

INÉRCIA HÍDRICA: UMA VARIÁVEL EXPLICATIVA PARA A REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES MÉDIAS E MÍNIMAS

Renata del G. Rodriguez¹; Fernando F. Pruski²; João F. Souza³; José M. A. da Silva⁴, Adonai B. de Camargo⁵ & Mirian C. M. Ferrão⁶

RESUMO = Como a variabilidade espacial da disponibilidade hídrica é decorrente da combinação de diversos fatores, como as características físicas e climáticas, a estimativa de seus valores se torna um problema complexo na regionalização de vazões. O objetivo do trabalho foi avaliar as variações decorrentes do uso das precipitações e da inércia hídrica nos modelos de regionalização da vazão média de longa duração e da vazão associada à permanência de 95%. O método de regionalização utilizado foi o tradicional. As variáveis independentes foram a área de drenagem, a vazão equivalente ao volume precipitado (a qual consiste na precipitação média anual referente a uma área de drenagem multiplicada pela área e convertida em $m^3 s^{-1}$) e as vazões equivalentes ao volume precipitado considerando uma diminuição da inércia hídrica igual a 700 (P_{eq700}) e 750 mm (P_{eq750}) (as quais consistem na precipitação média anual menos a inércia hídrica de 700 ou 750mm multiplicada pela área e convertida em $m^3 s^{-1}$). A consideração da precipitação média anual menos a inércia hídrica possibilitou ajustes das equações de regionalização das vazões média de longa duração e da Q₉₅ mais precisos na maior parte das sub-bacias do São Francisco.

ABSTRACT = Water resource space variability occurs as combination of several factors: physical and climate characteristics. To estimate values is complex in hydrologic regionalization. The objective of this work is to evaluate variations from precipitation data and hydrological inertia in regionalization models relating long term discharge average and the discharges with 95% (Q₉₅) permanence. The regionalization method applied was: traditional. Independents variables are: drainage area, equivalent discharge from rain precipitation volume (average annual precipitation in defined area, converted in $m^3 s^{-1}$) and equivalent discharge (precipitation less hydrological inertia: 700 (P_{eq700}) e 750 ((P_{eq750})). Regionalization equations for long-term discharges and Q₉₅ which take annual rainfall less the hydrological inertia are more accurate estimated in the most São Francisco sub-basins.

Palavras-chave: disponibilidade hídrica, inércia hídrica.

¹ Doutora em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa – e-mail: rdgrodiguez@uol.com.ufv.br

² Professor titular – Universidade Federal de Viçosa – e-mail: ffpruski@ufv.br

³ Estudante de pós-graduação – Universidade Federal de Viçosa – e-mail: qgfelipe@yahoo.com.br

⁴ Engº Civil – Universidade Federal de Viçosa – e-mail: jmarcio@gprh.ufv.br

⁵ Engº Ambiental – Universidade Federal de Viçosa – e-mail: adonaibruneli@yahoo.com.br

⁶ Engº Ambiental – Universidade Federal de Viçosa – e-mail: mirianmilagres@yahoo.com.br

1 INTRODUÇÃO

A regionalização de vazões é uma técnica utilizada para a obtenção das disponibilidades hídricas ao longo de toda hidrografia, a partir da transferência de informações de um local para outro.

A variabilidade espacial da disponibilidade hídrica é decorrente da combinação de diversos fatores, como as características físicas e climáticas do local de interesse, desta forma a estimativa de seus valores se torna um problema complexo.

Dentre as características físicas da bacia mais usadas em estudos de regionalização, está a área de drenagem, uma vez que esta variável possui em geral boa correlação com as outras características da bacia (Pilgrim, citado por Catalunha (2004).

A variável climática mais utilizada em estudos de regionalização de vazões é a precipitação média anual. Embora esta variável seja explicativa do processo de formação das vazões mínimas e médias, considera-se que esta não reflete efetivamente a contribuição para a formação destas vazões. Deste modo, Novaes (2005) propôs o conceito de inércia hídrica, que corresponde à precipitação mínima necessária para garantir a recarga do lençol freático. Portanto, para que haja a ocorrência do escoamento no leito do rio advindo da contribuição subterrânea, é necessário que, primeiramente, a precipitação venha suprir o déficit de água existente ao longo da zona de aeração, que, por sua vez, é dependente da demanda evapotranspirométrica. Desta forma, a utilização da variável que representa a inércia hídrica pode contribuir para o aperfeiçoamento dos modelos de regionalização de vazões.

Tendo em vista a importância da regionalização de vazão para o conhecimento da disponibilidade hídrica na hidrografia o presente trabalho tem como objetivo avaliar as variações decorrentes do uso das precipitações e da inércia hídrica nos modelos de regionalização da vazão média de longa duração e da vazão associada à permanência de 95%.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram escolhidas para o presente estudo 283 estações pluviométricas e 145 estações fluviométricas situadas na bacia do São Francisco (Figura 1), pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional das Águas (ANA). Foi utilizada uma série histórica de 24 anos (período-base de 1979 a 2002) com dados de vazões diárias.

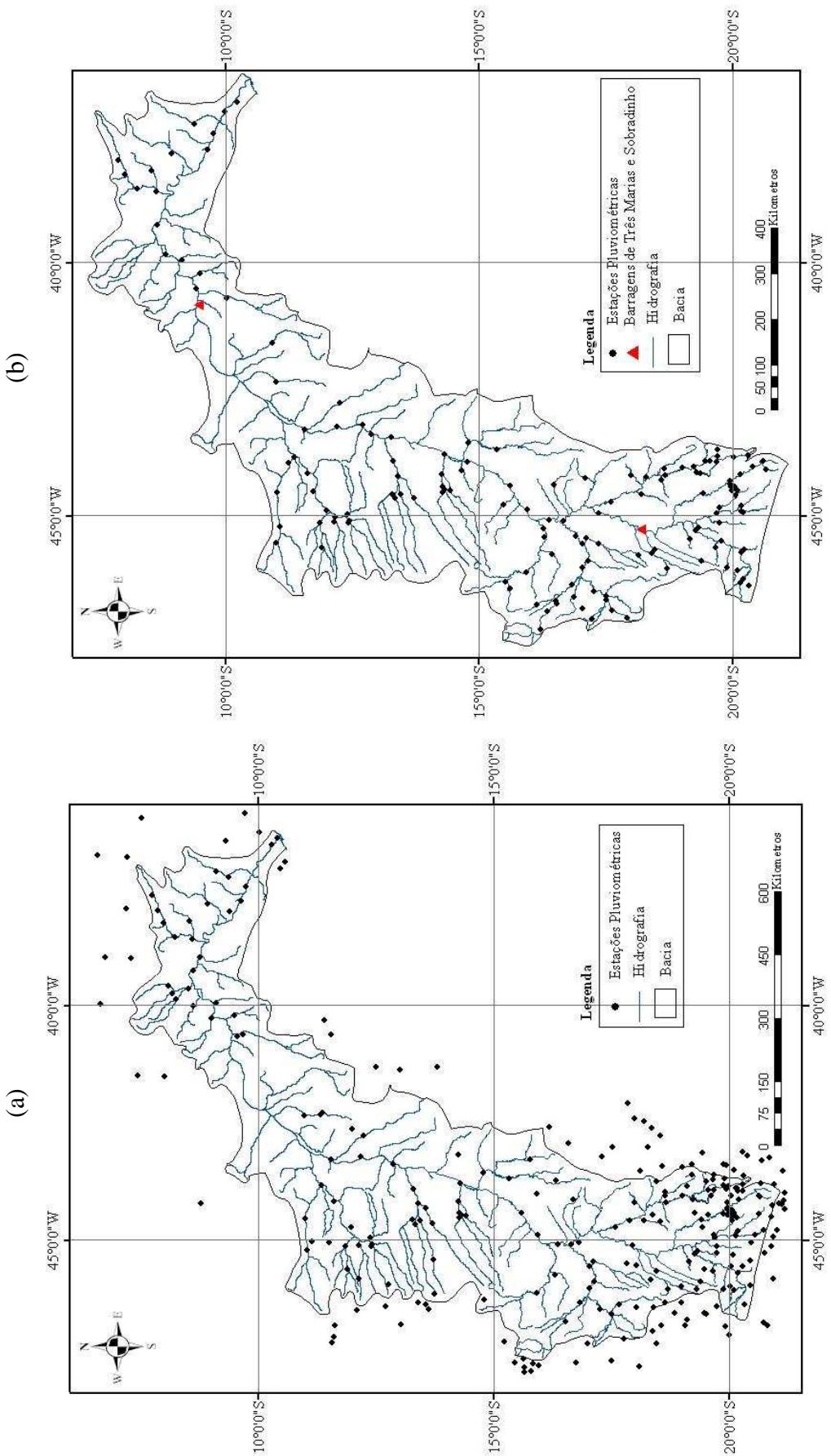


Figura 1 - Localização das estações pluviométricas (a); e fluviométricas (b) utilizadas no estudo, bem como das barragens de Três Marias e Sobradinho.

As variáveis dependentes utilizadas para a regionalização de vazões foram a vazão média anual de longa duração (Q_{mld}) e a vazão associada à permanência de 95% (Q_{95}), as quais foram calculadas pelo a partir de séries de dados diários nas 145 estações fluviométricas, pelo programa SisCAH - Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (UFV, 2008).

As variáveis independentes utilizadas no estudo representam as características físicas e climáticas da bacia.

A característica física da bacia utilizada no estudo foi a área de drenagem, a qual foi obtida na rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb). Outras variáveis de quantificação possível a partir da bacia hidrográfica e de uso freqüente em estudos de regionalização de vazões são o comprimento do rio principal e a densidade de drenagem. Entretanto estas foram descartadas, uma vez que, considerando o processo de formação das vazões médias e mínimas, evidencia-se que estas variáveis têm pequena interferência em relação ao processo de geração destas vazões além de acarretarem, em alguns casos, problemas de caráter operacional.

Apesar da densidade de drenagem interferir na concentração do escoamento superficial, esta apresenta uma grande variação com a escala utilizada para a sua determinação, além de ter uma influência muito mais acentuada no escoamento superficial do que no escoamento subterrâneo. Em relação ao comprimento do rio principal, o seu uso na regionalização é pouco representativo das condições reais, uma vez que uma pequena variação do seu valor pode acarretar como consequência uma mudança brusca na área entre uma posição de montante e de jusante de uma confluência, advindo da contribuição de um afluente.

Como a variação da precipitação reflete diretamente no comportamento das vazões específicas, considera-se que a inclusão da precipitação como variável explicativa das vazões pode representar uma expressiva melhoria do modelo de regionalização. Desta forma, a variável climática utilizada no estudo de regionalização foi a precipitação média de longa duração.

Para tanto foram utilizados os dados das 283 estações pluviométricas e interpolados por krigagem. Com base neste mapa foi calculada a precipitação média nas áreas de drenagem das 145 estações fluviométricas estudadas.

Embora a precipitação média anual seja uma variável explicativa do processo de formação das vazões mínimas e médias, considera-se que esta não reflete efetivamente a contribuição para a formação destas vazões. Deste modo, utilizou-se o conceito de inércia hídrica proposto Novaes (2005) o qual corresponde à precipitação mínima necessária para garantir a recarga do aquífero freático.

Cada bacia deve apresentar um valor de inércia hídrica, sendo este tanto maior quanto maiores forem a evapotranspiração da bacia, as capacidades de retenção de água no solo e da interceptação da cobertura vegetal. Para a bacia do Paracatu, Novaes (2005) estimou que, para precipitações médias anuais inferiores a 750 mm, a vazão deve se tornar nula no início do período de recessão. Desta forma, a utilização da variável que representa a inércia hídrica pode contribuir para o aperfeiçoamento dos modelos de regionalização de vazões. Para tanto, utilizou-se o valor de 750 mm, proposto por Novaes (2005) e de 700 mm, o qual foi obtido a partir de testes preliminares realizados.

Para a consideração da inércia hídrica foi subtraído um valor correspondente a 750 e 700 para cada pixel do mapa referente à precipitação média anual, sendo atribuído o valor zero quando a inércia foi maior que a precipitação. Uma vez obtidos os valores em cada pixel, calculou-se o valor médio nas áreas de drenagem das 145 estações fluviométricas estudadas.

Utilizou-se, ao invés de área de drenagem e da precipitação, uma única variável, representada pela equação

$$P_{eq} = \frac{P A}{k} \quad (1)$$

em que

- P_{eq} = vazão equivalente ao volume precipitado, $m^3 s^{-1}$;
- P = precipitação média anual na área de drenagem considerada, mm;
- A = área de drenagem, km^2 ; e
- k = fator de conversão, o qual é igual a 31.536.

O uso de uma única variável além de permitir uma representação bidimensional da relação entre as variáveis dependentes e independentes, também permitiu o ganho de um grau de liberdade na análise estatística.

Assim como para a precipitação, para a consideração da precipitação menos a inércia hídrica de 700 mm, também utilizou-se uma única variável representada pela equação

$$P_{eq700} = \frac{(P - 700) A}{k} \quad (2)$$

em que P_{eq700} é igual a vazão equivalente ao volume precipitado considerando uma diminuição da inércia hídrica igual a 700 mm, $m^3 s^{-1}$.

O mesmo procedimento também foi realizado para a consideração da precipitação menos a inércia hídrica de 750 mm.

Desta forma, as variáveis independentes utilizadas foram a área de drenagem (A), a vazão equivalente ao volume precipitado (P_{eq}) e a vazão equivalente ao volume precipitado considerando uma diminuição da inércia hídrica igual a 700 mm (P_{eq700}) e 750 mm (P_{eq750}).

O método de regionalização utilizado foi o método tradicional, o qual consiste na definição prévia das regiões hidrologicamente homogêneas e, em um segundo momento, na obtenção das equações que permitem associar a vazão com variáveis topológicas e climáticas. Para a aplicação deste método de regionalização utilizou-se o software Sistema Computacional para a Regionalização de Vazões (SisCoRV) (UFV, 2008).

A seleção do melhor ajuste da equação de regionalização foi com base no erro relativo entre a vazão estimada com base nos dados observados na estação fluviométrica e a vazão estimada pela equação de regionalização, como mostra a equação

$$ER = \left(\frac{Q_{obs} - Q_{reg}}{Q_{obs}} \right) 100 \quad (3)$$

em que

ER = erro relativo, %;

Q_{obs} = vazão estimada com base nos dados observados na estação fluviométrica, $m^3 s^{-1}$; e

Q_{reg} = vazão estimada pelo modelo de regionalização, $m^3 s^{-1}$.

As variáveis hidrológicas analisadas foram espacializadas na base hidrográfica ottocodificada desenvolvida pela ANA na escala de 1:1.000.000 em formato shape.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Regionalização da vazão média de longa duração – Q_{mld}

Na Figura 2 é apresentado o mapa da bacia do São Francisco com as regiões homogêneas selecionadas pelo método tradicional.

A região 1 (com oito estações fluviométricas) abrange os pequenos afluentes do rio São Francisco situados a montante de Três Marias, compreendendo os rios Samburá, Ajudas, Bambuí,

São Miguel, Mateus Grande, Marmelada, Indaíá e Borrachudo, mais o rio dos Tiros, situado a jusante desta represa.

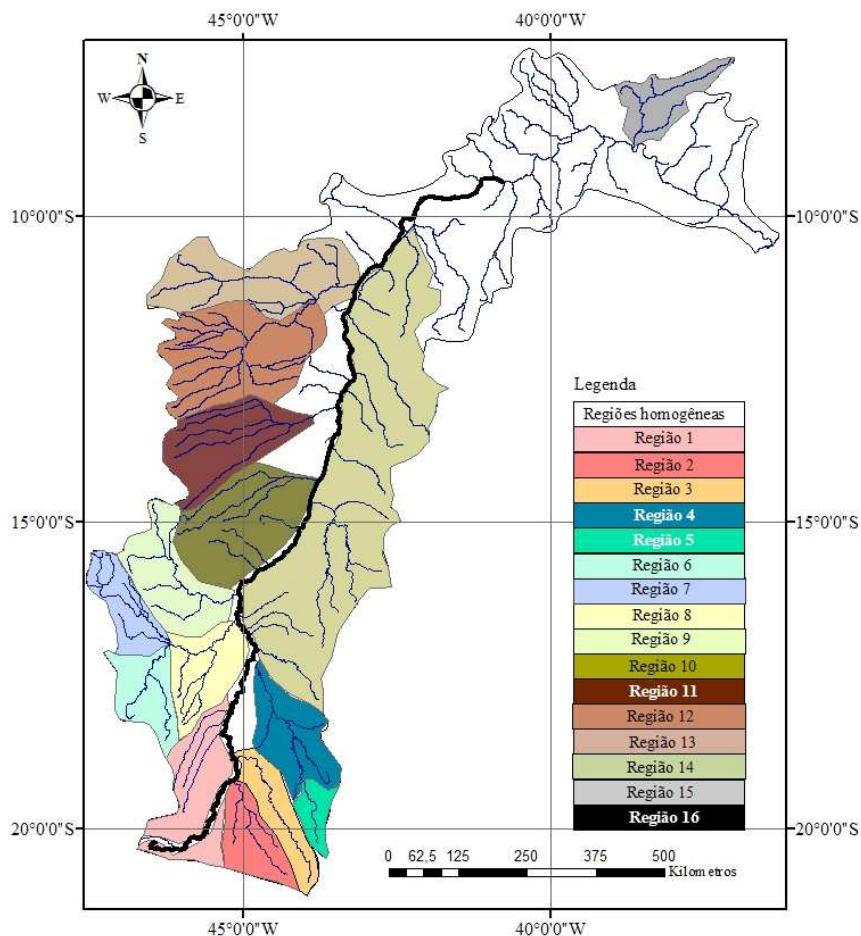


Figura 2 – Regiões homogêneas consideradas para a regionalização da vazão média de longa duração na bacia do São Francisco pelo método tradicional.

As regiões 2 e 3 compreendem as bacias do Pará (com oito estações fluviométricas) e Paraopeba (com 12 estações fluviométricas), respectivamente. A bacia do rio das Velhas teve que ser dividida em duas regiões: a região 4 (com 11 estações fluviométricas) que vai até a confluência com o rio Jequitibá (incluído nesta região), e a região 5 (com sete estações fluviométricas), que compreende o restante da bacia.

A bacia do Paracatu também foi dividida em três regiões homogêneas: a região 6 (com seis estações fluviométricas), que vai da cabeceira do rio Paracatu até a confluência com o ribeirão Entre Ribeiros, a região 7 (com oito estações fluviométricas), que abrange as sub-bacias do Entre Ribeiros e do Preto, e a região 8 (com sete estações fluviométricas), que abrange o restante da bacia.

A região 9 (com seis estações fluviométricas) corresponde à bacia do Urucuia. A região 10 (com sete estações fluviométricas) engloba as bacias do Carinhanha, do Japoré e do Pandeiros e a região 11 (com sete estações fluviométricas) corresponde à bacia do rio Corrente.

A bacia do rio Grande foi dividida em duas regiões. A região 12 (com dez estações fluviométricas) compreende a área da cabeceira até a confluência com o rio Preto e a 13 (com cinco estações fluviométricas) abrange este afluente e o restante da bacia.

A região 14 (com seis estações fluviométricas) corresponde à parte Leste da bacia, desde a confluência do rio das Velhas até o rio Verde, abrangendo, portanto, os rios Jequitaí, Pacuí, Verde Grande, Paramirim e o Verde.

A região 15 (com cinco estações fluviométricas) corresponde à bacia do Pajeú e a região 16 (com 16 estações fluviométricas) refere-se à calha do São Francisco até Sobradinho. No restante da bacia não foi possível a seleção de nenhuma região homogênea, uma vez que os ajustes realizados não apresentaram bons resultados estatísticos.

3.1.1 Análise dos modelos de regionalização

No Quadro 1 são apresentadas as amplitudes de variação dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes para as principais bacias ou regiões na bacia do São Francisco. Para fins de análise os erros negativos presentes neste quadro correspondem a superestimativa das vazões estimadas, enquanto os positivos, às subestimativas.

Na região 1 não ocorreu uma melhora expressiva entre o uso das quatro variáveis independentes nesta região tendo uma variação dos erros de -30 a 30%. Nas comparações realizadas para a bacia do rio Pará, o melhor ajuste obtido foi com base na vazão equivalente ao volume precipitado. Na bacia do Paraopeba os erros foram inferiores a 30% (valor em módulo) com o uso de ambas as variáveis idenpendentes.

Já para a bacia do rio das Velhas os erros apresentaram amplitudes superiores aos das três outras bacias em todas as combinações, sendo os erros maiores que 50% (valor em módulo). A maior quantidade de estações com erros inferiores a 10% ocorreu quando utilizada a variável P_{eq700} .

Na bacia do Paracatu, as combinações realizadas apresentaram uma tendência de diminuição dos erros quando utilizadas as variáveis na seguinte ordem: área, vazão equivalente ao volume precipitado, P_{eq700} e P_{eq750} .

Das combinações realizadas para a bacia do Urucuia, a com base na vazão equivalente ao volume precipitado apresentou a menor variação dos erros e o maior número de estações com erros inferiores a 10% (quatro das seis estações presentes na bacia).

Quadro 1 – Amplitudes de variações (Δ) dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes para as principais bacias ou regiões na bacia do São Francisco

| Bacias ou regiões | $\Delta(A)$ | $\Delta(P_{eq})$ | $\Delta(P_{eq700})$ | $\Delta(P_{eq750})$ |
|-------------------|--|--|--|---|
| Região 1 | -30,0 a 30,5 | -23,0 a 26,9 | -29,8 a 23,7 | -29,7 a 22,2 |
| Pará | -12,1 a 8,1 | -6,2 a 5,4 | -18,6 a 6,5 | -16,0 a 11,7 |
| Paraopeba | -12,2 a 26,4 | -14,3 a 26,6 | -18,2 a 27,7 | -21,0 a 25,7 |
| Velhas | -80,6 a 34,1 | -70,8 a 34,0 | -63,0 a 47,3 | -62,9 a 50,0 |
| Paracatu | -30,3 a 19,5 | -22,5 a 17,8 | -17,9 a 15,9 | -17,6 a 15,9 |
| Urucuia | -21,6 a 17,4 | -18,0 a 11,7 | -19,8 a 15,9 | -22,3 a 17,2 |
| Carinhanha | -29,7 a 23,1 | -25,1 a 22,0 | -14,9 a 21,5 | 12,4 a 21,4 |
| Corrente | -62,9 a 19,1 (-4,5 a 19,1) ¹ | -64,9 a 19,7 (-4,8 a 19,7) ¹ | -69,2 a 21,1 (-5,5 a 21,1) ¹ | -70,5 a 21,4 (-5,8 a 21,4) ¹ |
| Grande | -299,8 a 40,0 (-38,6 a 40,0) ² | -212,4 a 38,4 (-37,3 a 38,4) ² | -110,3 a 35,3 (-30,8 a 35,3) ² | -93,5 a 36,8 (-28,8 a 36,8) ² |
| Região 14 | - | - | -15,5 a 21,6 | -69,8 a 38,1 |
| Pajeú | -42,5 a 27,2 | -43,1 a 23,9 | - | - |
| Rio São Francisco | -29,9 a 15,4 | -14,9 a 10,5 | -5,9 a 8,6 | -6,5 a 8,1 |

¹ Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Mocambo, localizada no rio do Meio.

² Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Fazenda Coqueiro, localizada no ribeirão São Desidério.

Na bacia do Carinhanha os erros foram inferiores a 30% (valor em módulo), tendo a menor amplitude de variação dos erros ocorrido tanto em função da P_{eq700} como da P_{eq750} . Embora com o uso destas duas variáveis os erros tenham sido semelhantes, ocorreu o maior número de estações com erros inferiores a 9% quando aplicada a P_{eq750} . A bacia do Carinhanha juntamente com as bacias dos rios Japoré e Pandeiros compuseram uma região homogênea, em que os erros nas seções localizadas nestes rios quando considerado o melhor ajuste P_{eq750} foram de 6,1 e -26,3%, respectivamente.

A estação Mocambo situada na bacia do Corrente apresentou erros elevados na aplicação das quatro variáveis independentes. Fazendo uma análise dos erros sem considerar o desta estação observa-se que os erros foram inferiores a 21%, embora não ocorrendo uma variação expressiva dos erros, uma maior quantidade de erros inferiores a 5% ocorreu quando as vazões foram estimadas em função da área e da vazão equivalente ao volume precipitado.

Na bacia do rio Grande a estação Fazenda Coqueiro também apresentou erros elevados na aplicação das quatro variáveis independentes. Fazendo uma análise dos erros nas estações situadas nesta bacia sem considerar o erro desta estação, verifica-se que não ocorreram grandes variações dos erros em função de qualquer uma das quatro variáveis pelo método tradicional. Entretanto no ajuste utilizando a P_{eq750} ocorreu a maior quantidade de estações com erros inferiores a 10% (sete das 15 estações situadas na bacia).

Na região 14 foi possível fazer a regionalização apenas utilizando a P_{eq700} e a P_{eq750} , sendo os menores erros evidenciados para a P_{eq700} , os quais foram inferiores a 21% (valor em módulo).

Devido à grande oscilação das vazões na calha do São Francisco a jusante de Sobradinho, bem como o pequeno número de estações nesta região, não foi possível também a regionalização de vazões nesta região. O único ajuste permissível foi na bacia do rio Pajeú tendo como variáveis independentes a área e a vazão equivalente ao volume precipitado, uma vez que os usos da precipitação menos 700 e 750 mm geraram valores de P_{eq700} e de P_{eq750} iguais a zero para algumas estações desta bacia. Os ajustes em função da área e da vazão equivalente ao volume precipitado na bacia do rio Pajeú apresentaram erros relativos semelhantes.

O rio São Francisco a consideração da vazão equivalente ao volume precipitado proporcionou uma diminuição dos erros quando comparado ao ajuste em função da área. Os ajustes ainda foram mais precisos quando considerada a P_{eq700} e a P_{eq750} , sendo os erros relativos em todas as estações fluviométricas inferiores a 10%.

Considera-se um outro aspecto importante que ainda pode ser analisado na seleção da melhor variável, seja a análise do gráfico da Q_{mld} em função da área de drenagem, sabendo-se que a declividade da curva correspondente a este gráfico irá representar a vazão específica. Na Figura 3 são apresentadas as vazões médias anuais de longa duração, no rio São Francisco até a represa de Sobradinho, estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas e considerando as quatro variáveis analisadas.

A equação de regressão ajustada em função da área de drenagem apresentou uma variação progressiva da declividade, comportamento este advindo de um ajuste feito em função da própria variável considerada na abscissa. A inserção da vazão equivalente ao volume precipitado proporcionou mudanças de declividade um pouco maiores quando comparado ao ajuste em função da área, sendo estas ainda mais acentuadas quando utilizada a P_{eq700} e a P_{eq750} . Desta forma a incorporação destas duas últimas variáveis refletiram mais efetivamente as contribuições dos afluentes na vazão do rio São Francisco, como observa-se sobretudo na Figura 4. Nesta figura está representada as Q_{mld} estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas e em

função da P_{eq750} , bem como as vazões a jusante das confluências dos rios Paracatu, Paramirim e Grande.

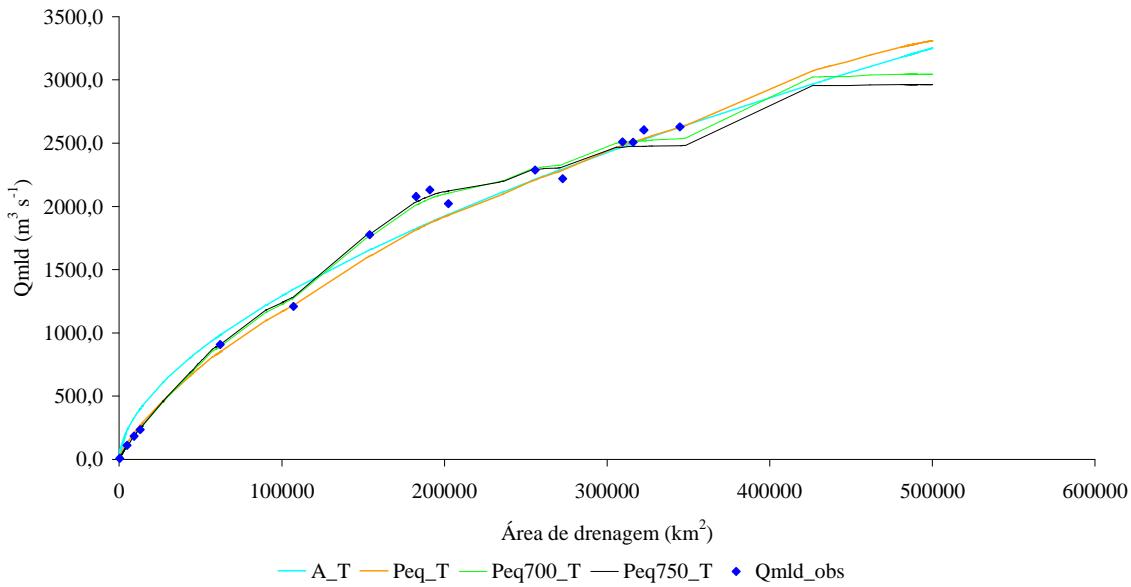


Figura 3 – Vazões médias anuais de longa duração estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas, e as vazões estimadas em função da área (A), da P_{eq} , da P_{eq700} e da P_{eq750} pelo Tradicional (T).

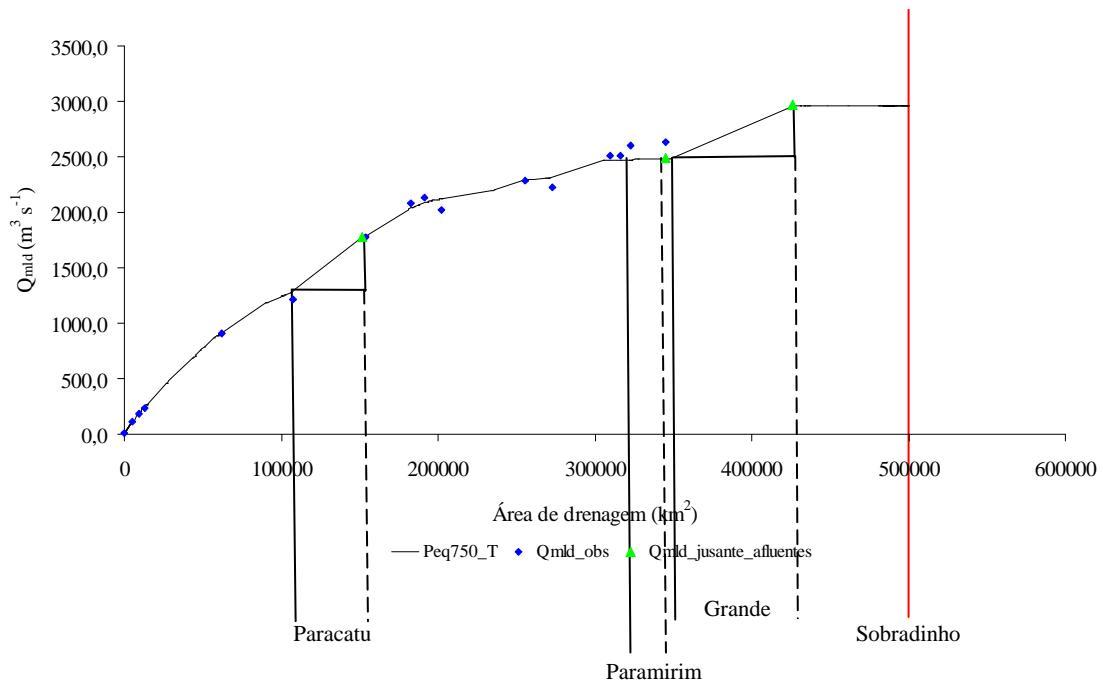


Figura 4 – Vazões médias anuais de longa duração estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas (Qmld_obs) e em função da P_{eq750} , bem como a representação das vazões de contribuição das bacias dos rios Paracatu, Paramirim e Grande no rio São Francisco.

Dentre os afluentes do rio São Francisco, os rios Grande e Paracatu são os que apresentam as maiores áreas de drenagem, com 78.491 km^2 (Pereira, 2004) e 45.600 km^2 (BRASIL, 1996), respectivamente. Embora a área de drenagem da bacia do Grande seja 72% superior à da bacia do Paracatu, observa-se na Figura 4, que ocorreu uma maior declividade da curva ajustada no trecho correspondente à área de drenagem da bacia do Paracatu quando comparada à declividade no trecho do Grande, o que representa uma maior contribuição da bacia do Paracatu na formação da vazão do rio São Francisco.

Isto condiz com os resultados evidenciados por Pereira (2004) e por ANA (2004a) que mostra que embora a bacia do Paracatu tenha a segunda maior área de drenagem da bacia do São Francisco, é responsável pela maior contribuição na formação da vazão do rio São Francisco, enquanto a bacia do Grande apresenta a terceira maior contribuição atrás do rio das Velhas. Segundo o primeiro autor o comportamento destas bacias é decorrente de precipitações médias anuais mais baixas e de evapotranspirações potenciais superiores na bacia do Grande em relação à do Paracatu, contribuindo, portanto, para a menor conversão da precipitação ocorrida no Grande para a formação da vazão do rio São Francisco.

O comportamento constante da vazão evidenciado em alguns trechos na Figura 4 representa bacias com pequenas contribuições, inferiores a $1 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, para a vazão do rio São Francisco, como pode ser verificado na área de contribuição do rio Paramirim, bem como a jusante da confluência do rio Grande até Sobradinho onde estão localizados os rios Verde e Jacaré.

3.1.2 Modelos de regionalização selecionados

No Quadro 2 são apresentadas as equações selecionadas para cada região homogênea. Nos afluentes da margem esquerda a montante de Sobradinho, com exceção das bacias dos rios Urucuia e Corrente, a variável independente que melhor se ajustou foi a P_{eq750} . Já para a margem direita excluindo as bacias do Pará e Paraopeba foi a P_{eq700} .

Este menor valor de inércia hídrica na margem direita é decorrente da inexistência de água suficiente para evaporar em consequência da alta taxa de evaporação nesta região a qual abrange o semi-árido.

3.2 Regionalização da vazão associada à permanência de 95% - Q₉₅

Na Figura 5 é apresentado o mapa da bacia do São Francisco com as regiões homogêneas selecionadas pelo método tradicional.

Quadro 2 – Equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional

| Regiões Homogêneas | Equação |
|--------------------|---|
| 1 | $Q_{mld} = 0,894627 P_{eq750}^{0,971246}$ |
| 2 | $Q_{mld} = 0,26055 P_{eq}^{1,042028}$ |
| 3 | $Q_{mld} = 0,324716 P_{eq}^{1,0281}$ |
| 4 | $Q_{mld} = 0,784003 P_{eq700}^{0,985354}$ |
| 5 | $Q_{mld} = 1,006889 P_{eq700}^{0,911246}$ |
| 6 | $Q_{mld} = 0,91151 P_{eq750}^{0,943225}$ |
| 7 | $Q_{mld} = 0,826476 P_{eq750}^{0,945929}$ |
| 8 | $Q_{mld} = 0,809622 P_{eq750}^{0,969921}$ |
| 9 | $Q_{mld} = 0,386132 P_{eq}^{0,950561}$ |
| 10 | $Q_{mld} = 0,520535 P_{eq750}^{1,176477}$ |
| 11 | $Q_{mld} = 0,025376 A^{0,880451}$ |
| 12 | $Q_{mld} = 0,249026 P_{eq750}^{1,10474}$ |
| 13 | $Q_{mld} = 0,715489 P_{eq750}^{0,914852}$ |
| 14 | $Q_{mld} = 1,638569 P_{eq700}^{0,557448}$ |
| 15 | $Q_{mld} = 0,017581 P_{eq}^{1,171984}$ |
| 16 | $Q_{mld} = 1,2828 P_{eq750}^{0,9191}$ |

A região 1 (com sete estações fluviométricas) abrange os pequenos afluentes do rio São Francisco situados a montante de Três Marias, compreendendo os rios Samburá, Ajudas, Bambuí, São Miguel, Mateus Grande, Marmelada, Indaía e Borrachudo.

As regiões 2 (com oito estações fluviométricas) e 3 (com 12 estações fluviométricas) compreendem as bacias do Pará e Paraopeba, respectivamente. A bacia do rio das Velhas teve que ser dividida em duas regiões: a região 4 (com 11 estações fluviométricas) que vai até a confluência com o rio Jequitibá (incluído nesta região), e a região 5 (com sete estações fluviométricas), que compreende o restante da bacia.

A bacia do Paracatu também foi dividida em três regiões homogêneas: a região 6 (com seis estações fluviométricas), que vai da cabeceira do rio Paracatu até a confluência com o ribeirão Entre Ribeiros, a região 7 (com oito estações fluviométricas), que abrange as sub-bacias do Entre Ribeiros e do Preto, e a região 8 (com sete estações fluviométricas), que abrange o restante da bacia.

A região 9 (com seis estações fluviométricas) corresponde à bacia do Urucuia. A região 10 (com sete estações fluviométricas) engloba as bacias do Carinhanha, do Japoré e do Pandeiros e a região 11 (com sete estações fluviométricas) corresponde à bacia do rio Corrente.

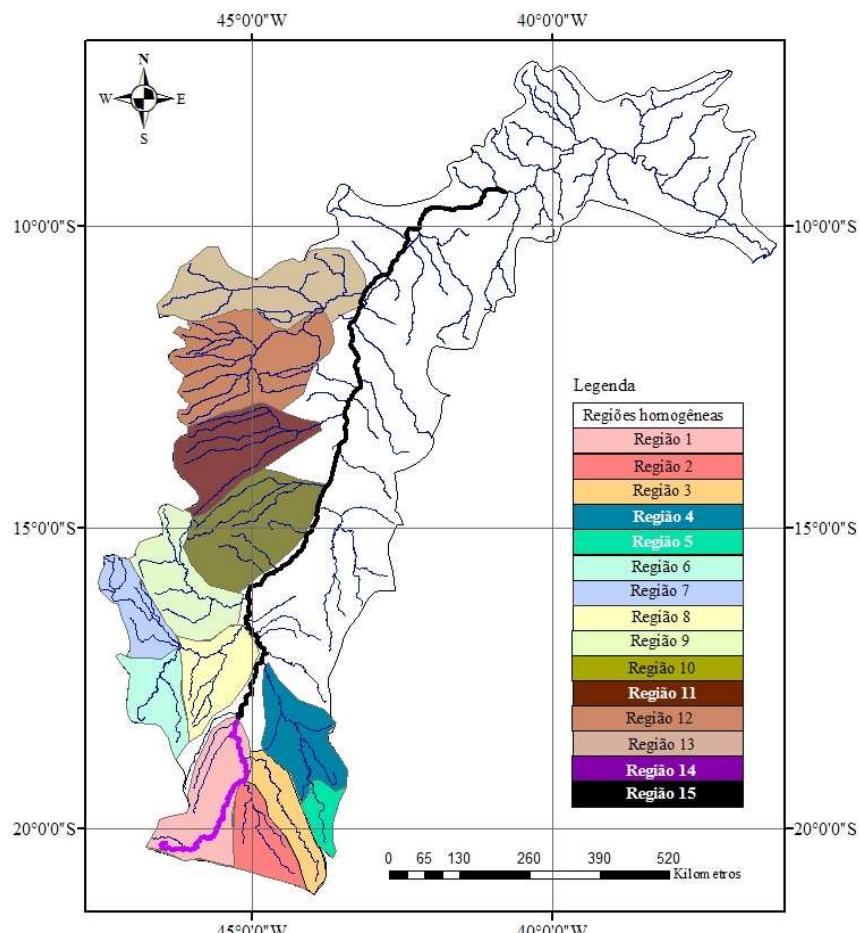


Figura 5 – Regiões homogêneas consideradas para a regionalização das vazões mínimas na bacia do São Francisco pelo método tradicional.

A bacia do rio Grande foi dividida em duas regiões. A região 12 (com dez estações fluviométricas) compreende a área da cabeceira até a confluência com o rio Preto e a 13 (com cinco estações fluviométricas) abrange este afluente e o restante da bacia.

Em virtude do efeito de regularização dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho na calha do São Francisco, esta foi dividida em duas regiões: a montante de Três Marias (região 14 - com 4 estações fluviométricas) e entre esta barragem e Sobradinho (região 15 - com 12 estações fluviométricas).

3.2.1 Análise dos modelos de regionalização

No Quadro 3 são apresentadas as amplitudes de variação dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes para as principais bacias ou regiões na bacia do São Francisco. Para fins de análise os erros negativos presentes neste quadro correspondem a superestimativa das vazões estimadas, enquanto os positivos, às subestimativas.

Quadro 3 – Amplitudes de variações (Δ) dos erros relativos quando utilizadas as quatro variáveis independentes para as principais bacias ou regiões na bacia do São Francisco

| Bacias ou regiões | $\Delta(A)$ | $\Delta(P_{eq})$ | $\Delta(P_{eq700})$ | $\Delta(P_{eq750})$ |
|--|--|--|--|--|
| Região 1 | -182,7 a 60,9 | -164,8 a 55,8 | -154,1 a 51,9 | -97,9 a 53,6 |
| Pará | -41,0 a 38,5 | -26,7 a 35,8 | -22,8 a 33,4 | -22,9 a 33,1 |
| Paraopeba | -35,0 a 27,8 | -36,4 a 29,4 | -32,1 a 30,6 | -46,4 a 32,3 |
| Velhas | -454,6 a 77,7 | -402,4 a 76,6 | -345,4 a 73,8 | -337,5 a 73,0 |
| Paracatu | -104,9 a 38,7 | -98,3 a 36,9 | -90,8 a 35,1 | -90,0 a 34,7 |
| Urucuia | -16,6 a 15,9 | -18,3 a 12,9 | -29,0 a 11,3 | -31,0 a 11,8 |
| Carinhanha | -43,8 a 37,3 | -36,3 a 37,9 | -23,5 a 37,5 | -20,4 a 37,4 |
| Corrente | -90,2 a 22,2 (-3,7 a 22,2) ¹ | -68,5 a 30,4 (-37,0 a 30,4) ¹ | -71,4 a 30,9 (-37,1 a 30,9) ¹ | -72,2 a 31,0 (-37,2 a 31,0) ¹ |
| Grande | -404,8 a 47,7 (-43,4 a 47,7) ² | -289,1 a 45,7 (-42,2 a 45,7) ² | -151,2 a 40,4 (-36,4 a 40,4) ² | -128,9 a 40,8 (-43,3 a 40,8) ² |
| Rio São Francisco (montante de Três Marias) | -9,6 a 7,5 | -9,0 a 7,4 | -8,4 a 7,3 | -8,3 a 7,3 |
| Rio São Francisco (entre Três Marias e Sobradino) | -17,4 a 14,4 | -16,3 a 14,6 | -23,8 a 9,1 | -24,8 a 8,6 |

¹ Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Mocambo, localizada no rio do Meio.

² Amplitude de variação sem a consideração do erro evidenciado na estação Fazenda Coqueiro, localizada no ribeirão São Desidério.

Na região 1 a consideração da P_{eq750} apresentou erros menores em comparação à aplicação das outras variáveis. Nas comparações realizadas para a bacia do rio Pará, os erros foram superiores a 30% (valor em módulo), tendo ocorrido as menores variações quando aplicado a P_{eq700} e a P_{eq750} .

Embora na bacia do Paraopeba não tenha ocorrido grande variação dos erros, uma maior quantidade de estações com erros inferiores a 10% foi evidenciada quando aplicada a vazão equivalente ao volume precipitado.

Na bacia do rio das Velhas os erros foram elevados quando utilizada qualquer uma das variáveis, sendo superiores a 70% (valor em módulo), sendo o menor número de estações com erros inferiores a 10% (cinco estações) evidenciado para P_{eq700} .

Para a bacia do Paracatu, as aplicações em função da P_{eq700} e da P_{eq750} apresentaram as menores amplitudes de variação dos erros, senso o número de estações com erros inferiores a evidenciado para P_{eq750} .

Das combinações realizadas na bacia do Urucuia, as que consideraram a área e a vazão equivalente ao volume precipitado apresentaram o maior número de estações com erros inferiores a 10% (metade das estações presentes na bacia).

Na bacia do Carinhanha, a menor amplitude de variação dos erros ocorreu tanto em função da P_{eq700} como da P_{eq750} .

Na bacia do Corrente, a estação Mocambo apresentou erros elevados na aplicação das quatro variáveis, portanto fazendo uma análise dos erros sem considerar o desta estação, observa-se que os menores erros foram evidenciados em função da área, sendo estes inferiores a 22% (valor em módulo).

Na bacia do rio Grande, a estação Fazenda Coqueiro também apresentou erros elevados na aplicação das quatro variáveis independentes. Fazendo uma análise dos erros nas estações situadas nesta bacia, sem considerar o erro desta estação, verifica-se que não ocorreu uma mudança expressiva na amplitude dos erros quando utilizadas as quatros variáveis independentes, entretanto com o uso da P_{eq750} ocorreu o número maior de estações com erros inferiores a 10%.

Na parte Leste da bacia a jusante da confluência do rio das Velhas não foi possível nenhum ajuste. Em decorrência da oscilação das vazões a jusante de Sobradinho, bem como do reduzido número de estações nesta região, também não foi possível o ajuste de nenhum modelo.

A montante de Três Marias os erros relativos foram inferiores a 10% para ambas as variáveis aplicadas. Entre Três Marias e Sobradinho as equações de regionalização em função da área e da vazão equivalente ao volume precipitado apresentaram erros inferiores a 20% (valor em módulo), sendo que valores maiores que 10% somente ocorreram nas estações Pedras de Maria da Cruz e Manga. Já para a P_{eq700} e a P_{eq750} , apenas a estação Manga teve erros maiores que 10%.

Para a seleção do melhor método e variável também analisou-se o gráfico da Q_{95} em função da área. Portanto são apresentadas na Figura 6 as Q_{95} estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas, bem como as obtidas pelos ajustes utilizando as quatro variáveis analisadas no rio São Francisco.

As Q_{95} afluentes em Três Marias obtidas por ambas as variáveis analisadas, mesmo não considerando os usos consuntivos foram superiores à Q_{95} natural afluente a este reservatório ($148 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) adotada no Plano de Recursos Hídricos da bacia do São Francisco (ANA, 2004a). O ajuste utilizando a variável P_{eq750} ($188,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) foi o que mais se aproximou do valor da literatura, sendo 26,5% superior ao valor adotado pelo Plano.

Com relação aos efeitos de regularização, observa-se que as vazões efluentes de Três Marias foram inferiores à sua vazão máxima regularizável ($513 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) adotada em caráter provisório pelo

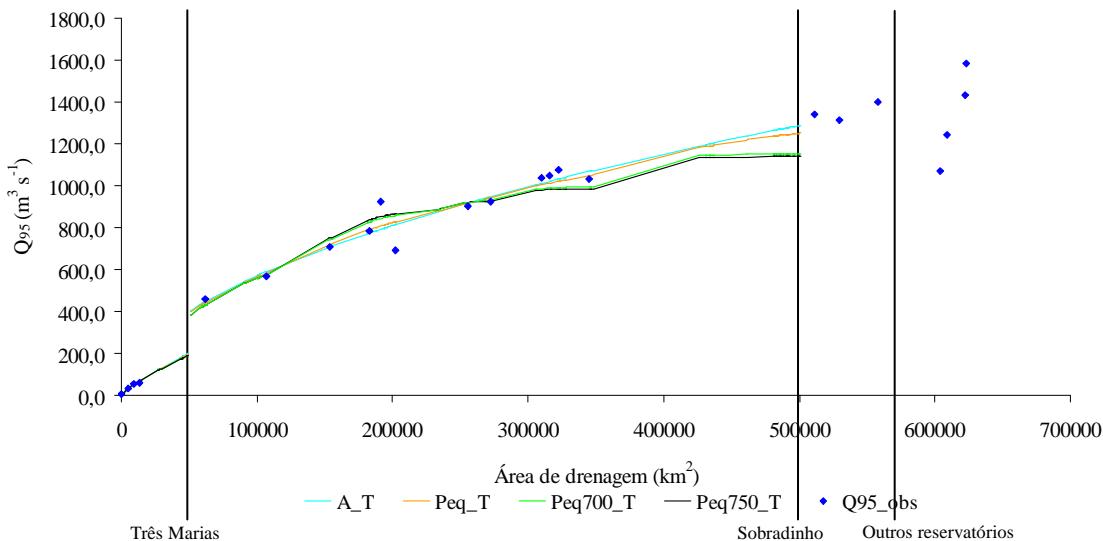


Figura 6 – Q₉₅ estimadas em função da área (A), da P_{eq}, da P_{eq700} e da P_{eq750} pelo método tradicional (T) e as estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas (Q₉₅_obs).

Plano da bacia (ANA, 2004a). Entretanto ANA (2004a) ressalta que a vazão efluente deste reservatório tem sido bastante inferior ao valor máximo regularizável, ocorrendo com uma permanência de 72%. As vazões efluentes de Três Marias estimadas variaram de 383,6 (obtida em função da P_{eq750}) a 406,1 m³ s⁻¹ (obtida em função da área) sendo, respectivamente, 25,2 e 20,8% inferiores à vazão máxima regularizável adotada pelo Plano.

As vazões observadas a jusante de Sobradinho também foram inferiores à vazão máxima regularizável por este reservatório (1.815 m³ s⁻¹) adotada em caráter provisório pelo Plano da bacia (ANA, 2004a). Segundo ANA (2004a) as vazões efluentes de Sobradinho têm sido bastante inferiores ao valor máximo regularizável, ocorrendo com uma permanência de 66%.

Neste trecho do São Francisco a existência dos reservatórios de Itaparica/Luiz Gonzaga, de Moxotó, de Paulo Afonso e de Xingó tenderia a promover o aumento das vazões devido ao efeito de regularização desses reservatórios, entretanto verifica-se uma diminuição da vazão na estação Piranhas, localizada após estes reservatórios. Portanto devido ao comportamento das vazões neste trecho do São Francisco, bem como a impossibilidade de comparação entre as vazões específicas da calha e a dos afluentes desta região do São Francisco, as quais são, segundo ANA (2004b), praticamente nulas, não foi possível nenhum ajuste nesta região.

Assim como evidenciado na análise da Q_{mld} a consideração da P_{eq700} e da P_{eq750} na regionalização da Q₉₅ também refletiram as variações de contribuições específicas associadas aos afluentes das margens direita e esquerda do São Francisco (Figura 4).

Na Figura 7 são apresentadas as vazões observadas e as estimadas em função da P_{eq750} , bem como a representação da contribuição dos afluentes na vazão do São Francisco.

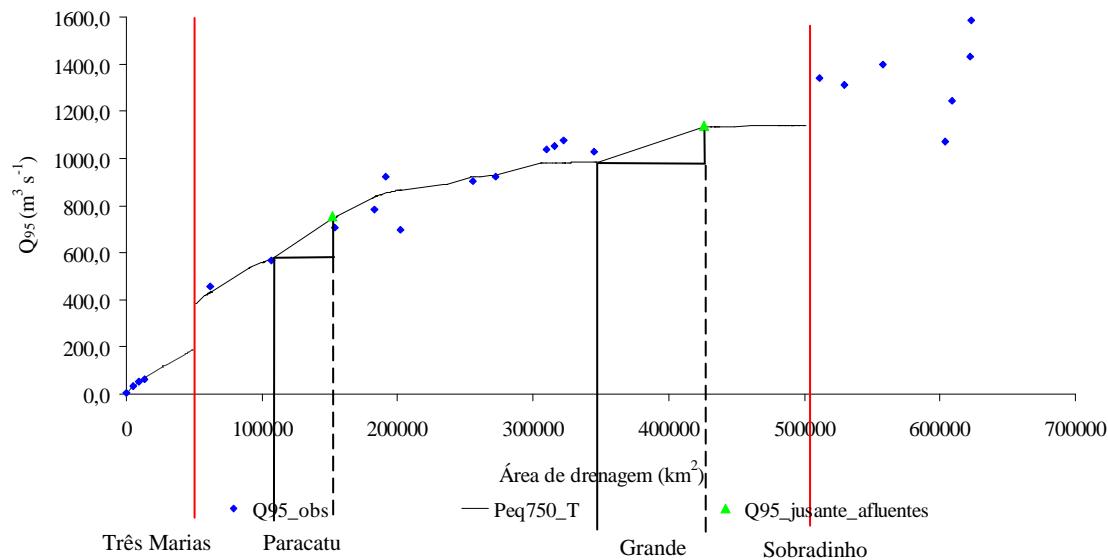


Figura 7 – Q_{95} estimadas com base nos dados observados nas estações fluviométricas (Q_{95_obs}) e a estimada em função da P_{eq750} na calha do São Francisco.

Como observado na análise da vazão média, embora a bacia do rio Grande possua a maior área de drenagem, a bacia do Paracatu apresentou a maior contribuição na formação da vazão com permanência de 95% do rio São Francisco, devido à maior declividade do ajuste no trecho correspondendo à área de drenagem desta bacia.

3.2.2 Modelos de regionalização selecionados

No Quadro 4 são apresentadas as equações selecionadas para cada região. As variáveis independentes utilizadas para a regionalização da Q_{95} nas regiões homogêneas foram as mesmas selecionadas para a obtenção da Q_{mld} , com exceção da bacia do Pará. Enquanto para Q_{95} nesta bacia selecionou-se a variável P_{eq750} , para a Q_{mld} foi selecionado a vazão equivalente ao volume precipitado.

4. CONCLUSÕES

A consideração da precipitação média anual menos a inércia hídrica possibilitou ajustes das equações de regionalização das vazões média de longa duração e da Q_{95} mais precisos na maior parte das sub-bacias do São Francisco.

Quadro 4 – Equações selecionadas para cada região homogênea pelo método tradicional e os valores das vazões específicas consideradas como limite para cada região

| Regiões Homogêneas | Equação |
|--------------------|--|
| 1 | $Q_{95} = 0,043744 P_{eq750}^{1,451275}$ |
| 2 | $Q_{95} = 0,29405 P_{eq750}^{0,887164}$ |
| 3 | $Q_{95} = 0,074072 P_{eq}^{1,069348}$ |
| 4 | $Q_{95} = 0,064763 P_{eq700}^{1,155432}$ |
| 5 | $Q_{95} = 0,215652 P_{eq700}^{1,015947}$ |
| 6 | $Q_{95} = 0,19859 P_{eq750}^{0,88242}$ |
| 7 | $Q_{95} = 0,090574 P_{eq750}^{1,092948}$ |
| 8 | $Q_{95} = 0,215794 P_{eq750}^{0,880982}$ |
| 9 | $Q_{95} = 0,082122 P_{eq}^{0,87143}$ |
| 10 | $Q_{95} = 0,146236 P_{eq750}^{1,351391}$ |
| 11 | $Q_{95} = 0,021108 A^{0,85975}$ |
| 12 | $Q_{95} = 0,088584 P_{eq750}^{1,212411}$ |
| 13 | $Q_{95} = 0,665729 P_{eq750}^{0,865652}$ |
| 14 | $Q_{95} = 0,478 P_{eq750}^{0,8599}$ |
| 15 | $Q_{95} = 1,9726 P_{eq750}^{0,7544}$ |

BIBLIOGRAFIA

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2004a). *Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco*. Brasília: ANA, 318 p.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2004b). *Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco*. Subprojeto 4.5C– Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco -PBHSF (2004-2013). Nota técnica. Disponibilidade hídrica quantitativa e usos consuntivos na bacia hidrográfica do rio São Francisco. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/ OEA, 71 p.
- CATALUNHA, M. J. (2004) *Sistema integrado em rede para gestão do uso múltiplo da água e regionalização da Q_{7,10} para os períodos mensal, bimestral, trimestral e anual*. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 165 p.
- BRASIL – Governo Federal. MINAS GERAIS; Governo do Estado. DISTRITO FEDERAL.(1996) *Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu – PLANPAR*. [S. l.]: v. 1, T. 1. (CD-ROM).

NOVAES, L. F. (2005). *Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 104 p..

PEREIRA, S. B. (2004). *Evaporação no lado de sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco*. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 103 p.

UFV – Universidade Federal de Viçosa. (2008). *Programas desenvolvidos pelo grupo de pesquisa em recursos hídricos da UFV*. UFV/DEA – Viçosa. Disponível em: www.ufv.br/dea/gprh.