

# CURVAS DE DEMANDA PELOS RECURSOS HÍDRICOS DOS PRINCIPAIS USOS CONSUNTIVOS NO SUBMÉDIO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

## DEMAND CURVES FOR WATER RESOURCES OF THE MAIN WATER USERS IN SUB-MIDDLE SÃO FRANCISCO BASIN

**Gerald Norbert  
Souza da Silva**

Universidade Federal de Pernambuco  
(UFPE) – Recife (PE), Brasil.

**Luiz Eduardo  
Nascimento Figueiredo**

Universidade Federal de Pernambuco  
(UFPE) – Recife (PE), Brasil.

**Márcia Maria Guedes  
Alcoforado de Moraes**

Universidade Federal de Pernambuco  
(UFPE) – Recife (PE), Brasil.

**Endereço para correspondência:**

Gerald Souza da Silva – Rua  
Ambrosina Soares dos Santos,  
71, Bessa – 58035-140 – João  
Pessoa (PB), Brasil – E-mail:  
geraldsouzadasilva@gmail.com

### **RESUMO**

A região do submédio da bacia do Rio São Francisco tem uma variedade de usos, com alguns conflitos já estabelecidos. Curvas de demanda da água são importantes para identificar o valor econômico dado ao recurso hídrico pelo usuário diante de diferentes quantidades disponibilizadas. O conhecimento de tais curvas deve auxiliar no estabelecimento de políticas que criem incentivos adequados ao uso eficiente do recurso e evitem sua sobre-exploração. Este trabalho apresenta curvas de demanda pelos recursos hídricos estimadas para os usuários da agricultura irrigada e para o abastecimento humano usando o método de programação matemática positiva e expansão de ponto. Os resultados para a agricultura irrigada nos dois métodos mostraram que o *mix* de culturas é o fator mais relevante na disposição a pagar dos usuários pelo recurso hídrico e que, para o abastecimento humano, os valores econômicos em relação ao mesmo grau de disponibilidade hídrica foram mais elevados em comparação com a irrigação.

**Palavras-chave:** curvas de demanda; valor econômico da água; alocação de água.

### **ABSTRACT**

The lower basin region of São Francisco basin has a variety of uses, with some conflicts already established. Water demand curves are important to identify the economic value given to the water resource by different users and available amounts. The knowledge of them should assist in establishing policies that create appropriate incentives for efficient water resource use and prevent their over-exploitation. This paper presents the water demand curves estimated by users of irrigated agriculture and human supply using the positive mathematical programming method and point expansion method. Results for irrigated agriculture of the two methods showed that the crop mix is the most important factor for the willingness to pay for water resources and that, for human supply, the economic values, considering the same level of water availability, are higher when compared with irrigation.

**Keywords:** demand curves; water value; water allocation.

## INTRODUÇÃO

A região semiárida brasileira é cada vez mais impactada pela escassez de água, ao mesmo tempo que o crescimento econômico alavancado pelo setor agrícola depende fortemente de água para irrigação. O aumento da população e de sua renda está criando uma demanda crescente por água em setores não agrícolas e muitas vezes não rurais. Variabilidade temporal e espacial das chuvas e altas taxas de evaporação em conjunto com estiagens prolongadas marcam a região. As mudanças climáticas e o continuado crescimento da população podem elevar ainda mais a já existente crise da água na região. A exploração excessiva dos recursos hídricos disponíveis, bem como o uso de reservatórios de acumulação, afeta também a qualidade das fontes de água doce, por exemplo por intermédio da intrusão salina.

A região hidrográfica do submédio do rio São Francisco foi escolhida para identificação do valor econômico da água para os principais usos consuntivos, com o objetivo de subsidiar o desenvolvimento de um modelo de alocação hidroeconômico (MORAES *et al.*, 2013). A área de estudo é inserida na região semiárida brasileira, que possui características especiais, sobretudo com relação ao clima e à vegetação. O clima tropical semiárido no Brasil destaca-se pelo regime e pela quantidade de chuvas e determinado pela escassez, irregularidade espacial e concentração das precipitações pluviométricas. Na região semiárida, as chuvas anuais variam de no mínimo 400 mm ao máximo de 800 mm ao ano. O período seco é predominante e pode atingir até 11 meses nas áreas de maior aridez, e a precipitação ocorre de forma irregular e concentrada em dois ou três meses do ano. Nessa época intensas precipitações (120 a 130 mm em 24 horas) podem ser observadas (BRASIL, 2005; EMBRAPA, 2008).

A irrigação é responsável por cerca de 70% das retiradas totais de água no submédio do São Francisco. Incentivos que envolvem preços mais elevados de água para irrigação estão sendo cada vez mais considerados como uma ferramenta eficaz para reduzir a demanda de água. A elasticidade-preço da demanda por recursos hídricos mede a alteração proporcional na quantidade demandada do recurso diante de uma mudança no preço. A elasticidade-preço da demanda é uma medida econômica usada muitas vezes para avaliar a eficácia de um sistema de preços, no sentido de incentivar a conservação de água ou a viabilidade econômica de

transferir água de um uso para outros. Os formuladores de políticas interessados em estimar os efeitos das modificações em preços dos recursos hídricos podem basear-se em estimativas da elasticidade-preço da demanda (SCHEIERLING *et al.*, 2006).

Curvas de demanda por recursos hídricos podem ser empregadas no apoio à decisão na gestão de bacias hidrográficas, ao possibilitar análise de questões relativas ao recurso, tais como: escassez, estabelecimento de prioridades, avaliação do retorno de atividades econômicas que usam tal recurso como entrada, alocação eficiente, conservação, e avaliação de políticas. Tendo em vista que os mercados de bens como a água são em geral ausentes ou ineficazes, as decisões de alocação dos recursos hídricos raramente podem contar com o funcionamento autônomo do mercado. Em vez disso, as curvas de demanda e os valores marginais de água devem ser aplicados para subsidiar políticas de intervenção que impeçam a sobreutilização do recurso, bem como assegurem a boa qualidade dele (TILMANT *et al.*, 2008).

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF) implementou a cobrança pelo uso da água no Rio São Francisco, em julho de 2010 (BRASIL, 2010). Os mecanismos e valores de cobrança foram estabelecidos na Deliberação CBHSF n.º 40/08. Os valores são cobrados e arrecadados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e repassados à Associação Executiva de Apoio à Gestão de Bacias Hidrográficas Peixe Vivo (AGB Peixe Vivo), a quem compete desembolsar os recursos nas ações previstas no Plano de Recursos Hídricos da bacia, conforme as diretrizes estabelecidas no plano de aplicação (ANA, 2014). Os valores de cobrança atualmente são fixados em níveis baixos e em geral não têm cumprido o papel de induzir um uso eficiente pelos agricultores, pois são determinados por metodologias com objetivos arrecadatários. Segundo Vera (2014), em termos numéricos da cobrança, a irrigação consome mais de 70% dos volumes totais da bacia, porém a contribuição da cobrança é de apenas 9% do valor arrecadado total. Para o autor, isso é o resultado do mecanismo de cobrança adotado, que dá desconto de 97,5% no valor cobrado e nos preços fixos unitários estabelecidos. Ademais, a avaliação da evolução do consumo e das vazões de captação mostram crescimento para o período de 2011 a 2013, o que pode sinalizar a utilização não eficiente dos recursos

hídricos. Além disso, dados relativos ao consumo do recurso pelos agricultores continuam a ser imprecisos.

O objetivo principal deste trabalho foi estimar as curvas de demanda para os principais usos consuntivos de água no submédio do Rio São Francisco. É importante frisar que o termo *demanda* na economia pressupõe a existência de um mercado e a determinação de um preço para o bem. Essas características (mercado e pre-

ço) nem sempre são observadas quando a análise está relacionada ao recurso hídrico em alguns de seus usos. Assim, o termo *demanda* aqui é empregado como sinônimo de benefício marginal, ou seja, o quanto de retorno é obtido com base em uma variação marginal na quantidade de água. Outras denominações são encontradas e também utilizadas no presente artigo com o mesmo sentido, como, por exemplo, a disponibilidade a pagar, o valor econômico da água, entre outros.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A medida da capacidade de resposta da quantidade demandada de um bem a mudanças em seu próprio preço é conhecida como elasticidade-preço da demanda (LIPSEY, 1988). Para estimar a função demanda pelo recurso hídrico, que mede os benefícios marginais associados a diversas quantidades do recurso, são necessários os dados relativos às quantidades totais do recurso, bem como os benefícios econômicos associados a ele.

Existem muitas formas de utilização da água, seja para consumo direto, seja para consumo indireto, num pro-

### Expansão de ponto

A técnica da expansão do ponto já foi empregada em inúmeros trabalhos e representa um instrumento importante para a estimação da demanda (HAROU *et al.*, 2009; GRIFFIN, 2006). O método é relativamente fácil na aplicação, dado que se obtém toda curva de demanda por intermédio de apenas um ponto conhecido da função (normalmente o ponto de operação atual) e a elasticidade-preço da demanda, que é exógeno e assumido ser constante. A elasticidade-preço da demanda é definida como a variação na quantidade demandada em relação à variação no preço (GRIFFIN, 2006; VARIAN, 2006):

$$\eta = \frac{\frac{dQ}{Q}}{\frac{dP}{P}} \quad (1)$$

Em que:

d = delta;

$\eta$  = elasticidade-preço da quantidade demandada;

Q = quantidade de água;

cesso produtivo, como, por exemplo, a produção de alimentos e os serviços de ecossistemas básicos. Por conta dessa diversidade de uso dos recursos hídricos e de suas características específicas, uma variedade de métodos para estimar as demandas econômicas da água foi desenvolvida e continua a se desenvolver (BOOKER *et al.*, 2012). Em geral os métodos econométricos são intensivos em dados, isto é, requerem uma série extensa e confiável de informações. Métodos não tão intensivos em dados foram utilizados, a saber: o método de expansão de ponto e a programação matemática positiva (GRIFFIN, 2006).

P = preço de água, disposição a pagar; valor econômico da água ou o benefício marginal;

Resolvendo-se a equação diferencial ( $dQ=f(dP)$ ) e assumindo-se a elasticidade-preço constante, chega-se à seguinte função de demanda inversa:

$$Q = kP^{\eta} \quad (2)$$

Conhecendo-se um ponto na Equação 2, a constante  $k$  pode ser obtida e a curva de demanda traçada. Para esse ponto em geral se usa o ponto da operação atual do usuário, ou seja, a quantidade do recurso atualmente utilizada e os custos médios atuais incorridos para a obtenção de tal recurso como condição de contorno. Deve-se salientar que, conquanto mais fácil de obter, o custo médio não é igual ao custo marginal (que é igual ao benefício marginal no ponto de ótimo), mas é uma boa *proxy* dele, pelo menos para os usuários que empregam

o recurso de forma eficiente (o ponto mínimo do custo médio ocorre quando este se iguala ao custo marginal).

Entretanto a Equação 2 proposta por Griffin (2006) tem certas limitações referentes a essa utilização na prática, pois a função assíntota os eixos P e Q em direção ao infinito. Assim, por exemplo, quando a quantidade de água alocada tende a zero, o valor da água tende ao infinito. Na teoria isso representaria tendência real, mas na prática a função resulta em benefícios econômicos infinitos para valores alocados de água maiores que zero (benefícios econômicos totais dados pela área sob a curva de demanda de zero até o valor alocado). Por isso, na maioria das aplicações dessas curvas de demanda em modelos hidroeconômicos, utilizam-se tais curvas para calcular a perda dos benefícios econômicos (área sob a curva entre o valor atual e o valor alocado) por conta das reduções na alocação, o chamado custo de escassez.

Moraes *et al.* (2006) propuseram uma Equação 3 similar, mas que interceptasse o eixo das ordenadas pela introdução de duas constantes C2 e C1 e, portanto, possibilitasse o cálculo dos benefícios totais, mediante o deslocamento da função. A ideia era que na prática o valor econômico associado à quantidade alocada nula seria mensurável, e não infinito. Ademais, os valores dos benefícios eco-

nômicos atualmente obtidos seriam usados como outra condição de contorno, e a curva então se adaptaria de forma a que a área sob ela no ponto de operação se aproximasse do benefício atual obtido pelo usuário com a quantidade de água atual (ponto de operação).

$$P(Qaloc) = k(Qaloc - C2)^{1/\eta} \quad e \quad k = e^{C1} \quad (3)$$

A curva da Equação 3 passaria a interceptar o eixo dos preços (quantidade zero) e o eixo da quantidade alocada na qual o preço tende a zero (consumo autônomo). Para a regressão dos pontos obtidos com o método da programação matemática positiva (PMP), foi utilizada a mesma Equação 3, com o valor de operação ( $P_{\text{água}}$  e  $Q_p$ ) obtido pelo método PMP.

Para a obtenção das curvas da irrigação difusa e para o abastecimento humano com o método de expansão de ponto, também se recorreu aos benefícios brutos dos usuários, e o parâmetro C2 foi obtido com o excedente bruto calculado por meio da integração da função de demanda inversa e da minimização do erro utilizando o *solver*, empregando o método não linear de Levenberg-Marquardt.

### Programação Matemática Positiva

A partir da década de 1990, a programação matemática foi integrada como método de modelagem para a demanda de água para irrigação, com o trabalho de Howitt (1995), que desenvolve uma técnica denominada programação matemática positiva (PMP). Os métodos para obtenção de curvas de demanda por meio da PMP baseiam-se em um determinado preço e estimam a quantidade de água que maximiza o lucro do agricultor. A variação do preço da água induz diferentes quantidades de água ideais. Essas informações são diretamente usadas para representar a demanda derivada da água para irrigação. Várias hipóteses são feitas a respeito da função-resposta rendimento da cultura à água de irrigação.

A PMP é um procedimento de autocalibração, em três estágios, desenvolvido por Howitt (1995). O primeiro estágio consiste em um modelo de programação linear definido como:

$$\text{Max} \prod_{x_{gi}, l \wedge \geq 0} \sum_g \sum_i (v_{gi} y l d_{gi} - \sum_j \omega_{gji} a_{gji}) x_{gi, terra} \quad (4)$$

$$\sum_i a_{gji} x_{gi, terra} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (5)$$

$$x_{gi, terra} \leq \tilde{x}_{gi, terra} + \varepsilon \quad (6)$$

Em que Equação 4 é a função objetivo e  $x_{gi, terra}$  (hectares plantados por região  $g$  e cultura  $i$ ) são as variáveis de decisão. A receita marginal é dada por  $v_{gi}$  e a produtividade média e custos variáveis médios por  $yl d_{gi}$  e  $\omega_{gji}$ . Os parâmetros  $a_{gji}$  são definidos pela razão do total de insumos normalizados pela área plantada. A restrição dos recursos é dada pela Equação 5, e o conjunto da Equação 6 representa os limites da calibração em que  $\tilde{x}_{gi, terra}$  é a quantidade de área plantada atualmente observada, e  $\varepsilon$ , um erro de tolerância.

O segundo estágio consiste na calibração de uma função custo quadrática e de uma função de produção com elasticidade constante, conforme descrito a seguir:

$$TC_{gi}(x_{gi,terra}) = \alpha_{gi}x_{gi,terra} + \frac{1}{2}\gamma_{gi}x_{gi,terra}^2 \quad (7)$$

$$Y_{gi} = \tau_{gi} \left[ \sum_j \beta_{gij} X_{gij}^\rho \right]^\rho \quad (8)$$

Em que:

$Y_{gi}$  = produto da cultura  $i$  na região  $g$ ;

$\tau_{gi}$  = parâmetro de escala da função de produção (CES);

$\beta_{gij}$  = parâmetros de participação de um dado recurso  $j$ .

A elasticidade de substituição é  $\sigma = \frac{1}{(1-\rho)}$ .  $\alpha_{gi}$  e  $\gamma_{gi}$  são o intercepto e a declividade, respectivamente, da função linear de custo marginal da cultura  $i$  da região irrigada  $g$ .

Por fim, o terceiro estágio consiste em resolver um programa de maximização não linear com restrição. A função objetivo pode ser escrita assim:

$$Max_{x \geq 0} \Pi \sum_g \sum_i v_{gi} Y_{gi} - \sum_g \sum_i \left( \alpha_{gi} x_{gi,terra} + \frac{1}{2} \gamma_{gi} x_{gi,terra}^2 \right) - \sum_g \sum_i \sum_{j \neq terra} (\omega_{gij} x_{gij}) \quad (9)$$

$$\sum_i a_{gij} x_{gij,terra} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (10)$$

$$\sum_i x_{gi,água} \leq Avail.b_{água,g} \quad \forall g \quad (11)$$

$Y_{gi}$  é definida pela função de produção e pelos parâmetros  $\tau_{gi}$  e  $\beta_{gij}$  da Equação 8. O segundo termo é a função custo quadrática calibrada (Equação 7). O conjunto de restrições (Equação 10) é o mesmo utilizado no problema de maximização linear (Equação 5). Não são usadas mais as restrições de calibração do modelo linear (Equação 6). Adiciona-se um novo conjunto de restrições exclusivo para o uso da água anual (Equação 11).

Os procedimentos utilizados para a calibração do problema PMP foram os mesmos de Howitt *et al.* (2012). Já para a calibração da função CES e para a calibração da função custo quadrática, recorreu-se aos trabalhos de Medellín-Azuara *et al.* (2009) e Maneta *et al.* (2009). A elasticidade de substituição adotada foi 0,4, valor derivado dos estudos de Maneta *et al.* (2009) e Torres *et al.* (2012), e para a elasticidade de oferta<sup>1</sup> das culturas foram aplicados os valores de 0,2 até 2,0 para todas as culturas observadas.

Os dados utilizados nessa etapa do trabalho consistiram em um total de culturas observadas de onze (banana, cana, cebola, coco, goiaba, manga, maracujá, melancia, melão, uva, tomate) para doze regiões irrigadas (Nilo Coelho, Bebedouro, Salitre, Maniçoba, Tourão, Curaçá, Icó Mandantes, Apolônio Sales, Barreiras, Caraíbas, Brígida e Pedra Branca) e quatro insumos (terra, água, trabalho e suprimentos).

Os valores necessários foram obtidos com base nos dados municipais do Censo Agropecuário (IBGE, 2009), da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2012), do Relatório Final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industriais e Agricultura Irrigada n.º 6 (FUNARBE, 2011) e do Relatório de Gestão da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF, 2006).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método PMP foi utilizado para a identificação das curvas de demanda dos perímetros irrigados no submédio do São Francisco. Foram analisados 12 perímetros irrigados (Nilo Coelho, Bebedouro, Salitre, Maniçoba, Tourão, Curaçá, Icó Mandantes, Apolônio Sales, Barreiras,

Caraíbas, Brígida e Pedra Branca) com as principais culturas (banana, cana, cebola, coco, goiaba, manga, maracujá, melancia, melão, uva, tomate) referentes aos insumos (terra, água, trabalho e suprimentos). Obtiveram-se os valores com base nos dados municipais do

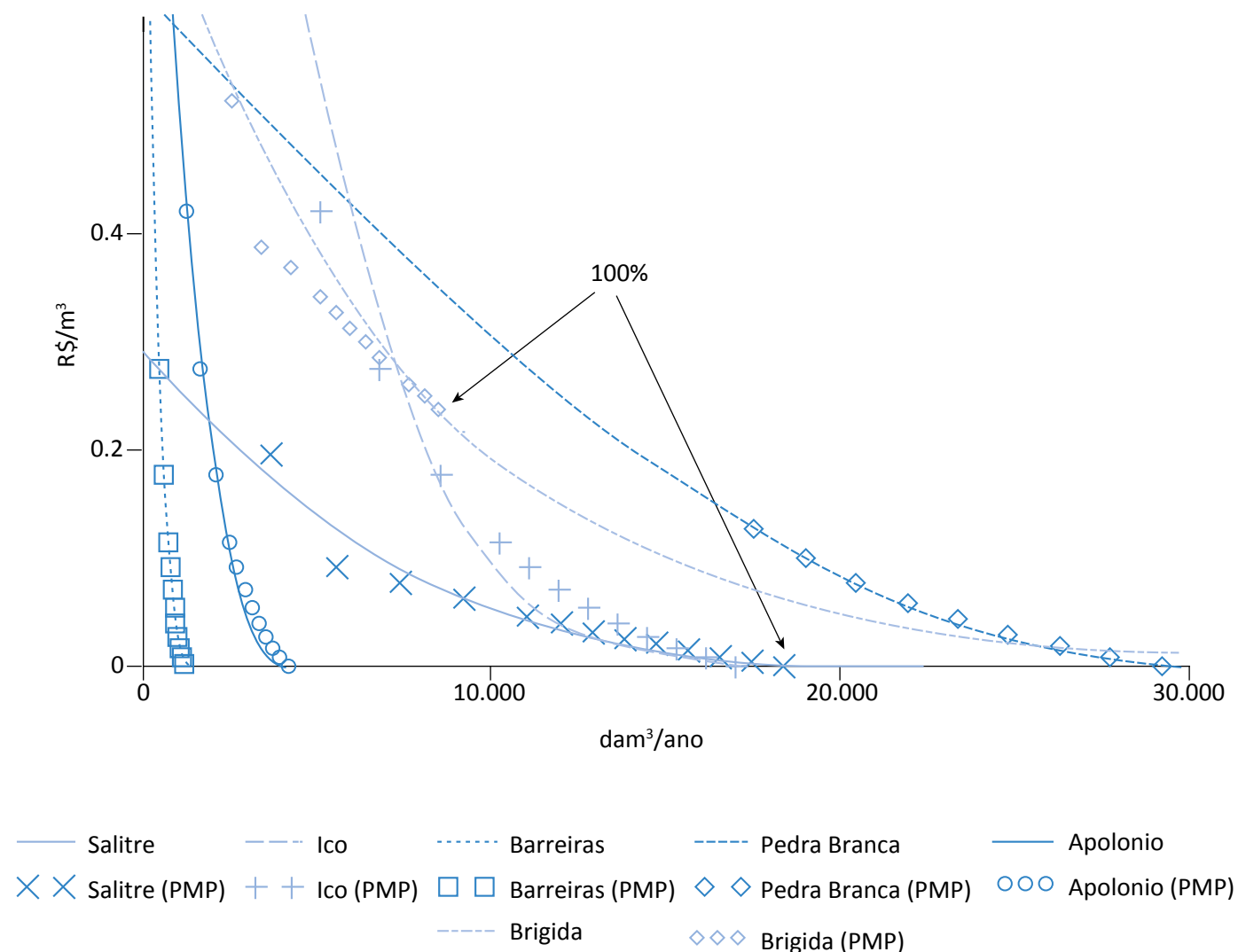
<sup>1</sup>A elasticidade de oferta da cultura é definida pela variação percentual na demanda da cultura determinada pela variação percentual no preço dessa cultura. No modelo, tais elasticidades vão impactar no custo do recurso terra. Ou seja, quanto maior a elasticidade da oferta, mais os produtores desejarem ofertar o produto e conseqüentemente demandarão mais terras, aumentando o custo do fator (para cada elasticidade se terá uma função custo quadrática calibrada com valores diferentes de  $\alpha$  e  $\gamma$ )

Censo Agropecuário (IBGE, 2009), da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2012), do Relatório Final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industriais e Agricultura Irrigada n.º 6 (FUNARBE, 2011) e o Relatório de Gestão da Codevasf (2006). Em relação à área irrigada por cultura e por região, o relatório da Funarbe (2011) forneceu a área irrigada mensalmente, estimada pelos dados do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2009), por cultura, para cada município. Para representar a área por cultura anual, usou-se a média das áreas mensais de cada cultura por município.

Os resultados dados pela PMP, que compuseram a curva de demanda por água, correspondem aos valores sombra (benefícios marginais) da restrição anual de dis-

ponibilidade de água expressa pela Equação 11, usando diferentes percentuais de disponibilidade de 100 até 5% do volume atual observado, empregando para isso o parâmetro *avail*. Isso foi feito em intervalos de 5% e para a elasticidade de oferta de 0,2 adotada para as culturas propostas. Deve-se ressaltar que na maioria das aplicações são obtidos valores sombra com a PMP para 100 a 60% de disponibilidade, porque também para esse método grande parte das aplicações dessas curvas de demanda em modelos hidroeconômicos é voltada ao cálculo dos custos de escassez, e não aos benefícios econômicos totais advindos da alocação.

O Gráfico 1 mostra os valores sombra alcançados para as diversas disponibilidades de água de 100 a 5% para



**Gráfico 1 – Curvas de demanda dos perímetros irrigados Salitre, Ico Mandantes, Barreiras, Pedra Branca, Apolônio e Brígida obtidas usando o método programação matemática positiva (PMP).**

os perímetros irrigados Salitre, Icó Mandantes, Barreiras, Pedra Branca, Apolônio Sales e Brígida obtidos com o método PMP e as curvas resultantes de uma regressão desses pontos achados com o PMP feita no tocante à forma funcional dada pela Equação 3, que resultou em aproximações bastante satisfatórias.

Os valores obtidos com a PMP foram representados pela forma funcional dada pela Equação 3 pela obtenção de valores ótimos para  $C_2$  e  $\eta$ , que minimizam os erros ao quadrado entre os valores alcançados com a PMP e os dados pela relação funcional, empregando o método não linear de Levenberg-Marquardt, que é uma variante do método de quase-Newton. A Tabela 1 exibe os resultados e os valores ótimos encontrados.

A ideia de usar a mesma relação funcional para as curvas de demanda obtidas pelos dois métodos empregados (expansão de ponto e PMP) tem a vantagem de facilitar a integração de ambas as curvas quando aplicadas num modelo de alocação hidroeconômico. A referida relação funcional, apesar de ser uma função relativamente simples e obtida com base no pressuposto elasticidade-preço constante, adaptou-se bem aos dados obtidos com a PMP em que a elasticidade ( $\eta$ ) muda constantemente. Ressalta-se apenas que, como a PMP, ao contrário do método de expansão deslocado, não associa na sua estimação a área total sob a curva de demanda aos benefícios econômicos totais, isso deve ser considerado quando da integração dessas curvas como medida dos benefícios totais e critério de otimização nos modelos hidroeconômicos.

Pode ser observado nos dados obtidos com o método PMP que a maioria dos perímetros mostra no ponto de operação atual (a 100% de *avail*) valores marginais de

água muito baixos ( $<R\$ 0,01$ ), exceto o perímetro Brígida. A forma funcional dada pela Equação 3 conseguiu representar os valores obtidos com o método PMP de forma mais acurada entre 100 e 60%, o que coincide com a faixa em que o método em geral é aplicado. Pode-se posteriormente identificar uma função objetivo que penalize de maneira diferente os erros, dependendo da faixa de disponibilidade.

As curvas de demanda dos perímetros irrigados Nilo Coelho, Bebedouro, Caraíbas, Tourão, Curaçá e Maniçoba são apresentados no Gráfico 2.

Os resultados das curvas de demanda obtidos com o método PMP (Gráficos 1 e 2) para os principais projetos públicos de irrigação no submédio do São Francisco sugerem que, na maioria dessas regiões irrigadas, a disposição dos usuários a pagar (DAP) com 100% de disponibilidade é maior ou igual ao valor atualmente cobrado pelo CBHSF ( $R\$ 0,004/m^3$ ). No caso de menor disponibilidade (90% ou menos do valor que os perímetros usam hoje em dia), para a maioria deles os DAP tornam-se muito maiores do que o atual valor cobrado. Outro resultado interessante exposto pelas curvas de demanda obtidas com a PMP são os valores da DAP (valor econômico da água) com 100% de disponibilidade para os projetos públicos de irrigação que abrangem a área de produção de cana no SFRB (Salitre, Maniçoba, Tourão e Curaçá, no município de Juazeiro), muito próximos de zero, em contraste com aqueles projetos que são grandes produtores de frutas. São exemplos os perímetros de Nilo Coelho e Bebedouro, na cidade de Petrolina, que possuem DAP elevadas em todas as faixas de disponibilidade. Como as curvas de demanda dependem do *mix* de culturas cultivado em um projeto (juntamente com os custos de produção e disponibilidade de água), mostra-se que a

**Tabela 1 – Resultados da representação funcional dos valores ótimos para  $C_2$  e  $\eta$ .**

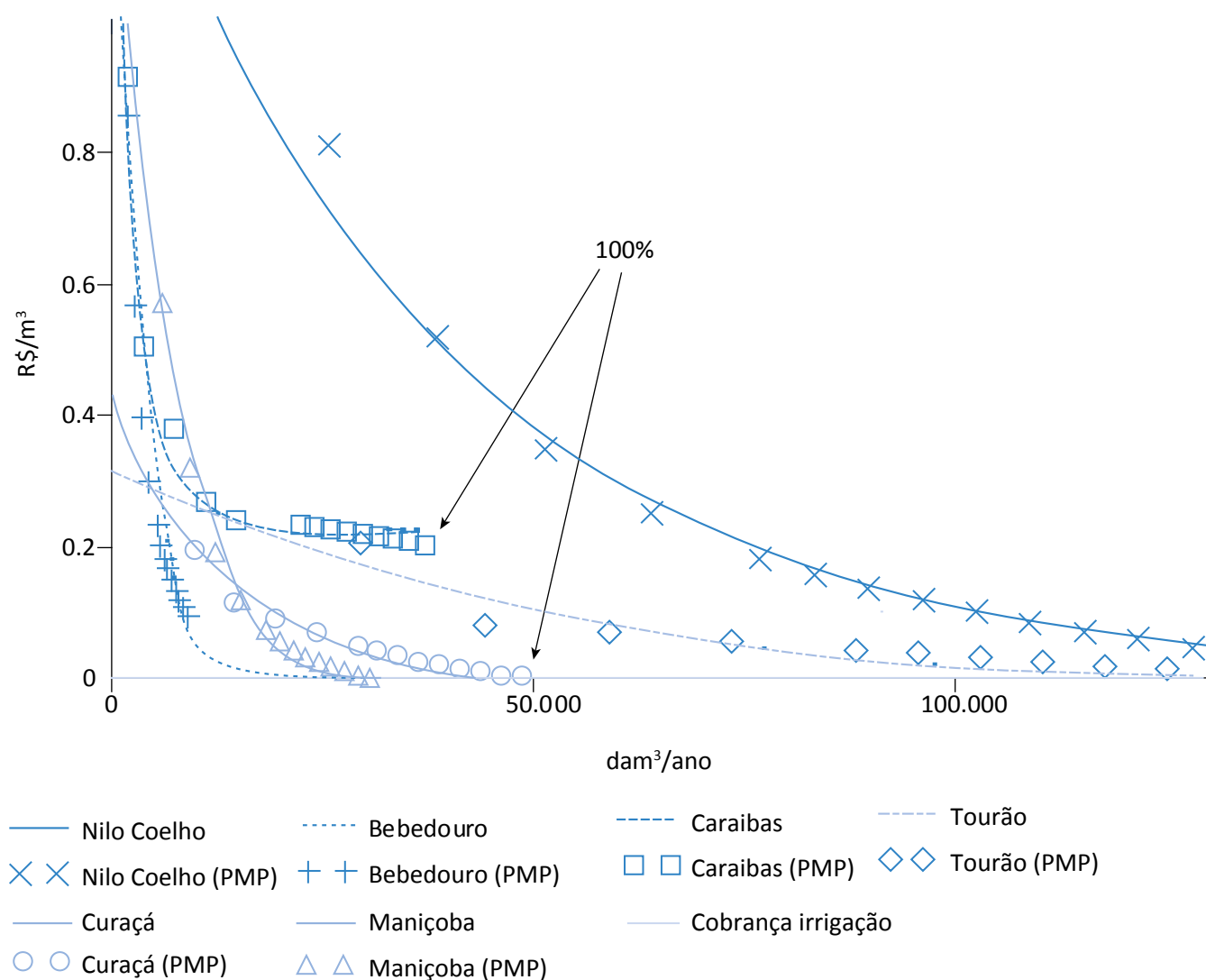
|                         | Nilo Coelho | Tourão  | Brígida | Barreiras | Bebedouro | Salitre | Maniçoba | Curaca | Icó Mandantes | Pedra Branca | Apolônio Sales |
|-------------------------|-------------|---------|---------|-----------|-----------|---------|----------|--------|---------------|--------------|----------------|
| $C_2$<br>( $hm^3/ano$ ) | 1.774.939   | 155.755 | 394.540 | 1.277     | 178.019   | 20.798  | 39.570   | 68.671 | 21.096        | 29.983       | 4.153          |
| $\eta$                  | 0.023       | 0.357   | 0.019   | 0.382     | 0.017     | 0.368   | 0.203    | 0.195  | 0.211         | 0.552        | 0.391          |

produção de cana-de-açúcar nesses projetos públicos diminui significativamente a DAP desses usuários em relação àqueles que produzem majoritariamente frutas.

O método de expansão de ponto foi aplicado para a irrigação difusa e para o abastecimento dos municípios ao longo do Rio São Francisco. Os dados utilizados referentes à produção e ao rendimento agrícola foram extraídos do banco de dados do Sistema Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de Recuperação Automática (Sidra) (IBGE, 2012). As áreas irrigadas

da produção difusa foram delimitadas por intermédio de imagens de satélite (SILVA *et al.*, 2014). A produção agrícola nos perímetros irrigados localizados no mesmo município foi retirada utilizando relatórios da Codelvasf. A demanda de água foi estimada pelas matrizes de consumo por cultura e município (FUNARBE, 2011).

A Tabela 2 traz como exemplo a produção agrícola dos perímetros públicos pertencentes ao município e a resultante da irrigação difusa em Petrolina no ano de 2012.



**Gráfico 2 – Curvas de demanda dos perímetros irrigados Nilo Coelho, Bebedouro, Caraíbas, Tourão, Curaçá e Maniçoba usando o método programação matemática positiva (PMP).**



**Tabela 2 – Produção agrícola no município de Petrolina (ano-base 2012).**

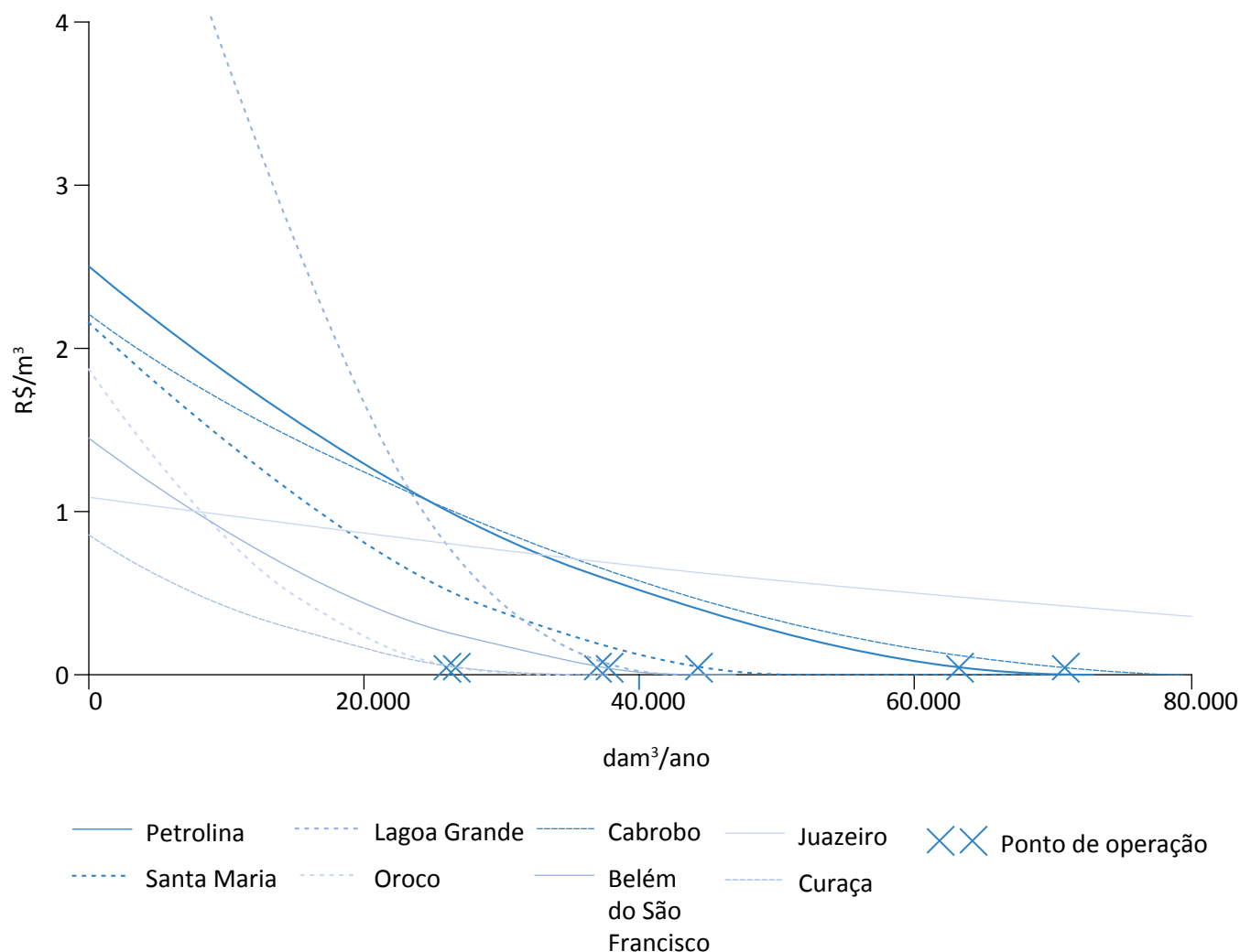
| Produção do ano<br>Petrolina (PE) | Área colhida [ha] 2012 |                      |             |          |              |         |           | Difusa   |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------|-------------|----------|--------------|---------|-----------|----------|
|                                   | Sidra                  |                      | Nilo Coelho |          | Maria Tereza |         | Bebedouro |          |
| Lavoura                           | Total                  | Valor<br>(mil reais) | Empresarial | Família  | Empresarial  | Família | Família   |          |
| Banana (cacho)<br>(toneladas)     | 1.820                  | 27.835               | 16          | 725,31   | 22,8         | 623,2   |           | 432,69   |
| Coco-da-baía<br>(mil frutos)      | 1.620                  | 13.666               | 469,40      | 686,91   | 25,1         | 71,17   |           | 367,42   |
| Goiaba<br>(toneladas)             | 2.230                  | 85.648               | 78,6        | 1.189,53 | 58,91        | 428,2   |           | 474,76   |
| Limão<br>(toneladas)              | 70                     | 1.097                | 2,5         | 16,65    |              | 1,8     |           | 49,05    |
| Mamão<br>(toneladas)              | 68                     | 707                  | 3           | 56,63    |              | 47,35   | 1,9       |          |
| Manga<br>(toneladas)              | 7.900                  | 12.902               | 2.431,28    | 3.392,77 | 449,22       | 320,2   | 88,3      | 1.218,23 |
| Maracujá<br>(toneladas)           | 200                    | 5.528                | 12,88       | 16,18    | 8            | 37      | 16,77     | 109,17   |
| Uva (toneladas)                   | 4.650                  | 35.212,20            | 1.575,55    | 1.441,91 | 713,66       | 300,68  | 192,99    | 425,21   |
| Acerola<br>(toneladas)            |                        |                      | 14,56       | 1.084,35 | 1            | 146,6   | 11,2      |          |
| Batata-doce<br>(toneladas)        | 30                     | 293                  |             | 2,5      |              | 4,50    |           | 23       |
| Cana-de-açúcar<br>(toneladas)     | 75                     | 372                  |             |          |              |         |           | 75       |
| Cebola<br>(toneladas)             | 80                     | 2.351                |             | 5,1      |              | 7,50    | 3,00      | 64,4     |
| Feijão (em grão)<br>(toneladas)   | 80                     | 312                  |             | 146,9    |              | 132,20  | 161,93    |          |
| Mamona (baga)<br>(toneladas)      | 0                      | 0                    |             |          |              |         |           | 0        |
| Mandioca<br>(toneladas)           | 235                    | 1.210                | 2           | 116,64   | 4,00         | 68,79   | 2,00      | 41,57    |
| Melancia<br>(toneladas)           | 180                    | 1.097                |             | 37,3     | 1,00         | 9,30    | 79,50     | 52,9     |
| Melão<br>(toneladas)              | 65                     | 1.047                | 2           | 21,2     | 6,00         | 1,00    |           | 34,8     |
| Milho (em grão)<br>(toneladas)    | 0                      | 0                    | 12          | 109,5    |              | 50,80   | 71,70     |          |
| Sorgo (em grão)<br>(toneladas)    | 0                      | 0                    |             |          |              |         |           |          |
| Tomate<br>(toneladas)             | 60                     | 2.532                |             | 12,6     | 4,00         | 3,20    |           | 40,2     |
| Abóbora<br>(toneladas)            |                        |                      |             | 49,5     | 1,00         | 103,95  |           |          |

O Gráfico 3 mostra as curvas de demanda dos municípios com atividade agrícola significativa no submédio do São Francisco. Para a demanda de água para irrigação difusa, foi aplicada elasticidade-preço igual a 0,48 (SCHEIERLING *et al.*, 2006).

Os resultados obtidos para a irrigação difusa nos municípios usando o método de expansão de ponto também mostram que a seleção de culturas tem grande impacto na definição das curvas de demanda de água obtidas.

Por exemplo, no município Lagoa Grande a cultura dominante é a uva (1.260 ha). Em comparação a outras

culturas como a manga (270 ha), a curva de demanda associa benefícios marginais elevando-se bastante à medida que se reduz a disponibilidade de água (maiores reduções no valor de operação). No outro extremo, no município de Juazeiro, a manga é uma das culturas mais plantadas (3.376 ha) e a uva é menos explorada (761 ha). A curva de demanda da irrigação desse município eleva-se pouco, mesmo com significativas reduções nos valores de operação. Finalmente é interessante notar que no caso da irrigação difusa, em geral desenvolvida ao longo do rio por iniciativas privadas e pequenos irrigantes, pouco se cultiva cana.



**Gráfico 3 – Curvas de demanda da irrigação difusa dos municípios de Petrolina, Santa Maria, Lagoa Grande, Orocó, Cabrobó, Belém do São Francisco, Juazeiro e Curaça usando o método de expansão de ponto.**

Em comparação com o método PMP, pode ser observado que as curvas têm elasticidade maior no início da função, e o método de expansão de ponto pode superestimar os valores marginais próximo do ponto de operação, pois se usa um valor de elasticidade constante ao longo de toda a curva. Ademais, na adaptação ao método de ponto de expansão empregado, dado pela Equação 3 (MORAES *et al.*, 2006), os valores dos benefícios econômicos atualmente obtidos representaram outra condição de contorno: a curva acentua pouco seu crescimento nas faixas de pequenas disponibilidades para representar o benefício econômico total em sua área associada. Ressalta-se que as curvas PMP não fazem o mesmo. Ou seja, áreas sob tais curvas não representam os benefícios totais, mesmo que com a regressão esse valor passe a ser finito.

Já em comparação com a metodologia de ponto de expansão original, observou-se que os resultados eram bastante similares na faixa de 60 a 100% se fosse considerada a elasticidade-preço desta última em

torno de metade da obtida pela meta-análise (0,48). Como se esperam os valores nas faixas de maior disponibilidade, a metodologia de ponto de expansão desloca-se menos em relação à metodologia PMP, por conta do uso da mesma relação funcional para as curvas de demanda.

As curvas referentes ao abastecimento dos municípios ao longo do Rio São Francisco foram determinadas pelos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2012). A Tabela 3 mostra valores referentes ao abastecimento nas cidades do estado de Pernambuco utilizando como referência o ano de 2012.

Para o abastecimento humano foi adotada a mesma metodologia de ponto de expansão deslocado, a mesma utilizada para obter as curvas de demanda da irrigação difusa. Adotou-se elasticidade-preço de  $\eta=0,46$  para obter as curvas do abastecimento nos municípios (DALHUISEN *et al.*, 2001). As curvas de demanda para

**Tabela 3 – Abastecimento dos municípios Pernambuco.**

| Município                | População total com abastecimento de água (habitantes) | Volume de água tratada em ETAs (1.000 m <sup>3</sup> /ano) | Volume de água faturado (1.000 m <sup>3</sup> /ano) | Despesa total com os serviços por m <sup>3</sup> faturado (R\$/m <sup>3</sup> ) | Tarifa média praticada (R\$/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------|--|--|---|---|--|
| Belém de São Francisco   | 20.260   | 1.254  | 669   | 0,6   | 2,84   |
| Cabrobó                  | 31.497   | 2.230  | 1.104   | 6,57  | 2,5  |
| Floresta                 | 29.973   | 1.999  | 1.082   | 1,82  | 2,99   |
| Itacuruba                | 4.475  | 330  | 219   | 0,13  | 0,12   |
| Jatobá                   | 14.087   | 1.569  | 595   | 1,31  | 2,93   |
| Lagoa Grande             | 23.308   | 1.381  | 534   | 1,54  | 2,2  |
| Orocó                    | 13.536   | 412  | 233   | 2,08  | 2,36   |
| Petrolândia              | 33.273   | 2.461  | 1.200   | 0,96  | 2,99   |
| Petrolina                | 305.352  | 21.363   | 11.812  | 1,13  | 2,66   |
| Santa Maria da Boa Vista | 39.816   | 1.552  | 712   | 1,15  | 2,4  |
| Total                    | 515.577  | 34.551   | 18.161  |   |  |

ETA: estação de tratamento de água.

os municípios no estado de Pernambuco podem ser observadas no Gráfico 4.

O abastecimento dos municípios ao longo do Rio São Francisco tem benefícios marginais (valores econômicos) mais elevados nos seus pontos de operação em comparação com os usos de água para irrigação difusa. Os pontos de operação do abastecimento humano envolvem em geral quantidades de água bem menores do que a irrigação, o que explicaria o maior valor de uma unidade adicional do recurso nesse ponto. Diferenças significativas entre as curvas de demanda do abastecimento humano dos diversos municípios foram observadas e podem ser explicadas por conta das distintas características dos seus sistemas de

abastecimento de água, tais como perdas, tarifas praticadas e despesas.

Uma investigação efetuada na região de Piranhas-Açu (DENIS *et al.*, 2011), que apresenta algumas características climáticas e econômicas semelhantes a nossa área de estudo, utilizou custos médios (ponto de operação) na mesma ordem de grandeza para o setor de abastecimento humano. Na região do submédio do Rio São Francisco os custos médios são de 0,67 R\$/m<sup>3</sup>, e na região de Piranhas-Açu os custos foram de 0,59 a 0,96 R\$/m<sup>3</sup>. Já os benefícios variaram em função da arrecadação muito diferente das companhias de abastecimento de água em cada município.

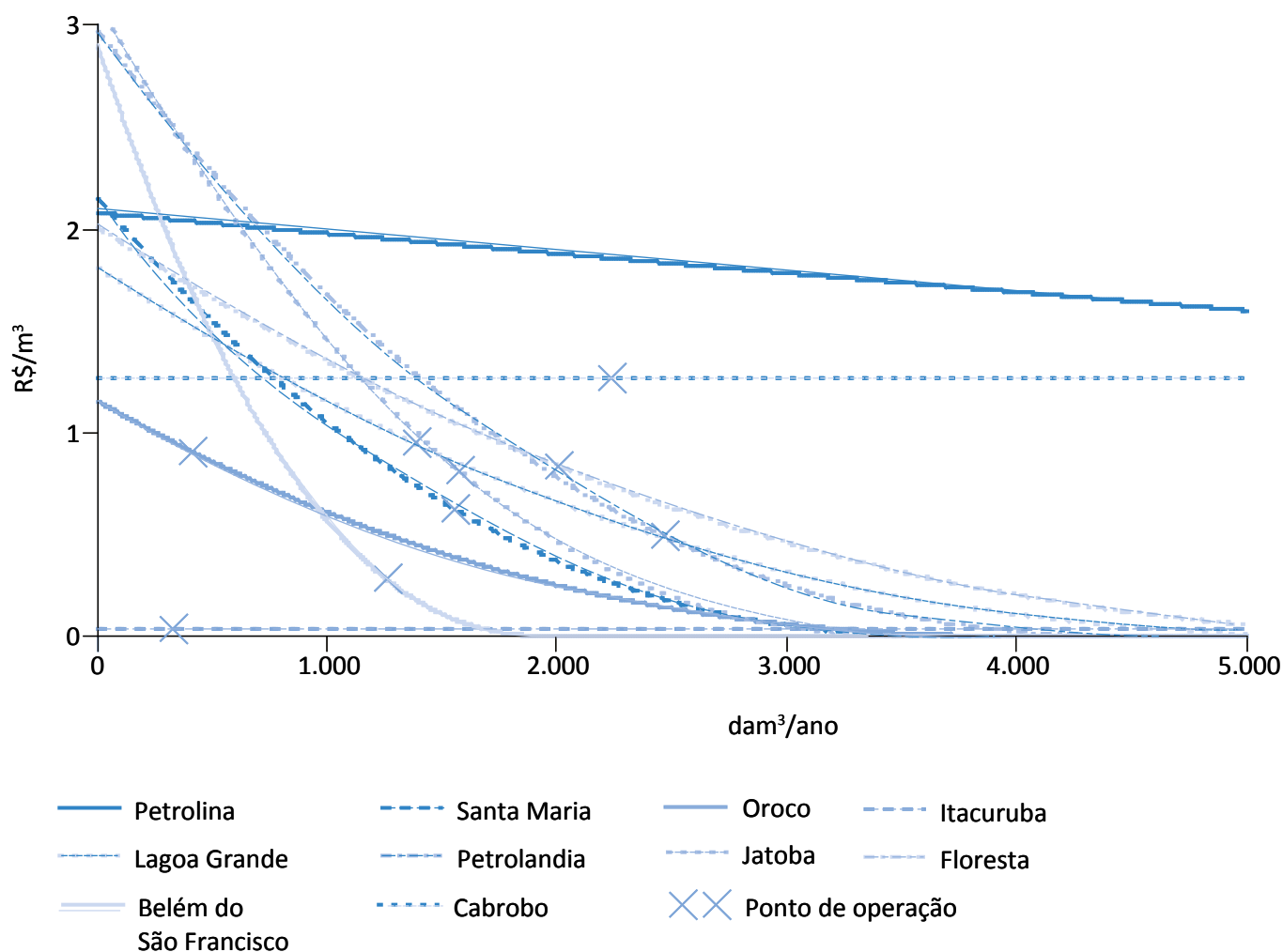


Gráfico 4 – Curvas de demanda do abastecimento humano dos municípios de Petrolina, Lagoa Grande, Santa Maria, Petrolândia, Oroco, Jatobá, Itacuruba, Floresta, Belém do São Francisco e Cabrobó usando o método de expansão de ponto.

## CONCLUSÕES

As curvas de demanda da água mostram características variáveis, em função das propriedades dos usuários e das mudanças nas condições observadas. A PMP adaptou-se bem às condições de dados existentes para os perímetros irrigados localizados no submédio do Rio São Francisco. Os resultados do método de expansão de ponto mostraram similaridades nas ordens de grandeza dos valores nas curvas de demanda obtidas com a PMP.

O método de expansão de ponto é bem mais simples do que a PMP e menos intensivo em dados, mas deve-se ter clareza acerca de suas limitações, como, por exemplo, o uso da elasticidade-preço constante na curva de demanda e do custo médio no ponto de operação como uma *proxy* do custo marginal. Para a última observação, ressalta-se que no caso da irrigação difusa, como em geral ela é desenvolvida por iniciativas pri-

vadas e pequenos irrigantes, se espera que ela esteja operando num ponto próximo do ótimo e, assim, que o custo médio seja igual ao marginal. Relativo aos valores de elasticidade-preço constantes, os valores de elasticidade-preço variáveis podem ser facilmente obtidos pelo método PMP, que foi aplicado nos perímetros públicos. Esses valores podem auxiliar na verificação da consistência dos valores constantes ora utilizados no método de expansão do ponto.

Salienta-se a necessidade de estudos como este para que sejam validados os parâmetros necessários à aplicação de modelos hidroeconômicos. Análises de sensibilidade concernentes aos parâmetros das curvas ora obtidos, quando do uso de tais curvas para a obtenção da solução de alocação econômica ótima, são recomendadas na tomada de decisão e na avaliação de políticas de água.

## REFERÊNCIAS

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Cobrança pelo uso de recursos hídricos de domínio da União na bacia do São Francisco*. 2014. Disponível em: <[http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cobrancaearrecadacao/BaciaSF\\_Inicial.aspx](http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cobrancaearrecadacao/BaciaSF_Inicial.aspx)>. Acesso em: 20 dez. 2014.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Outorgas emitidas pela ANA: 2001-2013*. 2013. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/institucional/SobreaAna/uorgs/sof/geout.aspx>>. Acesso em: 2013.
- BOOKER, J. F.; MICHELSEN, A. M.; HOWITT, R. E.; YOUNG, R. A. Economics and the modeling of water resources and policies. *Natural Resource Modeling Journal*, v. 25, n. 1, 2012. DOI: 10.1111/j.1939-7445.2011.00105.x
- BRASIL. MIN – Ministério da Integração Nacional. *Plano estratégico de desenvolvimento sustentável do semi-árido*. Brasília: MIN, 2005.
- BRASIL. MMA – Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). *Resolução CNRH n.º 108, de 13 de abril de 2010*. Brasília, 2010.
- CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. *Relatório de Gestão*. Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco. 2006.
- DALHUISEN, J. M.; FLORAX, R. J. G. M.; GROOT, H. L. F. M.; NIJKAMP, P. Price and income elasticities of residential water demand: why empirical estimates differ. *Tinbergen Institute Discussion Paper*, Amsterdã, n. 01-057/3, 2001.
- DENYS, E. *et al. Oficina para apresentação de resultados de disponibilidade de água e demanda presente e futuras bacias do Jaguaribe e piranhas-açu, com discussão sobre desafios detectados na alocação de água no contexto de mudanças climáticas*. Relatório de pesquisa. ed. [S.l.]: [s.n.], 2011.

EMPRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Solos do submédio do vale do São Francisco*. Petrolina: Embrapa, 2008.

FIGUEIREDO, L. E. N. & MORAES, M. M. G. A. A demanda da água para irrigação para os perímetros públicos do submédio do Rio São Francisco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., 2015. *Anais...*, Brasília, 2015.

FUNARBE – FUNDAÇÃO ARTHUR BERNARDES. *Desenvolvimento de matriz de coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil*. Brasília, 2011.

GRIFFIN, R. C. *Water resource economics: the analysis of scarcity, policies, and projects*. Cambridge: MIT Press, 2006.

HAROU, J. J.; PULIDO-VELAZQUEZ, M.; ROSENBERG, D. E.; MEDELLIN-AZUARA, J.; LUND, J.; HOWITT, R. Hydro-economic models: concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, p. 627-643, 2009. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.037.

HOWITT, R. E. Positive mathematical programming. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 77, n. 2, p. 329-342, 1995.

HOWITT, R. E.; MEDELLÍN-AZUARA, J.; MACEWAN, D.; LUND, J. R. Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Environmental Modelling & Software*, v. 38, p. 244-258, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Agropecuário 2006*. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção agrícola municipal*. 2012. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 12 jun. 2014.

LIPSEY, R. G. *First principles of economics*. Oxford: Colin Harbury, 1988.

MANETA, M.; TORRES, M. O.; WALLENDER, W.; HOWITT, R. E.; VOSTI, S.; RODRIGUES, L.; BASSOI, L. A spatially distributed hydro-economic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. *Water Resources Research*, v. 45, 2009. DOI: 10.1029/2008WR007534

MEDELLIN-AZUARA, J.; HOWITT, R. E.; WALLER-BARRERA, C.; MENDOZA-ESPINOSA, L. G.; LUND, J. R.; TAYLOR, J. E. A calibrated agricultural water demand model for three regions in northern baja California. *Agrociência*, v. 43, n. 2, p. 83-96, 2009.

MORAES, M. M. G. A. D. *et al.* SSD espacial para la gestión óptima de sistemas de recursos hídricos incorporando modelos hidroeconómicos. In: SOLERA, B. S.; PAREDES, J.; ANDREU, J.; PEDRO, M. *Aplicaciones de sistemas soporte a la decisión en planificación y gestión integradas de cuencas hidrográficas*. Barcelona: Marcombo, 2013.

MORAES, M. M. G. A.; SAMPAIO, Y.; CIRILO, J. A. Integração dos componentes econômico e hidrológico na modelagem de alocação ótima de água para apoio a gestão de recursos: uma aplicação na bacia do Pirapama. *Revista Economia*, v. 7, n. 2, 2006.

SCHEIERLING, S. M.; LOOMIS, J. B.; YOUNG, R. A. Irrigation water demand: a meta-analysis of price elasticities. *Water Resources Research*, v. 42, n. 1, 2006. DOI: 10.1029/2005WR004009.

SILVA, G. S. D.; MORAES, M. M. G. A. D.; SILVA, A. C. S. D. Delimitação das áreas irrigadas no trecho do sub-médio do Rio São Francisco. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DE NORDESTE, 12., Natal, 2014. *Anais...*, Natal, 2014.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento*. Brasília: PMSS, 2012.

TILMANT, A.; PINTE, D.; GOOR, Q. Assessing marginal water values in multipurpose multireservoir systems via stochastic programming. *Water Resources Research*, v. 44, n. 12, 20 dez. 2008.

TORRES, M. O.; MANETA, M.; HOWITT, R. E.; VOSTI, S. A.; WALLENDER, W. W.; BASSOI, L. H.; RODRIGUES, L. N. Economic impacts of regional water scarcity in the São Francisco River Basin, Brazil: an application of a linked hydro-economic model. *Environment and Development Economics*, v. 17, n. 2, p. 227-248, 2012. DOI: 10.1017/S1355770X11000362

VARIAN, H. R. *Microeconomia: conceitos básicos*. 7. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

VERA, L. H. A. *Atuação da cobrança pelo uso da água de domínio da União como instrumento de gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio São Francisco*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade FEderal de Pernambuco, Recife, 2014.