimento usual consiste em considerar apenas um número reduzido de soluções possíveis. A sua escolha é normalmente realizada por especialistas influenciados pelos seus próprios interesses e objectivos. Corre-se assim o risco das soluções escolhidas não interessarem aos decisores e de resultarem na fraca aplicabilidade das técnicas de apoio à decisão aos problemas reais. Uma das formas possíveis de resolver este problema é o Método dos Objectivos Atingíveis (Feasible Goals Method – FGM) introduzido por Lotov (1973) com base em Gass et Saaty (1955).

O método dos objectivos atingíveis possibilita a apresentação, numa forma explícita, da informação agregada contida num modelo de decisão multi-objectivo para qualquer nível de análise. Este método permite fazer a descrição de todas as soluções possíveis para todos os objectivos considerados. No caso do modelo linear, o conjunto dos valores

atingíveis das funções objectivo lineares pode ser descrito na forma de um poliedro, que resulta da intercepção de um número finito de semi-planos. Se forem utilizadas funções objectivo não lineares, o método constrói uma aproximação do conjunto das soluções atingíveis.

Em Bushenkov et Lotov (1980) descreve-se a primeira implementação do sistema de software utilizando este método. Posteriormente o método foi aplicado em vários estudos entre os quais se refere Bushenkov et al. (1982). Todas essas experiências se encontram reunidas no livro de Lotov et al. (2004).

Considerando que os objectivos atingíveis são dados  $x \in G_x$ , em que  $G_x \subset \mathbb{R}^n$  é o conjunto completo dos valores das variáveis  $x$  admissíveis de  $x \in \mathbb{R}^n$ . As funções objectivo são especificadas por  $f = F(x)$ , sendo,  $f \in \mathbb{R}^r$  vector das funções objectivo. Deste modo o conjunto atingível pode ser descrito de forma implícita por:

$$G_f = \{f: f = F(x), x \in G_x\}$$

Para analisar o conjunto das soluções atingíveis,  $G_f$  é construído (ou aproximado) de forma explícita antecipadamente de modo a permitir a participação dos decisores na análise das soluções, escolhendo uma ou várias entre todas as soluções possíveis. A informação sobre o conjunto  $G_f$  exhibe-se na forma de Mapas Interactivos de Decisão (Interactive Decision Maps – IDM) apresentados em Lotov et al. (2004). Para a solução  $f^*$  escolhida pelo decisor no espaço dos objectivos, o sistema calcula automaticamente o vector das variáveis  $x^*$  tal que:

$$f^* = F(x^*), x^* \in G_x$$

A grande flexibilidade que o método FGM/IDM apresenta na fundamentação e no apoio à tomada de decisão, permite combinar este método com os outros métodos de programação multi-objectivo. Para além da análise de problemas de multi-objectivo, o método dos objectivos atingíveis pode ser levado a cabo com sucesso no desenvolvimento de sistemas de simulação alimentados por modelos matemáticos.

## 2.2 O modelo de programação multi-objectivo

São numerosas as aplicações de modelos de programação matemática à economia e à gestão dos recursos naturais. Entre muitas, referem-se no sector agrícola em geral Hazell et al. (1986) e Boussard et al. (1988) e no regadio em particular Zecri (1991) e Millan et Berbel (1994).

O modelo de programação multi-objectivo proposto neste estudo inclui as principais características do EFMA em termos agregados, como a disponibilidade de água, a área equipada com regadio, a potência hidroeléctrica instalada e o regime de escorrências para o Rio Guadiana. O modelo descreve os objectivos do uso múltiplo da água e com base nos recursos disponíveis procede à sua afectação entre os vários utilizadores.

O uso da água foi agregado em termos anuais em função da disponibilidade e das necessidades de água no sistema Alqueva-Pedrógão. A disponibilidade de água foi estabelecida individualmente para cada uma das duas albufeiras, em função das escorrências a montante da albufeira de Alqueva no Rio Guadiana, dos seus volumes iniciais armazenados e da capacidade de regularização das albufeiras intermédias.

Entre as duas albufeiras prevêm-se actividades de transferência de água que traduzem a manutenção do curso natural do Rio Guadiana e a água turbinada para a

produção de energia eléctrica na Barragem de Alqueva. O modelo também representa a bombagem de água de jusante para montante do sistema, através da transferência de água da albufeira de Pedrógão a albufeira para Alqueva.

Com base nos coeficientes técnicos exógenos e no valor das variáveis endógenas, o modelo calcula os rendimentos da produção agrícola de regadio, a percolação e a lexiviação de nitratos drenados nas actividades agrícolas, a produção da energia eléctrica, o consumo urbano industrial e o volume de água na albufeira de Alqueva no fim do ciclo anual de exploração.

Na produção agrícola consideram-se  $i$  culturas de regadio para cada um dos três sub-sistemas de rega  $j$ . A área de cada cultura em cada sub-sistema é dada pela variável  $X_{i,j}$  em milhares de hectares. As culturas consideradas são as mais representativas do regadio no Alentejo e compreendem as culturas arvenses de outono-inverno (trigo mole e trigo rijo), as culturas arvenses de primavera-verão (milho e girassol), as horto-industriais (tomate, pimento, melão, cebola, batata e beterraba), os frutos (pêra, pêssego, ameixa e uva de mesa), a vinha para vinho e o olival para azeite. A produção agrícola está limitada pela área beneficiada em cada sub-sistema de rega ( $ar_j$ ) e que foi fixada em 71,83 mil hectares no sub-sistema de Alqueva, em 30,03 mil hectares no sub-sistema de Pedrógão e em 10,83 mil hectares no sub-sistema da Margem Esquerda do Guadiana:

$$\sum_i X_{i,j} \leq ar_j \quad (1)$$

Devido a limitações técnicas da produção agrícola e de comercialização dos produtos, a área de cada cultura em cada sub-sistema de rega não pode ultrapassar um terço da respectiva área disponível:

$$X_{i,j} \leq ar_j \times 0,33 \quad (2)$$

A área de cada cultura depende do seu rendimento ( $RA_{i,j}$ ), que é dado em milhões de Euros, em função do valor unitário da produção agrícola ( $vp_{i,j}$ ), das despesas com a compra de bens e serviços ( $cp_{i,j}$ ), da área das culturas ( $X_{i,j}$ ) e do custo da água de rega ( $CA_{i,j}$ )

$$RA_{i,j} = (vp_{i,j} - cp_{i,j}) \times X_{i,j} - CA_{i,j} \quad (3)$$

A variável  $CA_{i,j}$  é calculada em milhões de Euros por cultura e por sistema de rega, com base no preço da água ( $pa$ ) e no valor da variável endógena de consumo de água em  $hm^3$  por cultura e sistema de rega ( $CAA_{i,j}$ ):

$$CA_{i,j} = pa \times CAA_{i,j} \quad (4)$$

O preço da água foi fixado em 0,050 milhões €/hm<sup>3</sup> e a variável  $CAA_{i,j}$  é dada em função dos valores dos parâmetros das dotações unitárias reais de água de cada cultura ( $ag_{ij}$ ), da área de cada cultura ( $X_{i,j}$ ) e da eficiência global ( $e$ ) das redes primária e secundária de distribuição de água, que foi fixada em 65%:

$$CAA_{i,j} = ag_{i,j} \times X_{i,j} \times 1/e \quad (5)$$

A poluição agrícola ( $P_{i,j}$ ) é avaliada no modelo em 100 Toneladas de percolação e lexiviação de nitratos no solo produzidos por cada cultura  $i$  no sub-sistema de rega  $j$  e depende dos valores dos respectivos níveis unitários de poluição ( $pn_{i,j}$ ) e da respectiva área cultivada ( $X_{i,j}$ ):

$$P_{i,j} = pn_{i,j} \times X_{i,j} \quad (6)$$

As equações (1) a (6) descrevem as relações lineares estabelecidas no modelo para a produção agrícola e para os seus efeitos em termos de poluição de nitratos, apresentando-se em anexo os principais coeficientes técnicos utilizados.

Os usos múltiplos da água no sistema de Alqueva-Pedrógão são descritos nas equações (7) a (13), calculando-se nas equações (7) e (8) os volumes de água disponíveis em hm<sup>3</sup> no fim do ciclo anual de exploração nas albufeiras de Alqueva ( $V$ ) e de Pedrógão ( $VPG$ ).

O valor da variável  $V$  é obtido em função das disponibilidades e do uso da água na albufeira de Alqueva. As disponibilidades dependem do volume de água inicial na albufeira ( $b_0$ ) e da quantidade de água que é captada a montante no Rio Guadiana ( $eag$ ). A essas disponibilidades há que adicionar as reservas de água das albufeiras intermédias ( $ai$ ) e a água bombeada de jusante para montante a partir da albufeira de Pedrógão ( $ABOM$ ). O uso da água, inclui o consumo de água para a agricultura no sistema de rega de Alqueva, para a produção de energia hidroeléctrica ( $CHE$ ) e para o consumo urbano-industrial ( $CUI$ ). A esses volumes há que adicionar o reforço de água a outros sistemas hidráulicos ( $r$ ) e a água que é transferida para albufeira de Pedrógão para além da que é turbinada na produção de energia ( $EAL$ ):

$$V = eag + b_0 - \sum_i CAA_{i,Alqueva} - CHE - r - CUI - EAL + ai + ABOM \quad (7)$$

A variável  $VPG$ , tal como para o caso da albufeira de Alqueva, também depende das disponibilidades e do uso da água na albufeira de Pedrógão. As disponibilidades incluem as reservas próprias da albufeira de Pedrógão ( $pg_0$ ) e a água proveniente de Alqueva turbinada na produção de energia eléctrica ( $CHE$ ) e para satisfazer as necessidades ( $EAL$ ). Em termos dos usos, considerou-se, para além das necessidades da produção agrícola nos sub-sistemas de rega de Pedrógão e da Margem Esquerda do Guadiana, a bombagem de água para a albufeira de Alqueva e a manutenção do caudal ecológico do Rio Guadiana ( $sag$ ):

$$VPG = pg_0 + EAL + CHE - \sum_i CAA_{i, Pedrógão} - \sum_i CAA_{i, MarEsq} - sag - ABOM \quad (8)$$

O volume de água em Pedrógão no final do ciclo anual de exploração ( $VPG$ ) encontra-se limitado superiormente na equação (9) pela sua capacidade máxima de armazenamento útil ( $pg$ ), fixada em 515 hm<sup>3</sup>:

$$VPG \leq pg \quad (9)$$

Na equação (10) a variável  $CUI$ , relativa ao consumo urbano-industrial, é limitada superiormente pelo parâmetro  $lcu$  em 87,6 hm<sup>3</sup>. Segundo a HP (1995), este valor engloba as estimativas do consumo urbano-industrial actual e futuro para a Região Alentejo (27,6 hm<sup>3</sup>) incluindo o sector do turismo e o abastecimento a Sines (40 hm<sup>3</sup>) e à Península de Setúbal (20 hm<sup>3</sup>):

$$CUI \leq lcu \quad (10)$$

A água turbinada na Barragem de Alqueva para a produção de energia hidroeléctrica ( $CHE$ ) é calculada na equação (14) em função da energia produzida em GWh ( $GW$ ) e dos parâmetros relativos às necessidades de água para produzir um GWh ( $aeg$ ), que com base em HP (1992) se considerou ser 7,3 hm<sup>3</sup> em Alqueva:

$$CHE \leq aeg \times GW \quad (11)$$

A produção de energia hidroeléctrica está limitada superiormente a 240 GWh, que é a potência instalada nos dois grupos geradores da Central de Alqueva ( $pi$ ):

$$GW \leq pi \quad (12)$$

A bombagem de água de jusante para montante, i.e., da albufeira de Pedrógão para a albufeira de Alqueva, implica um gasto energético adicional para superar a altura da queda de água, devendo ocorrer apenas quando houver uma forte pressão sobre a procura de água no sub-sistema de Alqueva. Este aspecto foi considerado no modelo através do cálculo do balanço entre a energia produzida em Alqueva e a que seria necessária para elevar novamente a água de Pedrógão para Alqueva (*BALEN*):

$$BALEN = GW - ABOM / (aeg \times 0,68) \quad (13)$$

No âmbito dos usos múltiplos da água no sistema de Alqueva-Pedrógão, o modelo determina de forma endógena o valor das variáveis  $CAA_{i,j}$ ,  $CHE$ ,  $CUI$ ,  $EAL$ ,  $GW$ ,  $ABOM$  e  $BALEN$ , sendo os restantes elementos parâmetros exógenos.

Os objectivos dos usos múltiplos da água no Empreendimento de Alqueva são determinados pelas variáveis  $F_1$  a  $F_5$ :

$$F_1 = \sum_i \sum_j RA_{i,j} \quad (14)$$

$$F_2 = \sum_i \sum_j P_{i,j} \quad (15)$$

$$F_3 = GW \quad (16)$$

$$F_4 = CUI \quad (17)$$

$$F_5 = V \quad (18)$$

A variável  $F_1$  representa os rendimentos das actividades agrícolas de regadio em milhões de Euros, a variável  $F_2$  representa a poluição por lexiviação e percolação de nitratos nas actividades agrícolas em 100 Toneladas, a variável  $F_3$  representa a produção de energia hidroeléctrica em GWh, a variável  $F_4$  representa o consumo de água nos usos urbano-industriais em  $hm^3$  e por último a variável  $F_5$ , que representa o volume de água disponível em  $hm^3$  na albufeira de Alqueva no final de cada ciclo anual de exploração.

### 3 Resultados

As soluções do modelo de programação multi-objectivo foram obtidas para valores médios dos volumes de água iniciais nas albufeiras de Alqueva e de Pedrógão e do regime de escoamentos do Rio Guadiana a montante a jusante deste sistema.

Para o volume de água útil inicial considerou-se 2200  $hm^3$  na albufeira de Alqueva ( $b_0$ ) e 338  $hm^3$  na albufeira de Pedrógão ( $pg_0$ ). Esses valores equivalem a cerca de dois terços do nível máximo de armazenamento útil dessas albufeiras. Para a água captada no Rio Guadiana a montante da albufeira de Alqueva foi utilizado o valor de 2710  $hm^3$ , resultante da média ponderada das aflúências a Alqueva em ano médio, ano húmido e ano seco, indicadas no Estudo de Avaliação Global (HP, 1992). Para manter o caudal ecológico do Rio Guadiana (*sag*) admitiu-se disponibilizar para jusante o mesmo volume de água que é captado a montante da albufeira de Alqueva (2710  $hm^3$ ). Para as reservas de água das albufeiras intermédias ( $ai$ ) e para o reforço a outros sistemas hidráulicos ( $r$ ) considerou-se 360 e 166  $hm^3$ , respectivamente.



Com base nestes pressupostos são determinados no âmbito dos usos múltiplos da água no EFMA, os compromissos entre os objectivos de maximização do rendimento das actividades agrícolas de regadio ( $F_1$ ), de minimização da poluição de nitratos na agricultura ( $F_2$ ), de maximização da produção de energia hidroeléctrica ( $F_3$ ), de maximização do consumo urbano-industrial ( $F_4$ ) e de maximização do volume de água armazenado no final do ciclo anual de exploração na albufeira de Alqueva ( $F_5$ ).

### 3.1 Análise do compromisso entre o rendimento agrícola ( $F_1$ ) e a produção de energia hidroeléctrica ( $F_3$ )

Nesta primeira análise tenta-se maximizar o rendimento agrícola ( $F_1$ ) e a produção de energia hidroeléctrica ( $F_3$ ). Os resultados obtidos revelam que fronteira de Pareto é constituída por um único ponto, o que demonstra que neste caso não existe conflito entre os dois objectivos. Portanto, é possível atingir simultaneamente o valor máximo do rendimento agrícola ( $F_1 = 140$  milhões de Euros) e o valor máximo da produção de energia hidroeléctrica ( $F_3 = 240$  GWh). Por essa razão, nas análises seguintes fixou-se  $F_3$  no seu valor máximo.

### 3.2 Análise do compromisso entre o rendimento agrícola ( $F_1$ ) e o volume de água em alqueva no final do ciclo de exploração ( $F_5$ )

Na Figura 1 apresenta-se o conjunto das soluções possíveis e a fronteira de Pareto obtidas nesta análise, em que se limitou o valor inferior de  $F_5$  a 2000 hm<sup>3</sup> e o limite superior de  $F_3$  a 240 GWh.

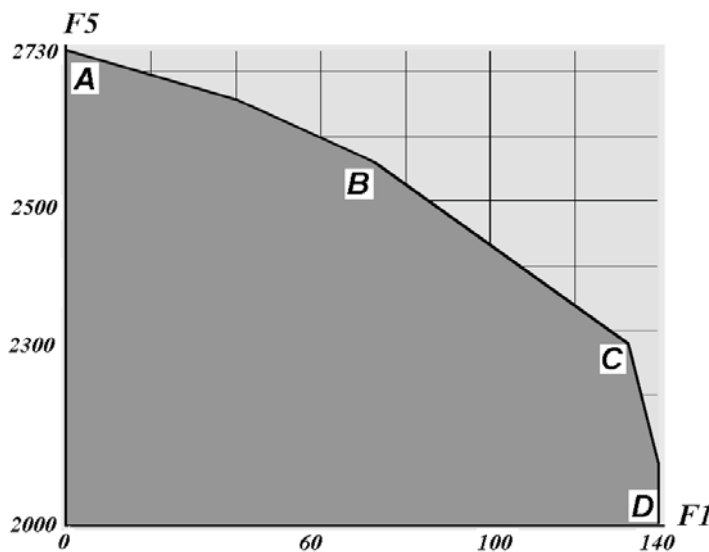


Figura 1: Análise do compromisso entre  $F_1$  e  $F_5$

O rendimento agrícola é máximo no ponto D ( $F_1 = 140$  milhões de Euros e  $F_5 = 2000$  hm<sup>3</sup>) e o volume de água em Alqueva no final do ciclo anual de exploração atinge o seu máximo no ponto A ( $F_5 = 2728$  hm<sup>3</sup> e  $F_1 = 0$ ).



Entre o ponto *A* e o ponto *B* o aumento do rendimento agrícola não provoca uma diminuição significativa do volume de água em Alqueva ( $F_1 = 71,9$  milhões de Euros e  $F_5 = 2562$  hm<sup>3</sup>). Portanto nestas condições, é possível aumentar o rendimento agrícola, e por conseguinte, a produção agrícola, sem grandes compromissos ecológicos e ambientais.

Quando se passa do ponto *B* para o ponto *C*, verifica-se um ligeiro aumento dos efeitos ambientais negativos em função do aumento do rendimento agrícola.

A partir do ponto *C*, pequenos aumentos do rendimento agrícola implicam uma forte diminuição do volume de água em Alqueva, concluindo-se que é neste ponto ( $F_1 = 132$  milhões de Euros e  $F_5 = 2275$  hm<sup>3</sup>) que ocorre o maior compromisso entre o máximo rendimento agrícola e o objectivo ambiental de manutenção do volume de água na albufeira de Alqueva. Por esse motivo, as próximas análises serão realizadas considerando um valor máximo para  $F_1$  de 132 milhões de Euros.

### 3.3 Análise do compromisso entre o rendimento agrícola ( $F_1$ ), a poluição agrícola ( $F_2$ ) e o volume de água em alqueva no final do ciclo de exploração ( $F_5$ )

Na Figura 2 apresenta-se o conjunto das soluções possíveis e a fronteira de Pareto obtidas nesta análise para vários níveis de volume de água em Alqueva e em que se limitou os valores superiores de  $F_2$  a 1800 Ton,  $F_3$  a 240 GWh e  $F_1$  a 132 milhões de Euros.

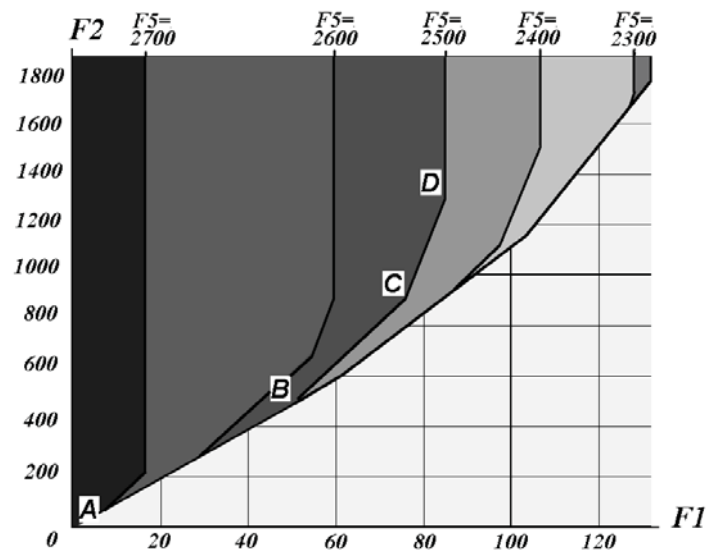


Figura 2: Análise do compromisso entre  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_5$

Começamos por analisar a fronteira de Pareto correspondente a um nível de  $F_5$  de 2500 hm<sup>3</sup>, em que se destacam os pontos *A*, *B*, *C* e *D*.

No ponto *A*, a poluição de nitratos é mínima ( $F_2 = 0$ ) e o rendimento agrícola é nulo. A partir deste ponto até ao ponto *B*, o rendimento agrícola cresce até 50 milhões de Euros e é acompanhado pelo aumento da poluição de nitratos até 500 Ton. O aumento do

rendimento agrícola entre o ponto *B* e o ponto *C* implica um ligeiro acréscimo dos níveis de poluição de nitratos.

A partir do ponto *C* o aumento do rendimento agrícola tem efeitos significativamente crescentes na poluição de nitratos, verificando-se a partir do ponto *D* uma situação intolerável do ponto de vista ambiental, na medida em que o aumento de poluição de nitratos já não está associado ao aumento do rendimento e por conseguinte da produção agrícola. Neste caso, o compromisso razoável de concretização simultânea dos objectivos  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_5$  está na proximidade do ponto *C*. Para os restantes valores da varável  $F_5$ , a fronteira de Pareto apresenta o mesmo padrão de comportamento.

### 3.4 Análise do compromisso entre o rendimento agrícola ( $F_1$ ), a poluição agrícola ( $F_2$ ), o uso urbano-industrial ( $F_4$ ) e o volume de água em alqueva ( $F_5$ )

A série dos desenhos (a) a (c) da Figura 3 apresenta as fronteiras de Pareto dos conjuntos obtidos. A cada um destes desenhos tridimensionais correspondem diferentes valores de  $F_5$ , 2200, 2300 e 2400 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Em cada desenho os valores de  $F_4$  estão representados por lâminas de diferentes cores ( $F_4 = 0, 10, 20, \dots, 80$  hm<sup>3</sup>).

No desenho (a), que é o que implica um maior gasto de água e por conseguinte um volume de água inferior na albufeira de Alqueva no final do ciclo de exploração, pode-se constatar que todas as lâminas correspondentes a diferentes valores de  $F_4$  são coincidentes, o que permite concluir que o consumo urbano-industrial não tem influência na *trade-off* entre os objectivos  $F_1$  e  $F_2$  e por isso não existe conflito com o objectivo  $F_4$ .

No desenho (b), que corresponde a um valor de  $F_5$  de 2300 hm<sup>3</sup>, observam-se lâminas de cores diferentes, o revela a existência de compromissos entre os objectivos  $F_1$  e  $F_2$  para os diferentes valores de  $F_4$ . Portanto, neste caso, os três critérios estão em conflito.

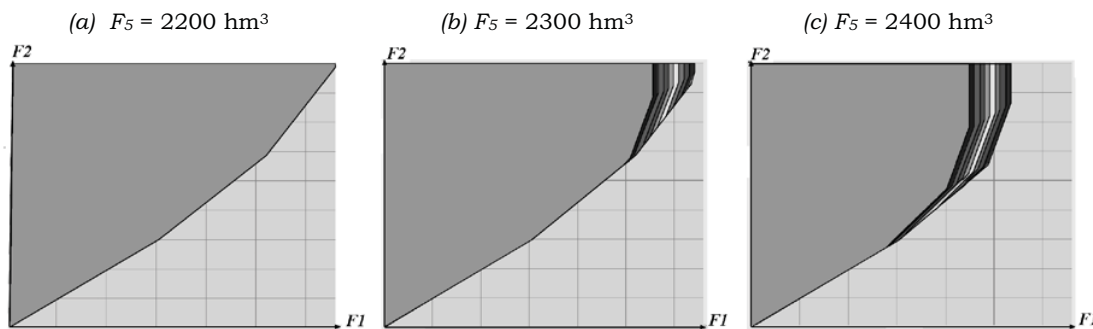


Figura 3: Análise do compromisso entre  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_4$  e  $F_5$

Por último, no desenho (c) correspondente a um valor de  $F_5$  de 2400 hm<sup>3</sup>, como é fácil de observar pelo aumento da área ocupada pelas lâminas de diferentes cores, o conflito entre os objectivos aumenta significativamente.

A comparação dos desenhos da Figura 3 levou à escolha do conjunto de soluções representado no desenho (b), do qual é apresentado um fragmento na Figura 4 e que corresponde a um volume de água na albufeira de Alqueva no final do ciclo anual de exploração ( $F_5$ ) de 2300 hm<sup>3</sup>. A escolha deste valor parece razoável, na medida em que

representa cerca de 70% da capacidade útil da albufeira de Alqueva e é ligeiramente superior ao valor inicialmente utilizado no modelo multi-objectivo (2200 hm<sup>3</sup>).

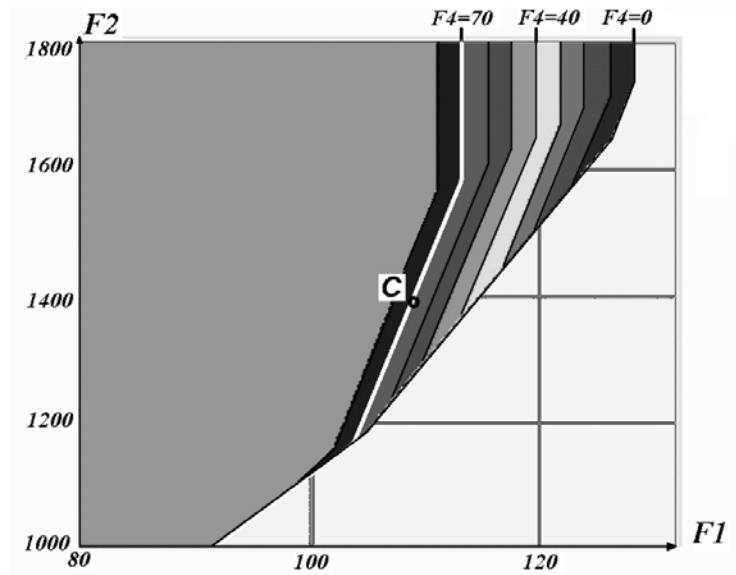


Figura 4: Análise do compromisso entre  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_4$  para  $F_5 = 2300 \text{ hm}^3$

Com base na Figura 4 escolhe-se a lâmina correspondente a um consumo de água urbano-industrial ( $F_4$ ) de 70 hm<sup>3</sup>, que representa cerca de 80% das necessidades futuras estimadas para este tipo de uso a serem satisfeitas a partir de Alqueva. Para este nível de  $F_4$ , o ponto C traduz o compromisso entre o rendimento agrícola ( $F_1 = 108$  milhões de Euros) e a poluição de nitratos ( $F_2 = 1400$  Ton).

## 4 Conclusão

Neste estudo definiram-se critérios de uso eficiente da água no Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva, através da selecção das soluções óptimas Pareto de um modelo multi-objectivo com base no Método dos Objectivos Atingíveis/Mapas Interactivos de Decisão (FGM/IDM).

A solução escolhida (ponto C da Figura 4) corresponde a um compromisso entre o rendimento agrícola de 108 milhões de Euros, a poluição de nitratos de 1400 Ton, o consumo urbano-industrial de 70 hm<sup>3</sup> e um volume de água mínimo na albufeira de Alqueva no final de cada ciclo anual de exploração de 2300 hm<sup>3</sup>, que é perfeitamente compatível com produção máxima de energia hidroeléctrica na Barragem de Alqueva (240 GWh).

Esta solução implica transferências de água da albufeira de Alqueva para a albufeira de Pedrógão, para além da água turbinada na produção de energia eléctrica, de 755 hm<sup>3</sup> e um consumo de água na agricultura que ascende a 363 hm<sup>3</sup>. Do ponto de vista da agricultura de regadio, o valor do compromisso é obtido para produções de frutos, vinha e olival correspondentes a áreas regadas de 30, 22 e 37 mil hectares, respectivamente.

## 5 Referências

- Boussard, J.M. and Daudin, J.J. (1988) La programmation linéaire dans les modèles de production, Mason, Paris.
- Bushenkov, V.A. and Lotov, A.V. (1980) Methods and Algorithms for analysing linear systems, by constructing generalised sets of attainability. *Zh. Vychisl. Matem. i Matem. Phys.* 20(5), 1130-1141 (in Russian, English translation in: *U.S.S.R. Comput. Maths. Math. Phys.*, 20(5), 38-49), 1980.
- Bushenkov, V.A., Ereshko, F., Kindler, J., Lotov, A.V. and Maré, L. (1982) Application of the Generalized Reachable Sets Method to Water Resources Problems in Southwestern Skane, Sweden, Working Paper WP-82-120, IIASA, Áustria.
- EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas de Alqueva (2006) Alqueva / Dez anos: Electricidade, regadio e 1.140 milhões de investimento, Folha Informativa.
- Fragoso, R. and Marques, C. (2005) Competitividade do Regadio em Portugal no Contexto da Nova Política Agrícola Comum: O caso de uma exploração agrícola no Alentejo, Em: Actas do XLII Congresso SOBER, Julho, Ribeirão Preto.
- Fragoso, R. and Marques, C. (2006) A Revisão da política de tarifas de água no uso agrícola: Um estudo de caso no Sul de Portugal, Em: Actas do XLIV Congresso SOBER, 23 a 27 de Julho, Fortaleza.
- Gass, S. and Saaty, T. (1955) The Computational Algorithm for the Parametric Objective Function, *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol.39, No.2.
- Hazell, P.B.R., Norton, R.D. (1986) *Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture*, Mac Millan Publishing Company, New York.
- HP – Hidrotécnica Portuguesa; Tractebel; S.E.I.A. (1992) Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva: Estudo de avaliação global. Lisboa.
- HP – Hidrotécnica Portuguesa (1995) Estudo prévio do sistema global de rega do Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva, Lisboa.
- Lotov, A., Bushenkov, V. and Kamenev, G. (2004) Interactive Decision Maps: Approximation and Visualization of Pareto Frontier. In Series: Applied Optimization, vol 89, Kluwer Academic Publishers.
- Lotov, A.V. (1973) An Approach to Perspective Planning in the Case of Absence of Unique Objective, In: Proceedings of Conference on Systems Approach and Perspective Planning., Computing Center of the USSR Academy of Sciences, Moscow.
- Lucas, M.R., Godinho, M.L. and Fragoso, R. (2002) The evolution of the agri-environmental policies and sustainable agriculture. Saragoça: In: Proceedings of the X European Association of Agricultural Economists Congress: European Agri-Food System, Espanha, Setembro, 2002.
- Millan, J.S. and Berbel, J. (1994) A Multicriteria Model for Irrigated Agriculture Planning under Economical and Technical Risk, *Agricultural Systems*, 44, pp. 105-117.
- Noéme, C., Fragoso, R. and Coelho, L. (2004) Avaliação económica da utilização da água em Portugal – Determinação do preço da água para fins agrícolas: Aplicação nos Aproveitamentos Hidro-Agrícolas de Odivelas, da Vigia e do Sotavento Algarvio. Estudo realizado para o Ministério da Agricultura e do Desenvolvimento Rural, IDRHa.
- ONU – Organização das Nações Unidas (2006). Human Development Report 2006 – Power, poverty and global water crisis, Palgrave Macmillan, New York, USA.
- Zekri, S. (1991) Modelos decisionales multicriterio en planificación agraria: objetivos económicos versus objetivos ambientales, Tesis doctoral, Universidade de Córdoba, Córdoba.

**Anexo**

Tabela A1: Valores dos coeficientes técnicos das actividades agrícolas

	Arvenses de Verão	Arvenses de Inverno	Horto- indus- triais	Frutos	Vinha	Olival
Valor da prod. (10 <sup>6</sup> €/10 <sup>3</sup> ha)	1,60	0,70	3,22	4,49	1,50	3,20
Custos (10 <sup>6</sup> €/10 <sup>3</sup> ha)	1,05	0,85	2,08	2,62	0,68	1,94
Necessidades de água (hm <sup>3</sup> /10 <sup>3</sup> ha)	6,0	1,5	4,9	4,9	1,5	1,5
Poluição de nitratos (10 <sup>2</sup> Ton/10 <sup>3</sup> ha)	0,92	0,71	1,22	0,16	0,16	0,16

Fontes: Fragoso et Marques, 2005 e 2006; Noéme et al. and Lucas et al., 2002.

