

MARIA CAMILA ALVES RAMOS

**CRITÉRIOS DE VALORAÇÃO DA ÁGUA COM BASE NA SAZONALIDADE
DAS VAZÕES E NA EFETIVA DEMANDA HÍDRICA DAS CULTURAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R175c
2016 Ramos, Maria Camila Alves, 1991-
Critérios de valoração da água com base na sazonalidade
das vazões e na efetiva demanda hídrica das culturas / Maria
Camila Alves Ramos. – Viçosa, MG, 2016.
x, 73f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Recursos hídricos - Desenvolvimento. 2. Abastecimento
de água - Custos. 3. Água de irrigação. 4. Irrigação agrícola.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Meteorologia
Aplicada. II. Título.

CDD 22. ed. 333.91

MARIA CAMILA ALVES RAMOS

**CRITÉRIOS DE VALORAÇÃO DA ÁGUA COM BASE NA SAZONALIDADE
DAS VAZÕES E NA EFETIVA DEMANDA HÍDRICA DAS CULTURAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2016.

Fernando França da Cunha

Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Fernando Falco Pruski
(Orientador)

Aos meus pais, meus espelhos de vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus passos em mais esta etapa vencida, e por colocar nesse caminho pessoas tão especiais.

Aos meus pais, Armindo e Maria, por todo amor e por sempre e com satisfação abrirem mão de tantos desejos próprios em função dos meus.

A minha irmã Isabela, pelo amor, amizade e companheirismo em todos os momentos.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pela orientação, pelos ensinamentos, pela confiança, e pela amizade sempre presente.

Aos integrantes do GPRH e CRRH, que representam muito mais que um grupo de pesquisa, agradeço pela bela convivência compartilhada, em especial, a Andressa, Josiane, Laisi e Nívia, as melhores irmãs que eu poderia ter encontrado por aqui.

A Luane e Magno, que desde o início se tornaram verdadeiros amigos.

A Arthur e Renata, pelas ajudas sempre solícitas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo afeto e pelo suporte.

A Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo apoio financeiro.

As integrantes da RBO Laura, Nayara e Rayssa, pela amizade e por tornarem a nossa república um verdadeiro lar.

Aos amigos Cássio, David, Felipe, Micael e Tarcila, por todos os bons e também ruins momentos compartilhados, e pelo apoio e grande amizade que sempre levarei comigo.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma, o meu sincero agradecimento.

BIOGRAFIA

MARIA CAMILA ALVES RAMOS, filha de Armindo da Costa Ramos e Maria Alves Ramos, nasceu em Espinosa/MG em 22 de fevereiro de 1991.

Em janeiro de 2014 concluiu o curso de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

Em março de 2014 iniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Aplicada na área de Hidroclimatologia na Universidade Federal de Viçosa - UFV, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2016.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Conjuntura mundial da disponibilidade de recursos hídricos	3
2.2 Sazonalidade da disponibilidade hídrica	5
2.3 Gestão de recursos hídricos no Brasil	6
2.3.1 Cobrança pelo uso dos recursos hídricos	6
2.3.2 Outorga de direito de uso de recursos hídricos	8
2.4 Demanda de água pela irrigação	9
2.5 Potencialidade do uso da irrigação com déficit	10
2.6 Bacia do rio Paracatu	11
3 MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Caracterização da área de estudo	13
3.2 Dados utilizados no estudo	15
3.3 Desenvolvimento de metodologia de valoração da água com base na disponibilidade sazonal dos recursos hídricos	16
3.3.1 Obtenção das vazões mínimas anuais e mensais e estimativa das relações entre as $Q_{7,10}$ mensais e $Q_{7,10}$ anual	17
3.3.2 Identificação de <i>outliers</i> e definição de regiões homogêneas	18
3.3.2.1 Aplicação do <i>box plot</i>	18
3.3.2.2 Análise de agrupamentos	19
3.3.3 Determinação do fator de sazonalidade	20
3.4 Aprimoramento de metodologia de valoração da água com base na efetiva demanda hídrica das culturas	21
3.4.1 Identificação de regiões homogêneas	21
3.4.1.1 Balanço hídrico ($E_t - P_{80\%}$)	22
3.4.1.2 Identificação de regiões homogêneas	24
3.4.2 Estimativa da demanda de água pela irrigação	26
3.4.2.1 Evapotranspiração potencial da cultura – ET_{pc}	26
3.4.2.2 Eficiência de aplicação – E_a	28
3.4.2.3 Fator relativo às horas de bombeamento por dia (NHD/NHFP)	28
3.4.3 Aprimoramento do fator de uso da água na irrigação	28

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Desenvolvimento de metodologia de valoração da água com base na disponibilidade sazonal dos recursos hídricos	30
4.1.1	Análise da variação sazonal das vazões mínimas com base nas $Q_{7,10}$ mensais e da relação entre as $Q_{7,10}$ mensais e anual	30
4.1.2	Uso do <i>box plot</i> para identificação de <i>outliers</i>	34
4.1.3	Identificação de regiões homogêneas	35
4.1.4	Determinação do fator de sazonalidade	36
4.2	Aprimoramento de metodologia de valoração da água com base na efetiva demanda hídrica das culturas	42
4.2.1	Identificação e validação de regiões homogêneas quanto ao balanço hídrico	42
4.2.2	Aprimoramento do fator de uso da água na irrigação	45
4.2.2.1	Soja	46
4.2.2.2	Cana-de-açúcar	50
4.2.2.3	Banana	54
4.2.2.4	Valores da vazão unitária de referência para todas as culturas estudadas..	55
5	CONCLUSÃO	57
	APÊNDICES	64
	APÊNCIDE A	65
	APÊNCIDE B	67
	APÊNCIDE C	72

RESUMO

RAMOS, Maria Camila Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Critérios de valoração da água com base na sazonalidade das vazões e na efetiva demanda hídrica das culturas.** Orientador: Fernando Falco Pruski.

O contexto de crise hídrica atual, associado às projeções de crescimento das demandas no futuro, evidencia uma condição de escassez iminente e, por conseguinte, a necessidade de adoção de políticas eficientes de planejamento e gestão que atuem de modo a disciplinar o uso dos recursos hídricos. Uma estratégia nesse sentido é a efetiva adoção da cobrança pelo uso da água, que, subsidiada pelo estabelecimento de critérios de uso adequado, tem um potencial regulador. Dentro desta perspectiva, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para valoração da água com base na disponibilidade sazonal de recursos hídricos e aprimorar um critério de valoração da água na agricultura irrigada com base na efetiva demanda hídrica das culturas, sendo, para o desenvolvimento das proposições, utilizada a bacia do Paracatu. O desenvolvimento do critério relacionado à disponibilidade sazonal dos recursos hídricos baseou-se na consideração de que a água deve estar associada a uma diferente valoração ao longo do ano, de acordo com seu nível de disponibilidade em condições a fio d'água. Para a caracterização dessa variação na hidrografia, foi considerada uma relação entre os valores de $Q_{7,10}$ mensais e de $Q_{7,10}$ anual, denominada $RVM_{M/A}$. Visando à identificação de possíveis discrepâncias nos valores da $RVM_{M/A}$, foi utilizada a técnica de *box plot*, seguida, posteriormente, pela análise de agrupamento visando a

identificação de regiões homogêneas. Para a região homogênea considerada, foram estimados os valores médios mensais da $RVM_{M/A}$ e os respectivos intervalos de confiança inferiores, com 95% de probabilidade. O estabelecimento do critério fator de sazonalidade (F_s) foi dividido em três aproximações, que representam os ajustes feitos aos valores médios da $RVM_{M/A}$. O fator de uso da água na irrigação foi criado por IBIO e Funarbe (2013) como incentivo ao uso eficiente da água na irrigação, e se baseia em uma relação entre a vazão unitária outorgada ($q_{u,i (out.)}$) e um valor de vazão unitária tabelada ($q_{u,i (tab.)}$), estimado com base na efetiva demanda hídrica das culturas e em valores de vazão unitária prefixados. O aprimoramento desta metodologia para valoração da água na agricultura irrigada consistiu na substituição dos valores $q_{u,i (tab.)}$ por uma vazão unitária de referência para outorga de irrigação $q_{u,i (ref. out.)}$, estimada com base na máxima demanda hídrica da cultura ($q_{u,i (máx.)}$), associada a um fator de desestímulo, que agrega maior valor à água quando o período de maior demanda para a irrigação das culturas temporárias coincide com o período de menor disponibilidade hídrica superficial a fio d'água, o qual foi estabelecido por um valor limite de $RVM_{M/A}$ igual a 1,5. A obtenção dos valores de $q_{u,i (ref. out.)}$ foi precedida por um estudo de identificação de regiões homogêneas quanto ao balanço hídrico entre evapotranspiração de referência e precipitação provável com 80% de probabilidade de ocorrência. Os valores $q_{u,i (máx.)}$ corresponderam à máxima vazão unitária mensal estimada, considerando 12 calendários de cultivo ao longo do ano, com datas de plantio correspondentes ao primeiro dia de cada mês.

ABSTRACT

RAMOS, Maria Camila Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2016. **Criteria of charging for water usage based on the seasonality of discharges and effective water demand of crops.** Adviser: Fernando Falco Pruski.

The water crisis context, associated with the growing projections of future demands, show a condition of imminent scarcity and therefore the need to adopt effective planning and management policies that aim to discipline the use of the water resources. In this sense, a potential strategy is to attribute value for the water resource, which, supported by the establishment of appropriate use criteria, has a regulator potential. Within this perspective, the present study aimed to develop a methodology to estimate the water cost based on its seasonal availability, and to improve an water valuing criteria for irrigated agriculture based on effective water demand of the crops, within the Paracatu watershed. The development of the criteria related to the seasonal availability of the water resources was based on the consideration that different costs should be attributed to this resource throughout the year, according to its availability under run-of-river conditions. In order to characterize the water value variation in the hydrography, a relationship between monthly $Q_{7,10}$ (low flow observed for seven consecutive days with a returning period of ten years) and annual $Q_{7,10}$ streamflow values named $RVM_{M/A}$ were considered. In order to identify possible discrepancies in the $RVM_{M/A}$ values, a box plot technique was used, followed by the cluster analysis to identify homogeneous regions. For the considered homogeneous region, average values of monthly $RVM_{M/A}$ and its lower

confidence intervals were estimated, with 95% probability. The establishment of the seasonality factor criteria (F_s) was divided into three approaches, representing the adjustments made to the average $RVM_{M/A}$ values. The water use factor for irrigation was created by IBIO and Funarbe (2013) as an incentive to encourage efficient water use for irrigation, and is based on a relationship between the unitary granted discharge ($q_{u,i (out.)}$) and an unitary tabulated discharge ($q_{u,i (tab.)}$), estimated based on the effective water demand of the crops and prefixed unitary discharge values. The improvement of this methodology to determine the water value for irrigated agriculture consisted in the replacement of $q_{u,i (tab.)}$ values for a unitary reference discharge for irrigation grant ($q_{u,i (ref. out.)}$). The irrigation grant estimation was based on the culture maximum water demand ($q_{u,i (m\acute{a}x.)}$), associated with a discouraging factor, which adds greater value to water when the highest irrigation demand of temporary crops coincides to the period of lowest run-of-river surface water availability, which was established by a $RVM_{M/A}$ limit value of 1.5. In order to obtain the $q_{u,i (ref. out.)}$ values, a study to identify the homogeneous regions, relating the water balance between reference evapotranspiration and probable precipitation with 80% of occurrence probability was developed. The $q_{u,i (m\acute{a}x.)}$ values correspond the estimation of the maximum monthly unitary discharge, considering 12 cultivation calendars throughout the year, with planting dates corresponding to the first day of each month.

1 INTRODUÇÃO

A água é um bem essencial à manutenção da vida, ao equilíbrio do meio ambiente e ao desenvolvimento de diversas atividades humanas, entretanto, o exercício de uma exploração insustentável tem acarretado expressiva redução em sua quantidade prontamente disponível, evidenciando uma necessidade de gerenciamento eficiente dos recursos hídricos.

É importante, nesse sentido, o desenvolvimento de ações voltadas a um melhor conhecimento da disponibilidade dos recursos hídricos e de uma melhor forma de sua utilização (BOF, 2010). Isso se faz possível por meio do estudo da distribuição espacial e temporal das vazões, que, como reflexo ao regime de chuvas, podem ser bastante variáveis ao longo do ano e da bacia hidrográfica.

Além do conhecimento do ponto de vista da oferta, frente aos conflitos pelo uso dos recursos hídricos, é importante o conhecimento acerca das demandas existentes, de modo a buscar compatibilizá-las com o contexto de escassez.

A agricultura irrigada, na posição de maior consumidora de água, representa uma alternativa para o aumento de ciclos de produção de algumas culturas em um mesmo ciclo sazonal, tendo incontestável relevância na garantia da segurança alimentar. Entretanto, por vezes, a implementação de projetos de irrigação ocorre de modo desordenado, sem a adoção dos devidos cuidados técnicos, como a consideração das contribuições da precipitação, a definição da melhor época de plantio e/ou a consideração da disponibilidade hídrica superficial (SILVA, 2014). Esses fatos retratam a importância da proposição de políticas de gestão de recursos hídricos, visando à otimização do uso da água.

No Brasil, um grande avanço nesse sentido foi a promulgação da Lei 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, que tem como um de seus instrumentos de gestão a cobrança pelo uso da água, elaborada com um dos objetivos de incentivar o uso racional dos recursos hídricos. Diante das crescentes demandas pelo uso da água, fazem-se necessários esforços no sentido da criação de critérios consistentes de valoração, que possam de fato refletir a condição da água como um bem dotado de valor econômico e em condição de escassez.

Nesse sentido, IBIO e Funarbe (2013), em um estudo de aprimoramento de mecanismos de cobrança, desenvolveram um fator de uso da água de irrigação, que, estimado com base na efetiva demanda hídrica a ser suprida para a cultura, tem como finalidade estimular o uso de boas práticas na agricultura irrigada.

Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para valoração da água, com base na disponibilidade sazonal de recursos hídricos, e aprimorar uma metodologia de valoração da água na agricultura irrigada com base na efetiva demanda hídrica das culturas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conjuntura mundial da disponibilidade de recursos hídricos

Estima-se que até 2050 haverá um aumento da demanda hídrica mundial em 55% (WWAP, 2015), sugerindo uma necessidade de gerenciamento adequado dos recursos hídricos disponíveis.

No âmbito nacional, o setor de irrigação é responsável pela maior proporção de demanda consultiva consumida, cerca de 72%, sendo seguida pelo abastecimento animal, urbano, industrial e rural, com 11%, 9%, 7% e 1%, respectivamente (ANA, 2015a). Esse cenário de maior percentual de uso pelo setor agrícola se repete no contexto mundial, em que a irrigação responde por 70% dos usos, a indústria, por 19%, e o setor municipal, por 11% (FAO, 2011a).

Embora a razão existente entre o total de áreas irrigadas no mundo e a área plantada corresponda a 17%, essas áreas são responsáveis por aproximadamente 40% da safra. Já no âmbito nacional, cerca de 5% da área cultivada no país responde por 16% do total da produção (CHRISTOFIDIS citado por BERNARDO et al., 2006). Estima-se que, globalmente, a irrigação tenha potencial de aumento de produtividade de 2,7 vezes em relação à produção obtida somente pelo abastecimento de água das chuvas (WWAP, 2012).

A agricultura irrigada tem sido apresentada como uma alternativa para o desenvolvimento de algumas regiões, atuando na redução da pobreza e da exclusão social (BRASIL, 2006). O agronegócio impulsionou o crescimento do

país, sendo responsável por 23% do Produto Interno Bruto, por 27% dos empregos e pelo desenvolvimento de milhares de municípios (CNA, 2014).

Diante da problemática da crise de escassez de água mundial, as projeções de crescimento populacional e o aumento da demanda por alimentos, de 40 e de 70%, respectivamente, até 2050 (BRUINSMA, 2009), tornam cada vez mais necessária a adoção de mecanismos de planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da agricultura, o que será de grande contribuição ao futuro da segurança hídrica global (WWAP, 2012).

Apesar de a demanda de água pela irrigação apresentar para os próximos 50 anos um crescimento esperado da ordem de 6%, ele é inferior ao incremento da área irrigada colhida, devido a um lento processo de melhoria na eficiência dos sistemas (BRUINSMA, 2009). Em muitos locais do mundo, a prática da irrigação ainda é aplicada sem atender devidamente aos princípios fundamentais de conservação dos recursos e sustentabilidade (FERERES; SORIANO, 2007).

Tradicionalmente, a solução dos problemas associados à escassez hídrica foi abordada pelo lado da oferta, com a busca constante de aumento da disponibilidade em função do incremento da demanda. Contudo, com o passar do tempo, tais experiências mostraram que esse enfoque não era embasado em uma ideia de uso racional da água, o que resultou, a partir da década de 90, em uma mudança de concepção, que tem em vista medidas de controle da demanda, com maior eficiência no uso e alocação dos recursos hídricos (ABAD, 2007).

A alternativa de satisfazer as crescentes demandas por meio da busca de maior eficiência dos usos atuais é, segundo Rebouças (2002), uma experiência de sucesso comprovado nos países desenvolvidos. Nesse sentido, tem destaque no comportamento dos usuários a adoção de instrumentos econômicos e financeiros (ABAD, 2007).

A apreciação do valor econômico da água, em seus diferentes estados e usos, e o entendimento de sua distribuição espacial e temporal são imprescindíveis à realização de um manejo dos recursos hídricos na busca de uma gestão eficiente (WWAP, 2012).

2.2 Sazonalidade da disponibilidade hídrica

O termo sazonalidade de vazões se relaciona à periodicidade do seu comportamento em consequência das variações das características climáticas locais ao longo do ano.

A análise da sazonalidade dos recursos hídricos está intimamente ligada ao quadro de disponibilidade hídrica na bacia, o qual, segundo Pruski e Pruski (2011), fornece subsídios importantes para tomada de decisões político-administrativas quanto ao uso da água.

Um melhor conhecimento do processo de circulação da água na bacia hidrográfica tem potencial de atenuar ou até mesmo resolver conflitos existentes pelo uso de recursos hídricos (BOF, 2010).

A disponibilidade natural de água na hidrografia pode ser caracterizada pela observação das vazões mínimas correspondentes aos períodos mais críticos. Essas vazões são usualmente caracterizadas por sua duração e frequência de ocorrência e são, em geral, definidas por meio da $Q_{7,10}$, que representa a média das vazões mínimas de sete dias consecutivos, com período de retorno de 10 anos, e pelas Q_{95} e Q_{90} , que são exemplos de vazões associadas a diferentes níveis de permanência no tempo (PRUSKI; PRUSKI, 2011).

Estudo sobre a análise do uso de diferentes critérios de outorga de direito de uso dos recursos hídricos para seis seções da hidrografia da bacia do Paracatu mostrou que a mudança da base anual para a base mensal, considerando o critério de 30% da $Q_{7,10}$, conduziria a um aumento do volume permissível para a outorga variando de 91,0 a 168,6% (BOF, 2010).

Oliveira (2011) salientou que a adoção de critérios mensais é uma forma potencial de melhorar o uso da água e possibilitar a atenuação dos conflitos existentes, visto que em seu estudo foi evidenciado que a adoção do critério de outorga de 30% da $Q_{7,10}$ mensal proporcionaria, para a bacia do Entre Ribeiros, um aumento de 209% em relação ao que é evidenciado considerando uma base anual. Portanto, a consideração de um critério mensal pode ser uma excelente opção para melhorar o uso da água, no sentido de reduzir os conflitos entre os usuários (PRUSKI et al., 2014).

2.3 Gestão de recursos hídricos no Brasil

Historicamente, pode-se notar a existência de uma busca pela implementação de leis de regulamentação do consumo para os mais diversos setores usuários, entretanto, apesar de há muitas décadas tais propostas já abordarem aspectos importantes, ainda não eram fundamentadas em uma ideia de finitude dos recursos hídricos, porquanto, a princípio, ainda não havia intensos conflitos de uso.

O Código das Águas de 1934 foi um marco para a gestão dos recursos hídricos no país, abordando questões relativamente avançadas para a época, como os princípios básicos para uso da água para atender as necessidades essenciais à vida, a concepção de águas públicas e a ideia do princípio poluidor-pagador. Posteriormente, houve a promulgação da Constituição Federal de 1988, que, entre outros progressos, definiu a água como bem de uso comum e definiu questões sobre a dominialidade das águas do território nacional.

Atualmente, está em vigor no país a Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, denominada “Lei das Águas”, que instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos, que prevê como dois dos seus instrumentos de gestão a cobrança e a outorga pelo direito de uso dos recursos hídricos.

2.3.1 Cobrança pelo uso dos recursos hídricos

O constante aumento da demanda fez com que surgissem conflitos entre os usuários da água, fazendo com que ela deixasse de ser um bem livre para se tornar um bem dotado de valor econômico (OLIVEIRA, 2011).

A cobrança tem como propósitos primordiais dar ao usuário uma indicação do real valor da água, incentivando seu uso racional e a arrecadação de recursos financeiros a serem investidos na preservação de suas bacias hidrográficas (BRASIL, 1997).

Segundo a Lei 9.433/97 serão cobrados os usuários de recursos hídricos sujeitos a outorga, sendo, de competência dos Comitês de Bacia Hidrográficas, o estabelecimento dos mecanismos de cobrança e a sugestão dos valores a serem cobrados. Ribeiro e Lana (2001) colocam que a definição dos valores a

serem cobrados é um dos desafios na adoção desse instrumento de gestão, que ocorre devido a certas particularidades da água, como o fato de ser destinada a diversos fins e ser quali-quantitativamente variável ao longo do espaço e do tempo.

A implementação da cobrança pelo uso da água no país ocorreu primeiramente, em rios de domínio da União, na Bacia do Rio Paraíba do Sul, sendo seguida pelas bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - PCJ, Rio São Francisco e Rio Doce. Em rios de domínio do Estado, tem-se implantação efetivada, além das bacias dos afluentes dos rios já mencionados, em todo o Estado do Rio de Janeiro, todas as bacias do Estado da Paraíba e algumas dos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Paraná. Nos Estados da Bahia e Ceará tem-se instituída uma tarifa pelo fornecimento de água bruta e no Distrito Federal e no Estado do Pará, uma taxa de fiscalização pelo uso dos recursos hídricos (ANA, 2015b). No geral, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos abrange a captação, o consumo, o lançamento e a transposição (IBIO; FUNARBE, 2013).

Thomas et al. (2003) descrevem que, de modo geral, a estrutura dos mecanismos de cobrança é composta pelos seguintes termos: a base de cálculo, que é dependente do uso da água; o preço unitário, que é em função da finalidade com que é feita a cobrança; e, por fim, os coeficientes, que foram criados com o objetivo de distinguir os valores cobrados em função de características específicas do usuário.

Os coeficientes têm, portanto, um caráter multiplicador, que atuam na composição do custo pelo uso dos recursos hídricos como um fator de proporcionalidade. Thomas (2002) comenta a divisão dos coeficientes em três famílias, sendo elas: as que têm como objetivo a diferenciação dos tipos de usuários, dos tipos de uso de um mesmo usuário e, por fim, do local ou o instante em que o usuário se instala.

Podem-se citar como alguns dos coeficientes adotados em bacias ao longo do território nacional: aqueles referentes à natureza do corpo d'água, superficial ou subterrâneo; à classe de uso preponderante em que estiver enquadrado o corpo d'água no local do uso ou da derivação; com relação à disponibilidade hídrica do local; ao volume captado e seu regime de variação; ao consumo efetivo ou volume consumido; à finalidade do uso; à transposição

de água da bacia (CRUZ; MENDIONDO; 2013); quanto a boas práticas de uso e conservação da água na propriedade rural, tendo como base a tecnologia de irrigação empregada (CEIVAP, 2014); com relação às boas práticas de uso agropecuário (FINKLER et al., 2015) e a prioridade de uso estabelecida (CBHSF, 2010). Para a cobrança pelo lançamento, têm-se coeficientes quanto à classe de uso preponderante do corpo d'água receptor, à carga lançada e seu regime de variação e à natureza da atividade (CRUZ; MENDIONDO; 2013).

2.3.2 Outorga de direito de uso de recursos hídricos

A outorga consiste em uma autorização de direito de uso da água, que visa a assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos e o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos (BRASIL, 1997). A magnitude da vazão ou do volume a ser outorgado é determinada de acordo a disponibilidade hídrica e com os critérios adotados pelos sistemas jurídicos e econômicos locais (SILVA et al., 2006).

Apesar de já ter sua implantação consolidada ao longo do território nacional, é um instrumento que ainda necessita de aprimoramentos, uma vez que a consideração, na permissão pelo uso da água, de diferentes critérios entre os órgãos gestores, traz sérios problemas para a gestão dos recursos hídricos (PRUSKI; PRUSKI, 2011). Além disso, há também o fato de que segundo Oliveira et al. (2013), a vazão máxima permissível para a outorga, sendo limitada a um critério anual, restringe o uso em regiões com elevada variabilidade sazonal de vazões.

Ribeiro e Lana (2003) também comentam que na adoção da outorga como mecanismo de gestão, ainda existem desafios nos sentidos teóricos, de concepção, e práticos de operacionalização. Dentre estes, os autores citam: o estabelecimento da vazão máxima outorgável e de procedimentos adequados para definição da vazão ecológica, a carência de dados fluviométricos, a falta de conhecimento dos usuários com relação a suas próprias demandas, a dificuldade de definição dos critérios de outorga para recursos subterrâneos e o desenvolvimento de metodologias que integrem aspectos quantitativos e qualitativos de outorga.

Diante do constante incremento de demanda de água por parte do setor agrícola do país, e sendo este o maior consumidor, é nítida a necessidade de se buscar o aprimoramento dos mecanismos de gestão, de modo a atender de forma sustentável as crescentes áreas irrigáveis. Tal afirmação é corroborada por Lorite et al. (2007), que, diante do contexto de intensificação da escassez de água em diversas regiões do globo, consideram o avanço na gestão da água de irrigação uma questão de grande relevância.

2.4 Demanda de água pela irrigação

A irrigação é uma técnica milenar que consiste na aplicação artificial de água no solo com o objetivo de atender parte ou a totalidade da demanda hídrica das culturas, visando, de acordo com Fereres e Soriano (2007), a evitar déficits que possam resultar na diminuição da produção agrícola. Desse modo, atua na correção da distribuição natural das chuvas, modificando o potencial agrícola de dada região (ABAD, 2007).

A água necessária para a irrigação pode ser definida como a quantidade de água requerida pela cultura em um determinado local e período de tempo para atender à evapotranspiração e à lixiviação dos sais no solo, sendo a primeira dessas a maior e mais importante função (BERNARDO et al., 2006).

A demanda de água pela irrigação apresenta bastante variação no decorrer do ano, o que se deve prioritariamente a mudanças sazonais do clima, que se refletem na disponibilidade natural de água para as culturas (RODRIGUEZ et al., 2006), provocando aumento expressivo na demanda exatamente nos períodos mais secos do ano (IBIO; FUNARBE, 2013).

Como para alguns calendários de cultivo não necessariamente as maiores demandas são coincidentes com os meses de menor disponibilidade hídrica (SILVA, 2014), a consideração de critérios sazonais para outorga seria um aspecto bastante relevante no aumento do potencial irrigável.

Originalmente, a implantação de cultivos irrigados é fundamentada no fornecimento de água para as plantas de modo a satisfazer sua perda de água por evapotranspiração e possibilitar, sob condição de nenhum outro tipo de restrição, o alcance do potencial de produção máximo (DOORENBOS; PRUITT, 1992). Entretanto, o constante aumento de demandas pela água e os

vários impactos advindos da irrigação têm levado à substituição desse conceito, passando de uma irrigação fundamentada na demanda hídrica da cultura para uma baseada na eficiência econômica (KIRDA e KANBER apud ENGLISH et al., 2002).

Assim, em áreas de baixa disponibilidade hídrica, o fator limitante deixa de ser a terra, e a maximização de rentabilidade pode ser mais vantajosa na busca de um retorno da produção por unidade de água demandada (PEREIRA et al., 2002). Nesse contexto, como auxílio na redução do uso da água em circunstâncias de baixa oferta hídrica, pode-se fazer uso da técnica de irrigação com déficit (FERERES; SORIANO, 2007).

2.5 Potencialidade do uso da irrigação com déficit

A irrigação com déficit consiste na aplicação de uma lâmina média para irrigação inferior à lâmina média evapotranspirada, ou seja, é um fornecimento de água abaixo da completa exigência da cultura em fases menos sensíveis à deficiência de umidade (FAO, 2011b), sendo citada por Martin et al. (2012) como uma das opções para manutenção da atividade agrícola em condição de limitada disponibilidade de água.

A intensificação de pesquisas nesse sentido tem permitido o aumento da eficiência no uso da água, pois se trata uma estratégia capaz de reduzir a lâmina irrigada, resultando em um impacto mínimo na produção (MARTIN et al., 2012).

A adoção da irrigação com déficit requer um nível de conhecimento da evapotranspiração da cultura, do seu comportamento em relação à deficiência hídrica, com informações sobre as fases de crescimento críticas da cultura, e dos impactos econômicos da redução da produção (PEREIRA et al., 2002). Cada cultura se comporta de modo particular, apresentando diferentes reações à irrigação com déficit em suas várias fases de crescimento. Logo, tal prática deve ser projetada visando a amenizar ao máximo o efeito do estresse no seu rendimento final (FERERES; SORIANO, 2007).

Uma função de produção representativa do comportamento da produtividade em relação à quantidade de água aplicada tende, em resposta ao aumento da lâmina, a fornecer menores taxas de aumento de produtividade,

podendo, em caso de excesso de água, ter um decréscimo da produção (PRUSKI; PRUSKI, 2011).

Kang et al. (2000), em experimento realizado para avaliação do desempenho da prática de irrigação por déficit hídrico regulado para a cultura do milho, evidenciaram que mais de 20% da água poderia ter sido economizada sem redução expressiva no rendimento dos grãos. Além disso, os autores citaram ainda diversos estudos que obtiveram bons resultados nesse sentido, com elevado rendimento na produção e até mesmo aumento de sua qualidade em casos em que a irrigação foi substancialmente reduzida.

Em pesquisa com a cultura do trigo de inverno em planície no Norte da China, a aplicação de irrigação com déficit em vários estágios de crescimento possibilitou uma economia de água de 25% ou mais. Em Punjab, Paquistão, estudos de irrigação com déficit no trigo e no algodão mostraram reduções de produtividade de até 15% quando a irrigação foi aplicada para satisfazer apenas 60% da evapotranspiração total (FAO, 2011b).

Assim, de posse de conhecimento suficiente para o gerenciamento déficit hídrico de forma ideal, é possível conduzir cultivos com a manutenção ou até mesmo aumento da produtividade em função da redução da quantidade de água aplicada na irrigação (FERERES; SORIANO, 2007).

2.6 Bacia do rio Paracatu

A maior parte da produção agrícola na bacia do rio Paracatu era usualmente obtida por meio da agricultura de sequeiro. Com o passar dos anos, a agricultura irrigada foi tomando espaço e, atualmente, responde pela maior produtividade e geração de riquezas no setor. Isso foi possível devido ao surgimento, a partir da década de 80, de estímulos governamentais que permitiram o desenvolvimento da agropecuária na região, porém tal exploração tem se tornado preocupante, uma vez que tem interferido nos recursos hídricos na bacia (IGAM, 2006).

Rodriguez (2004) estimou para uma seção que abrange 88% da área da bacia do Rio Paracatu um aumento, no período de 1970 a 1996, em torno de 73 e 62 vezes da área irrigada e da vazão consumida por ela, respectivamente. Além disso, o autor evidenciou em uma análise de 19 seções da bacia,

consumos de percentuais da vazão mínima no período de maior escassez, variando da ordem de 4,3% a 85,1%, valores estes que chegam a superar a demanda máxima outorgável.

Tendo em vista os conflitos pelo uso da água existentes na bacia do Paracatu e em diversas outras bacias, acarretados principalmente pelas crescentes retiradas associadas à irrigação, fazem-se necessários estudos que possam contribuir para uma maior racionalização dos recursos hídricos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Paracatu (Figura 1) abrange uma área de contribuição de 45.600 km², inserida entre as coordenadas geográficas 15°30'00" / 19°30'00" sul e 45°10'00" / 47°30'00" oeste, sendo aproximadamente 92% de sua extensão pertencente ao Estado de Minas Gerais, e os outros 5% e 3%, aos Estados de Goiás e Distrito Federal, respectivamente (IGAM, 2006). A bacia do Paracatu, segundo maior afluente da margem esquerda do Rio São Francisco, apresenta área de drenagem correspondente a 7,3% da sua bacia, respondendo, entretanto, pela maior contribuição real para a formação de sua vazão, da ordem de 18,2% (PEREIRA et al., 2007).

Segundo classificação climática de Koopen, a bacia do Paracatu é uma área de clima megatérmico chuvoso do tipo Aw, caracterizado por ser um clima tropical chuvoso típico, com temperaturas elevadas e chuvas concentradas. Enquanto o período de outubro a abril concentra aproximadamente 93% do total anual precipitado, os meses de junho a agosto respondem por cerca de apenas 2%. Esse regime pluviométrico é resultado da influência do anticiclone semifixo do Atlântico Sul, da massa de ar tropical continental e das correntes perturbadas de oeste, que influenciam na distribuição espacial dos totais anuais de chuva, provocando um comportamento decrescente no sentido oeste para leste da bacia (BRASIL, 1998).

Um estudo do balanço hidroclimático conduzido por Brasil (1998) evidenciou que para o período de maio a setembro, são registradas ocorrências de déficits hídricos em toda a bacia. Diferentemente, os meses de dezembro a fevereiro são marcados por excesso hídrico.

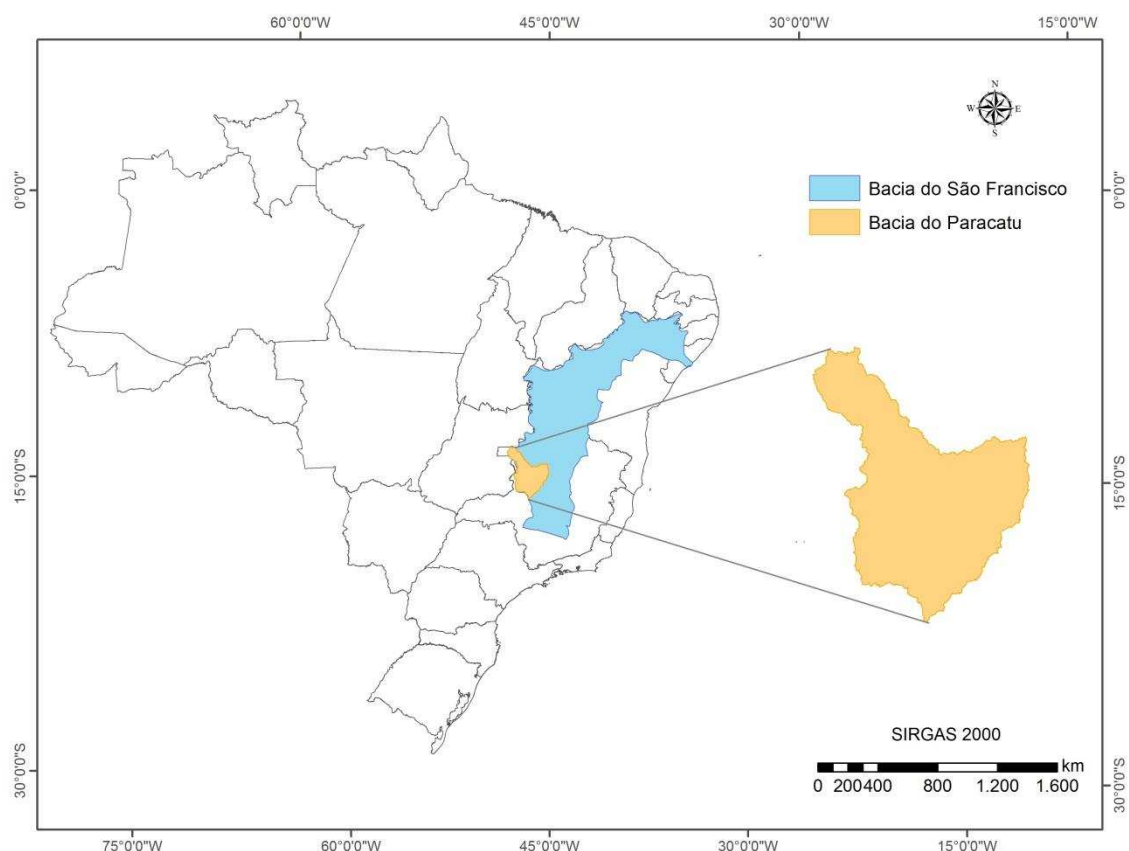


Figura 1 – Representação geográfica da bacia do Paracatu.

As principais atividades econômicas dos municípios que constituem a bacia do rio Paracatu são a agricultura, a pecuária e a exploração mineral (REZENDE, 2013). A pecuária tem destaque em primeiro lugar no setor primário, entretanto, apesar de a agricultura estar em segundo plano, algumas lavouras merecem destaque na economia da região, como milho, soja, feijão, cana-de-açúcar, arroz, café, sorgo, trigo, tomate, mandioca, banana, laranja e abacaxi (IGAM, 2006).

A agricultura irrigada, principal setor usuário de água na bacia, se estende por uma área de 37.150 ha e responde por cerca de 86,6% do total demandado (BRASIL apud RODRIGUEZ et al., 2007). As culturas irrigadas predominantes na bacia, com base no censo agropecuário de 1996, foram soja

e milho, com uma estimativa de 44% e 33% do total irrigado, respectivamente (RODRIGUEZ et al., 2007).

Embora a região hidrográfica do São Francisco tenha elevada disponibilidade hídrica, quando analisada a relação demanda/disponibilidade, têm-se diversas sub-bacias em situação preocupante. Esse contexto caracteriza alguns afluentes do Paracatu, como os rios Preto e São Pedro e o ribeirão Entre Ribeiros (ANA, 2009), principalmente as bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto, que concentram 53% de toda a área irrigada da bacia (BRASIL apud PRUSKI et al., 2007).

Brasil (1998) fez uma análise do regime de variações de vazão nos rios principais da bacia e definiu o início do ano hidrológico em outubro, quando ocorrem as primeiras chuvas. No intervalo entre novembro e abril, ocorre o período caracterizado pelas maiores vazões, e de maio a setembro, o período de recessão, no qual todos os rios permanecem perenes.

3.2 Dados utilizados no estudo

Para caracterizar o comportamento hidrológico e climatológico da área de estudo foram utilizados dados históricos de 21 estações fluviométricas e 28 estações pluviométricas, pertencentes à rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas (ANA), e dados de 8 estações climatológicas, disponibilizados pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), referente à rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A relação das estações utilizadas está apresentada no Apêndice A.

O período base adotado foi de 30 anos, de 1976 a 2005, com descarte dos anos que apresentaram mais de 5% de falhas nas estações pluviométricas e fluviométricas. Nas estações climatológicas, foram descartados todos os meses da série que apresentavam falhas em ao menos uma das quatro variáveis utilizadas no estudo e excluídos os anos que apresentaram falhas em mais que três meses. No Apêndice B, estão apresentados os diagramas de barra das estações e na Figura 2, sua localização geográfica.

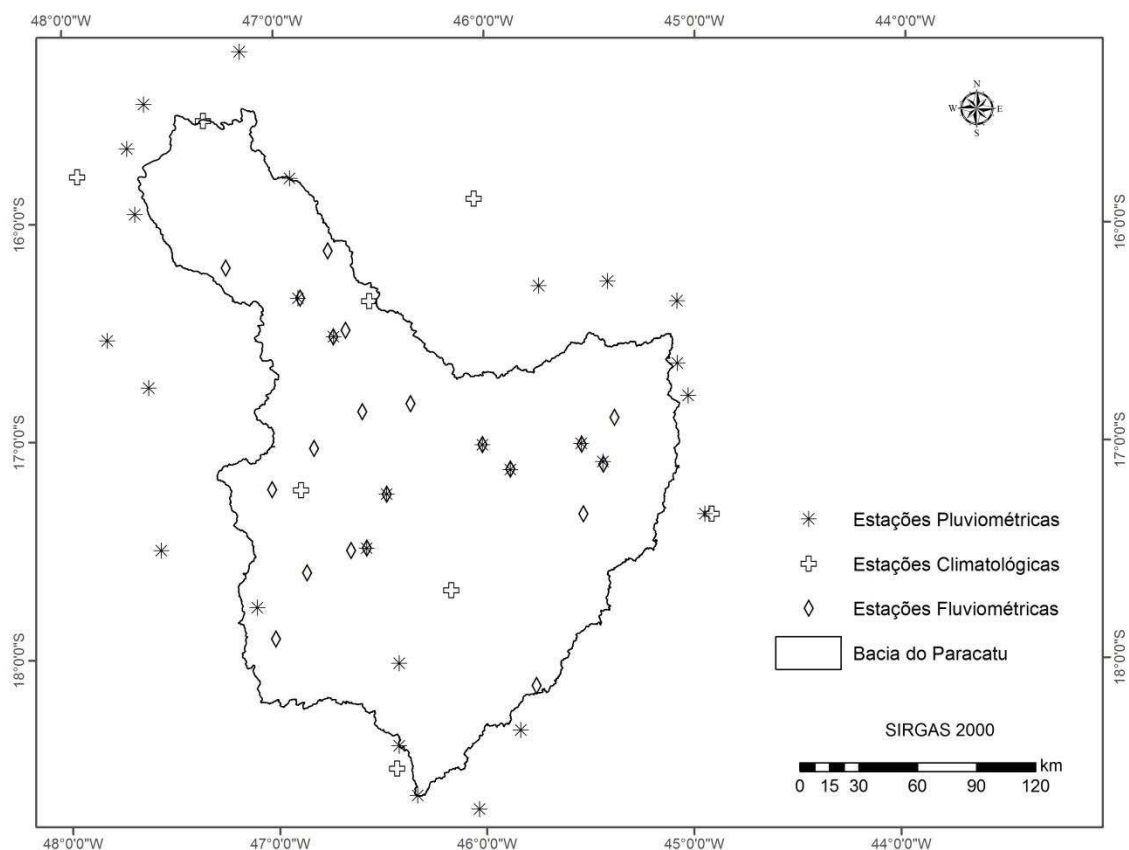


Figura 2 - Localização das estações utilizadas no estudo.

3.3 Desenvolvimento de metodologia de valoração da água com base na disponibilidade sazonal dos recursos hídricos

Sabendo das alterações sazonais nas vazões mínimas ao longo do ano e da importância que a consideração dessas variações pode ter para um aumento da eficiência para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, buscou-se a criação metodológica de um critério de valoração da água.

Neste contexto, o desenvolvimento da metodologia teve por base a análise da variação temporal das vazões mínimas ao longo do tempo. A fim de representar essas vazões, foi utilizada a $Q_{7,10}$, por ser essa a vazão de referência para concessão de outorgas a fio d'água utilizada predominantemente na bacia do Paracatu.

3.3.1 Obtenção das vazões mínimas anuais e mensais e estimativa das relações entre as $Q_{7,10}$ mensais e $Q_{7,10}$ anual

Para a estimativa dos valores de $Q_{7,10}$ mensais foi obtido um valor das menores médias de sete dias consecutivos (Q_7) para cada mês de cada ano da série histórica considerada, e assim constituída uma nova série de eventos. No caso da estimativa da $Q_{7,10}$ anual, os eventos utilizados foram as Q_7 observadas em cada ano hidrológico da série, considerado com início em janeiro. A essas séries de eventos de Q_7 , anual e mensais obtidos, foram aplicadas cinco análises de distribuições de densidade de probabilidade: Logpearson 3, Pearson 3, Normal, Lognormal 2, e Weibull. A estimativa da magnitude dos eventos foi associada a um período de retorno de 10 anos e dada pela equação:

$$M = \mu + k \delta \quad (1)$$

em que: M = Magnitude do evento para o período de retorno estabelecido; μ = média dos eventos; k = fator de frequência, calculado para cada tipo de distribuição, conforme metodologia descrita por Kite (1988); e δ = desvio padrão dos eventos.

A melhor estimativa correspondeu à distribuição de densidade de probabilidade que apresentou menor amplitude do intervalo de confiança, automaticamente indicada pelo software SisCAH 1.0 – Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SOUSA et al., 2009), no qual o procedimento foi realizado.

Uma vez obtidas as vazões mínimas em base mensal e anual, foi adotada como relação representativa da sazonalidade das vazões a razão entre a vazão mínima mensal e a vazão mínima anual, denominada, para melhor entendimento dos passos subsequentes, como relação entre as vazões mínimas mensais e anual ($RVM_{M/A}$):

$$RVM_{M/A} = \frac{Q_{7,10 \text{ mensal}}}{Q_{7,10 \text{ anual}}} \quad (2)$$

3.3.2 Identificação de *outliers* e definição de regiões homogêneas

3.3.2.1 Aplicação do *box plot*

O *box plot*, citado por Montgomery e Runger (2003) como um método visual muito útil para mostrar a variabilidade de dados, foi aplicado ao conjunto de valores mensais $RVM_{M/A}$ com o objetivo de verificar possíveis comportamentos inconsistentes nas estações fluviométrica utilizadas no estudo.

A ferramenta *box plot* consiste em um gráfico de caixa, construído com base no primeiro e terceiro quartil e na mediana (segundo quartil). Essas medidas tomadas a partir do conjunto de dados definem os limites inferior e superior da caixa e caracterizam um intervalo de valores para os quais os pontos que extrapolam são denominados *outliers* ou, em uma situação em que o valor é ainda mais discrepante, *outliers* extremos. As equações 3 e 4 especificam o cálculo dos limites inferior (L_I) e superior (L_S) para a identificação de *outliers*, e as equações 5 e 6, para *outliers* extremos.

$$L_I = Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (3)$$

$$L_S = Q_1 + 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (4)$$

$$L_I = Q_1 - 3 (Q_3 - Q_1) \quad (5)$$

$$L_S = Q_1 + 3 (Q_3 - Q_1) \quad (6)$$

em que: L_I = limite inferior do *box plot*; L_S = limite superior do *box plot*; Q_1 = quartil 1; e Q_3 = quartil 3.

Oliveira (2008) chama atenção para o fato de a utilização da técnica *box plot* exigir uma interpretação minuciosa dos resultados, pois os *outliers* podem

ser indicativos de características importantes do comportamento hidrológico da bacia.

3.3.2.2 Análise de agrupamentos

Para avaliar a possibilidade de agrupamento dos valores $RVM_{M/A}$ estimados para cada estação fluviométrica como uma informação característica do comportamento de uma maior área de abrangência, foi conduzido um estudo de identificação de regiões homogêneas, para o qual foi considerada a análise de agrupamentos.

A análise de agrupamentos, também conhecida como análise de *cluster* ou de conglomerados, é uma técnica estatística multivariada, que tenta sintetizar ou simplificar a estrutura de variabilidade dos dados (MATOS, 2007). Essa técnica tem como objetivo a organização dos dados em grupos, de modo que apresentem variância mínima em seu interior e variância máxima entre os diferentes clusters.

Foi adotado o método de agrupamento hierárquico e a distância euclidiana generalizada, que consiste na distância geométrica tomada em um espaço de p dimensões (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (Z_{ik} - Z_{jk})^2} \quad (7)$$

em que: D_{ij} = distância euclidiana entre dois indivíduos i e j ; Z_i = característica relacionada ao indivíduo i ; e Z_j = característica relacionada ao indivíduo j .

Visando a encontrar a melhor configuração de grupos para as características de entrada, avaliou-se a consideração de diferentes números de *clusters* e de métodos aglomerativos (ligação simples, ligação completa, ligação média, centroide e algoritmo de *ward*). Para a realização da análise, utilizou-se o programa R, com auxílio do pacote “DAAG” (MAINDONALD; BRAUN, 2015).

3.3.3 Determinação do fator de sazonalidade

A adoção de um critério que represente a variação sazonal das vazões mínimas para uma região específica exige a existência de um valor que seja representativo do comportamento dessas vazões ao longo do ano. Assim, para determinação do fator de sazonalidade, foram tomados como referência os valores médios das $RVM_{M/A}$ correspondentes às estações fluviométricas pertencentes à região homogênea.

O desenvolvimento do fator de sazonalidade foi condicionado à análise dos resultados obtidos e teve como fundamentação as seguintes considerações:

- a) a lei da oferta e da procura é um princípio econômico regulador do valor de um bem, sendo seu preço condicionado pela proporção inversa à da oferta. No presente estudo, a oferta é representada pela maior disponibilidade de recursos hídricos, conseqüentemente, o período de maior escassez deve ser associado ao maior valor da água;
- b) a cobrança pelo uso dos recursos hídricos em condições a fio d'água é definida em função da vazão mínima anual; e
- c) os coeficientes que compõem a estrutura básica dos mecanismos de cobrança adotados atualmente têm um caráter multiplicador, que permite maior facilidade de sua compreensão.

O atendimento a essas considerações foi feito por meio de ajustes ao valor médio mensal da $RVM_{M/A}$ ao longo do ano, estando descrito, juntamente com a configuração final do fator de sazonalidade, no item 4.1.4.

3.4 Aprimoramento de metodologia de valoração da água com base na efetiva demanda hídrica das culturas

A concepção do critério de valoração da água utilizada na irrigação com base na efetiva demanda das culturas surgiu em um estudo de aprimoramento de mecanismos de cobrança para a bacia hidrográfica do rio Doce, feito em 2013 pela Universidade Federal de Viçosa, em atendimento a uma demanda da Agência de Bacia do Rio Doce, o IBIO (Instituto BioAtlântica), em parceria com a Funarbe (Fundação Arthur Bernardes). Frente a crescentes demandas associadas à irrigação e à desregrada implantação de projetos sem os devidos cuidados técnicos, a proposta do estudo foi que o valor a ser cobrado pela água utilizada na irrigação fosse diretamente dependente da eficiência com que este recurso fosse utilizado.

Considerando o fato de que a real necessidade de complementação hídrica pela irrigação está diretamente associada ao balanço hídrico entre a evapotranspiração de referência e a precipitação e que estes elementos estão condicionados a variações não apenas temporais, mas também espaciais, buscou-se em início ao aprimoramento da metodologia proposta por IBIO e Funarbe (2013), que antecedente a quantificação das reais necessidades de irrigação fosse feito um estudo da identificação de regiões homogêneas quanto a esse aspecto.

3.4.1 Identificação de regiões homogêneas

A identificação das regiões homogêneas foi feita considerando o balanço hídrico obtido por meio da diferença entre a evapotranspiração de referência e a precipitação provável com 80% de probabilidade de ocorrência.

3.4.1.1 Balanço hídrico (Eto - P_{80%})

3.4.1.1.1 Evapotranspiração de referência – Eto

A evapotranspiração de referência consiste na evapotranspiração de uma superfície de referência coberta com grama em crescimento ativo, sem condição de restrição hídrica.

Para sua estimativa, foi utilizado o método combinado de Penman-Monteith-FAO, pela equação apresentada por Allen et al. (1998):

$$ET_0 = \frac{0,480 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (8)$$

em que: ET_0 = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;
 Δ = declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C⁻¹;
 R_n = radiação líquida à superfície de cultura, MJ m⁻² d⁻¹; G = densidade do fluxo de calor do solo, MJ m⁻² d⁻¹; Γ = constante psicrométrica, kPa °C⁻¹; T = temperatura média do ar diária a 2 m de altura, °C; U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, ms⁻¹;
 e_s = pressão de vapor de saturação, kPa; e_a = pressão atual de vapor, kPa; e $e_s - e_a$ = déficit de pressão de vapor de saturação, kPa.

A aplicação dessa equação foi feita pelo *software Reference Evapotranspiration Calculator* – RefEt 3.1.15 (ALLEN, 2013), em função do fornecimento de dados mensais de temperatura máxima e mínima, insolação, velocidade do vento e umidade relativa.

Com os valores estimados de evapotranspiração de referência, foi obtida uma média mensal de longa duração, e visando à obtenção de mapas que pudessem caracterizar toda a área de estudo, os valores mensais foram interpolados pelo método do inverso da distância ponderada (IDP), no *software* ArcGis 10.1.

3.4.1.1.2 Precipitação provável

A precipitação provável faz referência à quantidade mínima de precipitação associada à determinada probabilidade de ocorrência e é definida como de fundamental importância para o planejamento e dimensionamento de sistemas de irrigação complementar (BERNARDO et al., 2006).

Para sua estimativa, usou-se a Distribuição Gama, comumente vista na literatura como meio para análise de dados hidrológicos. O método consiste em estimar a probabilidade acumulada de ocorrência de determinada lâmina de precipitação. Esse cálculo foi feito por meio do fornecimento da probabilidade de interesse e dos parâmetros de forma e escala à função INV.GAMA do *software* Excel 2010, que retorna ao inverso da função gama definida por:

$$F(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x e^{-\frac{x}{\beta}} x^{\alpha-1} dx \quad (9)$$

em que: $F(x)$ = probabilidade de ocorrência do evento, em decimal; x = precipitação em mm; β = parâmetro de escala; α = parâmetro de forma; e $\Gamma(\alpha)$ = função gama incompleta.

Como o valor de probabilidade representa a probabilidade de a precipitação ocorrer até determinado valor de lâmina, utilizou-se o nível de probabilidade de 20%, o que significa 80% de probabilidade de que certa precipitação seja superada.

O método de inferência estatística usado para a obtenção dos parâmetros de ajuste para a distribuição foi o Método da Máxima Verossimilhança:

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[1 + \left(1 + \frac{4A}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (11)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (12)$$

em que: n = número de meses da série cuja precipitação é maior que zero; x_i = precipitação no período, mm; e $\bar{x}$ = precipitação média no período, mm.

Em razão da existência de valores mensais nulos, em decorrência dos meses secos, fez-se uso de uma distribuição mista, conforme descrito por Thom, citado por Rodrigues e Pruski (1997):

$$F(x)_1 = Q_0 + Q_1 F(x) \quad (13)$$

$$Q_0 = \frac{n_0}{(n_0 + n)} \quad (14)$$

$$Q_1 = 1 - Q_0 \quad (15)$$

em que n_0 é igual ao número de meses iguais a zero em uma série de precipitação.

A aderência das distribuições de probabilidade foi estudada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Os valores de precipitação provável mensais obtidos para cada uma das séries consideradas foram então subtraídos dos valores mensais de evapotranspiração de referência média de longa duração adquiridos para cada ponto de estação pluviométrica.

Com base nesse conjunto de dados resultantes, precedeu-se à análise de agrupamento, visando à aglomeração de pontos com comportamentos estatisticamente semelhantes.

3.4.1.2 Identificação de regiões homogêneas

3.4.1.2.1 Análise de cluster

A identificação de regiões homogêneas foi feita com base na variável balanço hídrico com o recurso da análise de agrupamentos já descrita no item 3.3.2.2.

3.4.1.2.2 Medida de heterogeneidade por momentos-L

Os agrupamentos obtidos pela análise de cluster foram avaliados pelas medidas de discordância (D_i) e de heterogeneidade (H), estatisticamente baseadas em momentos-L, conforme descrição de Hosking e Wallis (1997).

A medida de discordância foi aplicada com a finalidade de identificar, dentro dos clusters analisados, estações com características estatísticas muito discrepantes das demais.

A estação foi considerada discordante caso o valor de D_i associado a ela tenha sido classificado como $D_{i_{crit}}$, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Valores críticos da medida de discordância D_i

Nº de locais na região	$D_{i_{crit}}$
5	1,333
6	1,648
7	1,917
8	2,14
9	2,329
10	2,491
11	2,632
12	2,757
13	2,869
14	2,971
≥ 15	3

Fonte: Hosking e Wallis (1997).

Já a medida de heterogeneidade H avalia o grau de heterogeneidade de uma região pela comparação entre a variabilidade amostral observada e a variabilidade esperada para uma região homogênea.

Conforme recomendam Hosking e Wallis (1997), a região foi considerada como “aceitavelmente homogênea” se $H < 1$, “possivelmente heterogênea” se $1 < H < 2$ e “definitivamente heterogênea” se $H > 2$.

Para a realização dos processamentos referentes aos momentos-L, utilizou-se o programa R, com auxílio do pacote “lmomRFA” (HOSKING, J. R. M, 2015).

3.4.2 Estimativa da demanda de água pela irrigação

Para o cálculo das vazões unitárias consumidas mensalmente pela irrigação de cada cultura específica e considerando condições de bombeamento a fio d'água, foi considerada a equação:

$$q_{u,i} = \left(\frac{(\sum_{j=1}^{30} ET_{pc}) - P_{80\%}}{E_a} \right) \frac{NHD}{NTFP} \frac{1}{259,2} \quad (16)$$

em que: $q_{u,i}$ = vazão unitária necessária para a cultura de interesse no mês i , $L s^{-1} ha^{-1}$; $ET_{pc,j}$ = evapotranspiração potencial da cultura para o dia j , $mm d^{-1}$; $P_{80\%}$ = precipitação provável mensal associada a 80% de probabilidade, $mm mes^{-1}$; E_a = eficiência de aplicação, adimensional; $NHD/NTFP$ = número de horas no dia/número de horas fora do horário de ponta para a tarifação da energia elétrica; e $1/259,2$ = fator de conversão de unidades.

Para aplicação dessa equação foram utilizados os valores médios mensais espacializados de evapotranspiração de referência de longa duração e de precipitações prováveis correspondentes a cada região homogênea identificada. A determinação das outras variáveis da equação foi feita segundo metodologias descritas na sequência.

No presente trabalho, não foram considerados na estimativa das vazões unitárias consumidas mensalmente pela irrigação os aspectos fitossanitários referentes ao não plantio das culturas soja e feijão em períodos específicos do ano, os quais são adotados com o objetivo de evitar doenças e pragas nas lavouras.

3.4.2.1 Evapotranspiração potencial da cultura – ET_{pc}

Foram consideradas algumas das principais culturas irrigadas na bacia, sendo elas: milho, soja, feijão e cana-de-açúcar – culturas temporárias; e banana e café - culturas permanentes. Para obtenção dos coeficientes dessas

culturas e sua respectiva fase de duração, Tabela 2, foi utilizado o boletim 33 FAO (DOORENBONS; KASSAM, 1994).

Tabela 2 - Coeficiente da cultura e duração dos respectivos estádios fenológicos das culturas utilizados no estudo

	Milho		Feijão		Soja	
	Kc	Duração (dias)	Kc	Duração (dias)	Kc	Duração (dias)
Estabelecimento	0,35	25	0,35	10	0,35	10
Vegetativo	0,83	40	0,7	20	0,75	30
Floração	1,12	20	1	15	1	25
Desenvolvimento	0,88	45	0,93	25	0,75	30
Maturação	0,56	15	0,86	20	0,45	10

	Cana-de-açúcar	
	Kc	Duração (dias)
Do plantio até 0,25 de cobertura	0,50	30
De 0,25 a 0,50 de cobertura	0,80	30
De 0,50 a 0,75 de cobertura	0,95	15
De 0,75 a cobertura completa	1,10	45
Utilização máxima	1,18	180
Início da senescência	0,93	30
Maturação	0,68	30

Para a banana e o café, foram adotados coeficientes iguais a 1,2 e 0,9, respectivamente.

Assim, a evapotranspiração potencial da cultura que corresponde à evapotranspiração máxima da cultura durante suas diversas fases de desenvolvimento foi então dada pela equação:

$$ET_{pc} = ET_0 Kc \quad (17)$$

em que: ET_{pc} = evapotranspiração potencial da cultura, mm d⁻¹; e Kc = coeficiente da cultura para determinada fase de desenvolvimento, adimensional.

3.4.2.2 Eficiência de aplicação – Ea

A eficiência de aplicação (Ea) é um fator de correção da quantidade total de água utilizada na irrigação, pois considera as possíveis perdas que podem ocorrer no sistema.

Para cada tipo de cultura, foi associado o método de irrigação de uso mais frequente, sendo o método de irrigação por aspersão associado às culturas temporárias e o de irrigação localizada, às culturas permanentes, sendo considerado, para ambos, o valor de eficiência de aplicação correspondente a 0,9.

3.4.2.3 Fator relativo às horas de bombeamento por dia (NHD/NHFP)

Esse fator foi considerado devido ao estabelecimento, pelos portos tarifários, de tarifas diferenciadas ao longo do dia. Exceto aos sábados, domingos e feriados nacionais, há o que é denominado tarifas de ponta e intermediária. A tarifa de ponta corresponde ao período de 3 horas consecutivas diárias, das 18:00 às 21:00h, e a intermediária corresponde ao período formado pela hora imediatamente anterior e a hora imediatamente posterior ao período de ponta, totalizando 2 horas, das 17:00 às 18:00h e das 21:00 às 22:00h. Logo, a tarifa diferenciada recairia sobre o período de 5 horas de duração entre as 17:00 às 22:00h. Assim, o uso da relação NHD/NHFP representa uma compensação de vazão para irrigação correspondente às horas do dia fora do horário de tarifa diferenciada, estimado pela razão 24/19 (IBIO; FUNARBE, 2013).

3.4.3 Aprimoramento do fator de uso da água na irrigação

O fator de uso da água na irrigação proposto por IBIO e Funarbe (2013), apresentado na equação 18, buscou a determinação de uma demanda a ser suprida pela irrigação que pudesse servir de referência aos mecanismos de cobrança como um incentivo ao aumento da eficiência do uso da água.

$$F_{ui} = \frac{q_{out,i}}{q_{u,i (tab)}} \quad (18)$$

em que: $q_{out,i}$ = vazão unitária outorgada para cada cultura por mês, $L s^{-1} ha^{-1}$; e $q_{u,i (tab)}$ = vazão unitária tabelada com base na demanda necessária para a cultura de interesse no mês i , $L s^{-1} ha^{-1}$.

Os valores de vazões unitárias tabeladas foram definidos com base em valores mensais de vazões correspondentes à efetiva demanda de água para irrigação, e valores mínimos prefixados, justificados pelo fato de a oferta de água em alguns meses dispensar a imposição de severas restrições.

Tendo em vista uma alocação mais eficiente do uso da água no decorrer do ano frente à variação de disponibilidade hídrica na hidrografia e às incertezas associadas ao processo de definição das vazões mínimas prefixadas, buscou-se no presente estudo um aprimoramento dos valores $q_{u,i (tab)}$. Esse aprimoramento foi proposto visando desestimular o uso da água nos meses de maior escassez, e no período de maior oferta hídrica substituir valores prefixados por um critério que esteja associado a um valor estimado de demanda hídrica.

O aperfeiçoamento do $q_{u,i (tab)}$ foi condicionado à análise dos resultados, estando descrito no item 4.2.2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento de metodologia de valoração da água com base na disponibilidade sazonal dos recursos hídricos

4.1.1 Análise da variação sazonal das vazões mínimas com base nas $Q_{7,10}$ mensais e da relação entre as $Q_{7,10}$ mensais e anual

Na Figura 3 são representados os valores de vazões específicas correspondentes às $q_{7,10}$ mensais para cada estação fluviométrica considerada no estudo, sendo as linhas ligando os marcadores utilizadas apenas para facilitar a visualização da variação das vazões, não uma indicação de continuidade dos valores. A representação em termos de vazões específicas foi feita no sentido de facilitar a comparação das vazões correspondentes às diferentes estações. No Apêndice C, são apresentados os valores de $Q_{7,10}$ estimados em base mensal e anual para cada estação fluviométrica.

Pela análise da Figura 3, pode-se evidenciar que, apesar da grande amplitude de variação das vazões específicas obtidas, a tendência de variação destas ao longo do ano apresentou bastante semelhança entre as estações fluviométricas consideradas.

No período de abril a outubro, há um declínio contínuo nas $q_{7,10}$, que, associadas à contribuição do escoamento subterrâneo, têm tendência à diminuição com o deplecionamento do nível do lençol freático, em consequência das precipitações de baixas magnitudes (Figura 4), desse intervalo de meses, não serem suficientes para garantir sua recarga.

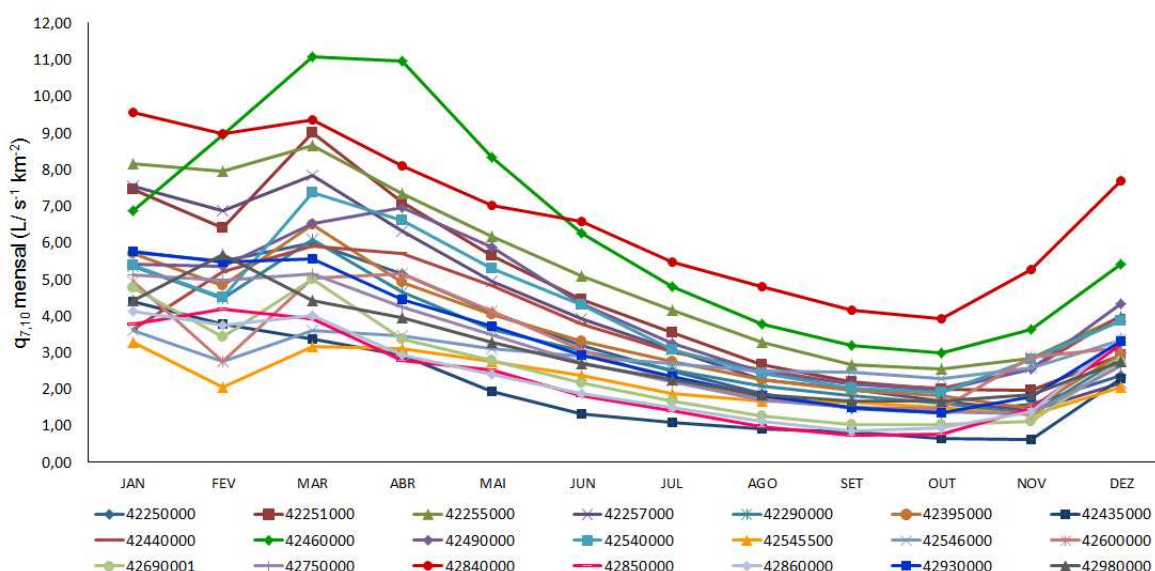


Figura 3 - Valores mensais de $q_{7,10}$ para cada estação fluviométrica.

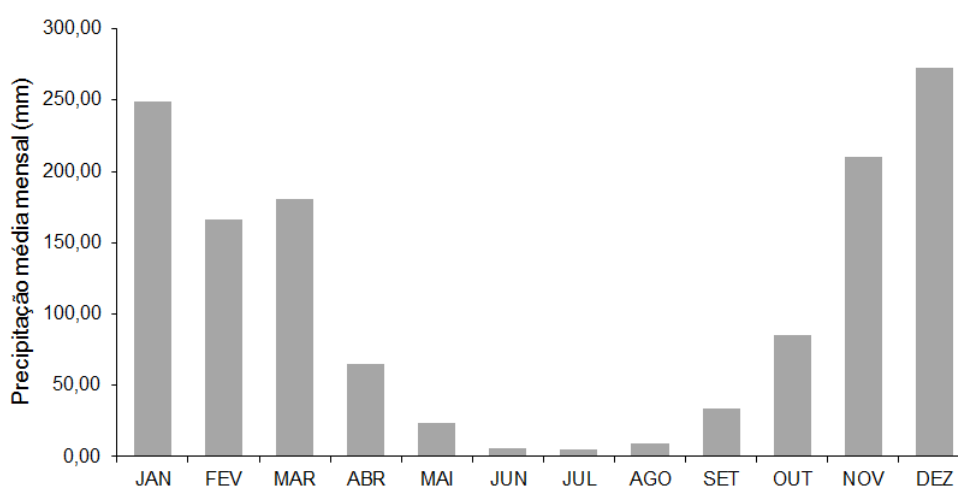


Figura 4 - Precipitações médias mensais da bacia do Paracatu, obtidas por interpolação pelo método IDW de dados de 28 estações pluviométricas do período de 1976 a 2005.

Embora a Figura 4 indique o início das precipitações na bacia no mês de setembro, as vazões continuam a decrescer, o que acontece porque a água que precipita após um longo período de estiagem é destinada, primeiramente, ao suprimento do déficit de umidade do solo, não acarretando aumentos expressivos no escoamento superficial direto ou das perdas por percolação. Consequentemente, as vazões mínimas, vinculadas ao escoamento subterrâneo, não são influenciadas pelas precipitações ocorridas no período, o

que envolve uma defasagem entre o início do período de chuvas e o início do aumento das vazões.

Com o aumento do total precipitado, as vazões mínimas deixam de ser ditadas por um regime de recessão do escoamento subterrâneo, pois o escoamento superficial surge como componente adicional de contribuição para a formação das vazões. Em decorrência das variações de distribuição temporal e espacial da precipitação e das diferentes características físicas ao longo da bacia, o escoamento superficial provoca um efeito de maior variação nas vazões para as diferentes estações fluviométricas.

No mês de fevereiro, a redução da contribuição advinda do escoamento superficial, como reflexo da diminuição das precipitações, implica uma inversão de comportamento das vazões mínimas no leito dos rios. Já no mês de março, com o aumento das chuvas na bacia, são formadas as máximas vazões mínimas mensais.

Na Figura 5 está apresentado o resultado das relações entre as vazões mínimas mensais e anual, estimadas para cada uma das estações fluviométricas consideradas no estudo. Também nesta figura as linhas não representam continuidade de valores, sendo usadas apenas com o objetivo de permitir uma melhor visualização da variação dos resultados obtidos ao longo do ano.

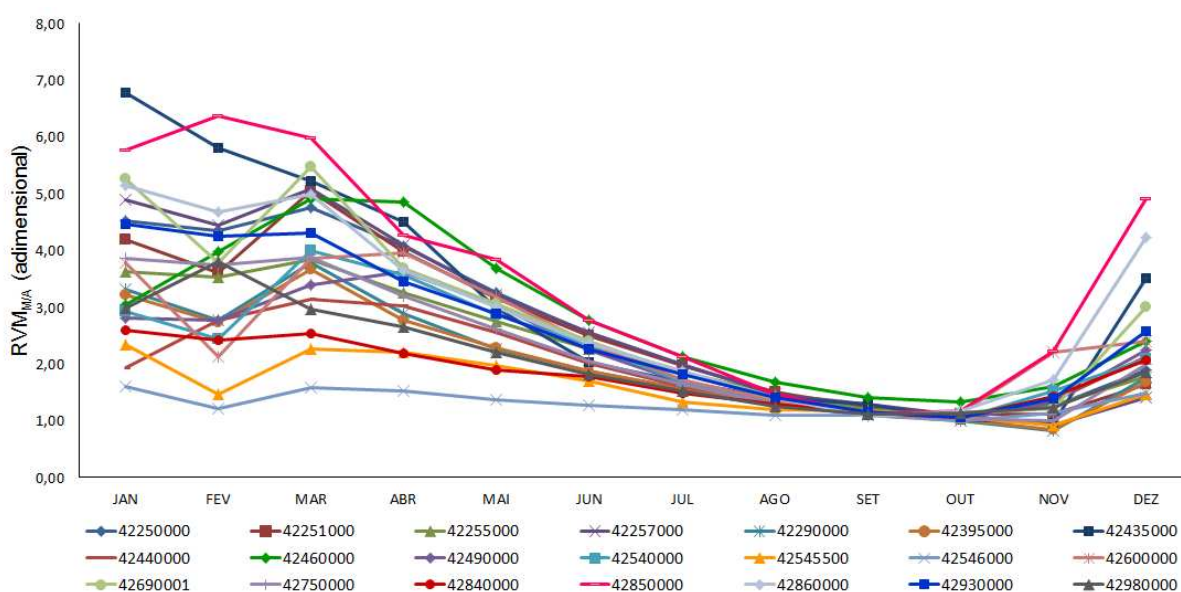


Figura 5 – Valores obtidos pela relação entre as vazões mínimas mensais e anual para 21 estações fluviométricas.

Na Figura 5, a relação entre as $Q_{7,10}$ mensais e anual evidencia comportamento similar ao descrito para as $q_{7,10}$ mensais, porém permitindo uma melhor percepção da amplitude de variação das vazões.

Observa-se que a relação $RVM_{M/A}$ tende à unidade com a aproximação do período de estiagem, pois as vazões mínimas, em declínio com a recessão de escoamento subterrâneo, têm seus valores mensais aproximados ao mínimo anual. Nota-se que para a bacia do Paracatu há uma concentração dessas ocorrências de vazões mínimas mensais nos meses de setembro, outubro e novembro, os quais, segundo estudo de Novaes (2005), detêm 91,6% das ocorrências de Q_7 .

Com o início das precipitações, acompanhadas de um distinto comportamento do escoamento superficial ao longo da bacia, nota-se um acentuado espectro de variação dos valores obtidos pela relação entre vazões mínimas mensais e anual. No mês de janeiro, os valores da $RVM_{M/A}$ estimados apresentam, para diferentes estações fluviométricas, valores da ordem de 1,59 a 6,78 vezes suas respectivas vazões mínimas anuais, indicando um expressivo aumento de disponibilidade hídrica em relação ao período mais crítico.

Evidencia-se, portanto, que a consideração de um critério único de cobrança pelo uso da água ao longo do ano, tomando como referência a baixa oferta hídrica de um período específico, reflete indevidamente seu valor nos meses mais chuvosos. Essa consideração tem ainda maior relevância diante do fato do período de maior demanda pelos recursos hídricos pelos diversos usuários nem sempre ser coincidente com o período de menor disponibilidade hídrica na hidrografia.

A análise desse comportamento das vazões mínimas mensais vem de encontro ao evidenciado por Oliveira et al. (2013), Pruski et al. (2014) e Silva (2014) no que se relaciona ao aumento do potencial de utilização dos recursos hídricos em determinados meses, conduzindo ao objetivo de um diferente critério de valoração ao longo do ano.

4.1.2 Uso do *box plot* para identificação de *outliers*

A Figura 6 apresenta o resultado da estatística *box plot* aplicada aos valores estimados pelas relações entre as vazões mínimas mensais e anual, para as 21 estações fluviométricas.

Os limites superiores e inferiores, marcados em azul na Figura 6, foram estimados com base nos quartis obtidos dos valores mensais das $RVM_{M/A}$ para as diferentes estações, e definem os intervalos para os quais as $RVM_{M/A}$ são aceitáveis.

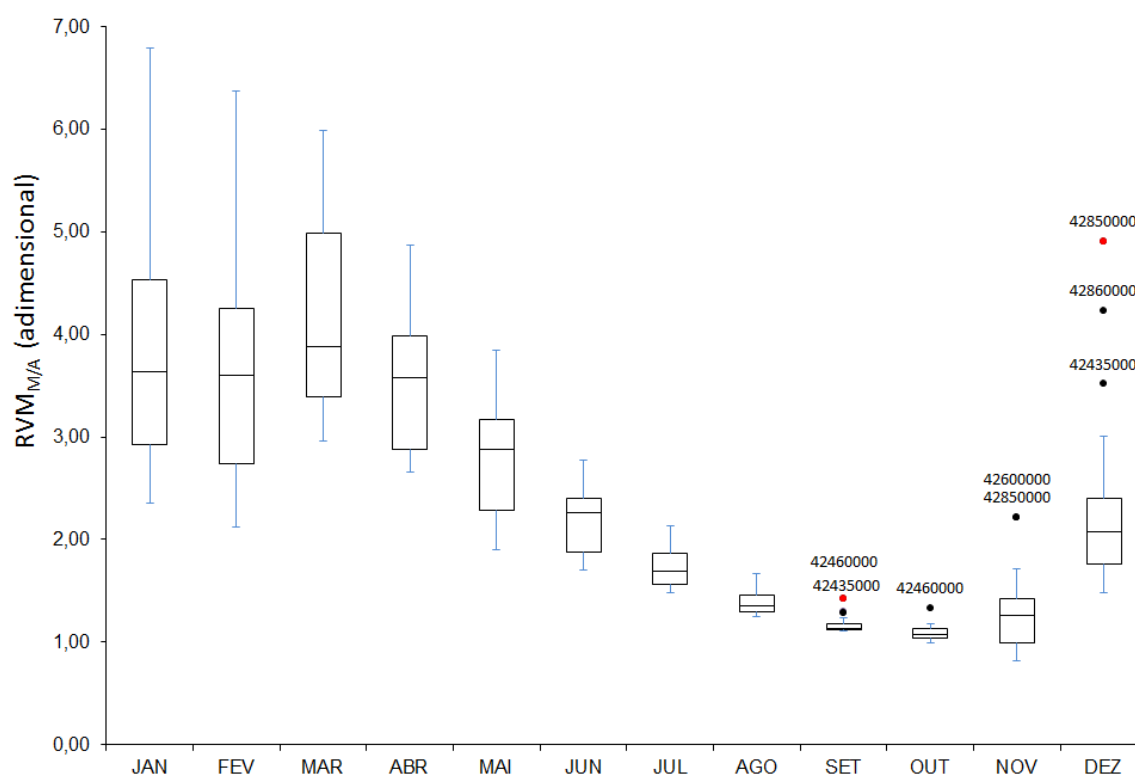


Figura 6 - Gráfico box plot para os valores mensais obtidos para a relação entre as vazões mínimas mensais e anual.

O *box plot* identificou na análise seis estações com dados discrepantes (42460000, 42850000, 42435000, 42257000, 42600000 e 42860000) resultando em um total de oito outliers, dois deles classificados como *outliers* extremos, destacados em vermelho na Figura 6.

Conforme se pode visualizar, a ocorrência dos outliers se deu unicamente acima do limite superior e nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, que estão diretamente associados à entrada do escoamento superficial como componente adicional à formação das vazões. Com o início das precipitações, que apresentam variações temporais e espaciais ao longo da bacia, cada área de drenagem correspondente às estações fluviométricas responde diferentemente à formação do escoamento superficial. Assim, o retardo ou adiantamento desse processo em algumas partes da bacia acabou por ser identificado como comportamento anômalo, visto que os valores característicos do período de estiagem vinham apresentando baixa variação por estarem associados unicamente a contribuições subterrâneas.

Os meses associados às maiores magnitudes dos valores da $RVM_{M/A}$ foram os que apresentaram no *box plot* maior amplitude no estabelecimento dos valores limites. Isso se deve à presença de uma considerável e espacialmente variável parcela de contribuição do escoamento superficial, que provoca uma dispersão dos valores de vazão ao redor da média.

Diante dos resultados observados, não se considerou conveniente fazer a exclusão dos dados de nenhuma das estações fluviométricas, visto os *outliers* estarem concentrados em meses específicos, havendo uma justificativa física a eles associados, o que não sugere a ocorrência de dados hidrológicos inconsistentes.

Assim, a identificação de regiões homogêneas foi feita considerando os valores mensais da $RVM_{M/A}$ estimados para todas as 21 estações fluviométricas utilizadas no estudo.

4.1.3 Identificação de regiões homogêneas

Com base nas análises de agrupamento, verificou-se que nenhum dos resultados se mostrou satisfatório, uma vez que os clusters foram formados de estações que não guardam entre si uma relação de continuidade geográfica, o que implicaria uma dificuldade de implementação do uso do fator de sazonalidade. Considerou-se, desse modo, a bacia hidrográfica como região hidrologicamente homogênea.

4.1.4 Determinação do fator de sazonalidade

Considerando que a bacia apresenta comportamento hidrológicamente homogêneo e a não exclusão de estações pela análise do *box plot*, estimou-se, para cada mês do ano, um valor médio da relação entre a $Q_{7,10}$ mensal e anual, sendo os resultados obtidos apresentados na Figura 7.

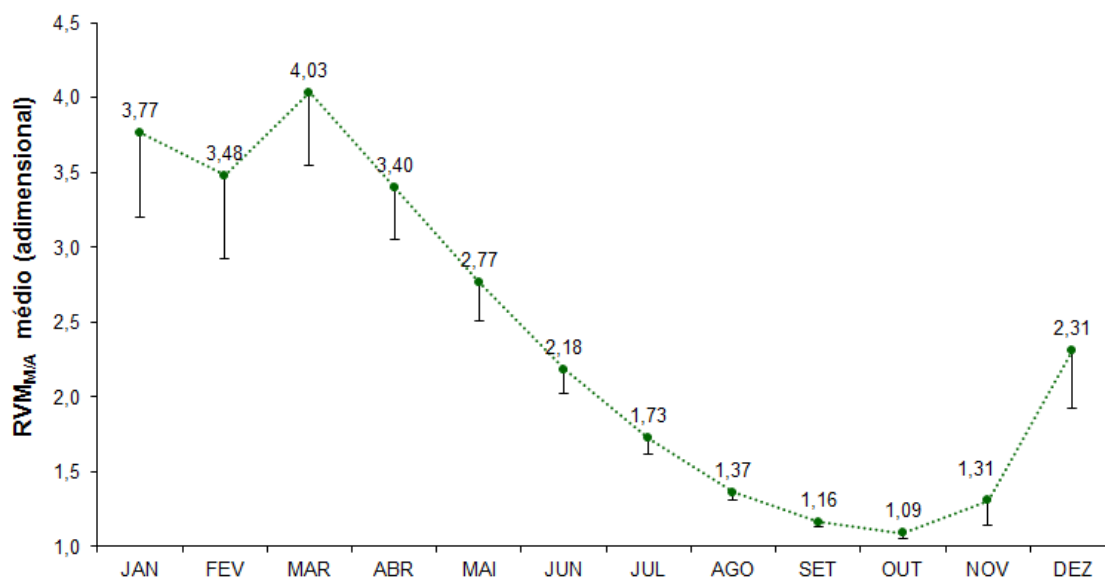


Figura 7 – Valores médios da relação entre as vazões mínimas mensais e anual.

A Figura 7 mostra o comportamento médio relativo às condições da Figura 5. Observa-se que os maiores valores mensais médios da $RVM_{M/A}$ são observados nos meses de janeiro a março, a partir do qual, pela predominância de um regime de recessão de escoamento subterrâneo, há um decréscimo dessa relação até o mês de outubro. Com o início do período chuvoso, e, por conseguinte, o atendimento ao déficit de umidade do solo e a recarga do lençol freático, tem-se a formação de escoamento superficial, que implica o crescimento dos valores mensais médios obtidos pela $RVM_{M/A}$.

Associados aos marcadores, são representados na Figura 7 os intervalos de confiança inferiores, com 95% de probabilidade, estimados com base nos valores mensais da $RVM_{M/A}$ das 21 estações fluviométricas. Observa-se que os intervalos de confiança apresentam baixos valores no período de estiagem, à exceção do mês de novembro, que, subsequentemente ao mês de outubro,

que segundo Novaes (2005), detém 42,2% das ocorrências de Q_7 , marca o início do crescimento das vazões mínimas mensais em algumas estações da bacia. Com a elevação dos valores da $RVM_{M/A}$ em decorrência da maior amplitude de variação da magnitude das vazões mínimas mensais em relação às mínimas anuais ao longo da bacia, evidencia-se maior intervalo de confiança.

O desenvolvimento do critério que permite a consideração da sazonalidade de vazões é fundamentado na análise do comportamento médio mensal das $RVM_{M/A}$ evidenciado ao longo do ano e está, passo a passo, apresentado na sequência.

Primeiramente, com o objetivo de associar a máxima valoração ao mês de maior escassez, propôs-se que, para a representação do fator de sazonalidade, fosse interessante a consideração da inversão do valor relativo correspondente aos valores mensais médios obtidos pela $RVM_{M/A}$, de tal forma que seja expresso pela equação:

$$F_{s(1^a \text{ aprox.}), i} = \frac{1}{RVM_{M/A, i}} \quad (19)$$

em que: $F_{s(1^a \text{ aprox.}), i}$ = fator de sazonalidade - 1ª aproximação no mês i (adimensional), e $\overline{RVM_{M/A, i}}$ = valor médio da relação entre a vazão mínima mensal e anual no mês i (adimensional).

O termo “1ª aproximação” visa a caracterizar uma proposição provisória à qual outros aperfeiçoamentos ainda serão aplicados a partir da análise dos resultados obtidos. A Figura 8 apresenta os valores do fator de sazonalidade - 1ª aproximação estimados pela aplicação da equação 19 para os valores mensais médios da $RVM_{M/A}$ (Figura 7).

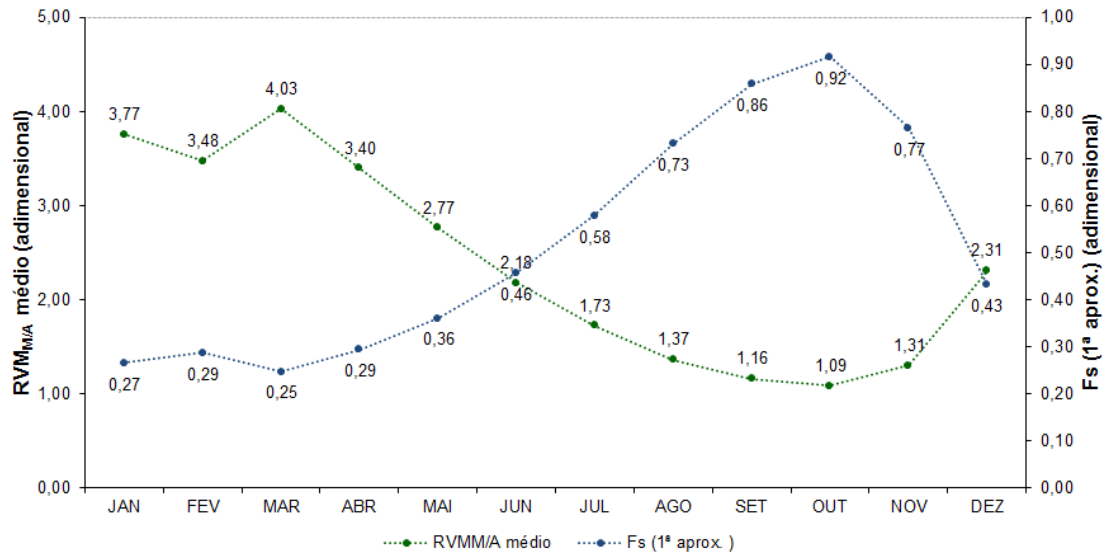


Figura 8 – Valores médios da relação entre as vazões mínimas mensais e anual, e fator de sazonalidade – 1ª aproximação.

Pela análise dos valores mensais do F_s (1ª aprox.) observa-se que, conforme previsto, os meses associados aos menores valores do fator são aqueles característicos de maiores disponibilidades hídricas na hidrografia, o que envolve maiores descontos a eles associados. Entretanto, conforme se pode notar, tem-se um fator de desconto associado a todos os meses do ano, pois todos os fatores são menores que um, o que envolveria um deplecionamento do custo final da água, inclusive, em seu período de maior escassez, o que é contraditório com a ideia de valoração de recursos hídricos.

Esse fato levou a um novo ajuste, de modo que o mês de menor disponibilidade, no caso outubro, esteja associado a um valor unitário, caracterizando, portanto, a 2ª aproximação do fator de sazonalidade, feita pela equação:

$$F_{s(2^a \text{ aprox.}), i} = \left(\frac{1}{F_{s(1^a \text{ aprox.}), \text{out}}} \right) F_{s(1^a \text{ aprox.}), i} \quad (20)$$

em que: $F_{s(2^a \text{ aprox.}), i}$ = fator de sazonalidade - 2ª aproximação (adimensional) para o mês i ; $F_{s(1^a \text{ aprox.}), \text{out}}$ = fator de sazonalidade - 1ª aproximação (adimensional) para o mês de outubro.

Substituindo na equação 20 o valor do $F_{s(1^a \text{ aprox.}), \text{out}}$ para o mês de outubro, correspondente a 0,92, tem-se:

$$F_{s(2^a \text{ aprox.}), i} = 1,09 (F_{s(1^a \text{ aprox.}), i}) \quad (21)$$

A Figura 9 mostra os valores mensais dos fatores de sazonalidade 1ª e 2ª – aproximações, representados em azul e vermelho, respectivamente. A aplicação do ajuste resultou em uma sobre-elevação dos valores do $F_{s(1^a \text{ aprox.})}$, implicando mudança dos seus valores ao longo do ano, porém resguardada a proporção original de variação dos F_s entre os meses. Ao mês de outubro, caracterizado como mais crítico, foi associado um valor unitário, de modo a preservar o valor da água para esse mês.

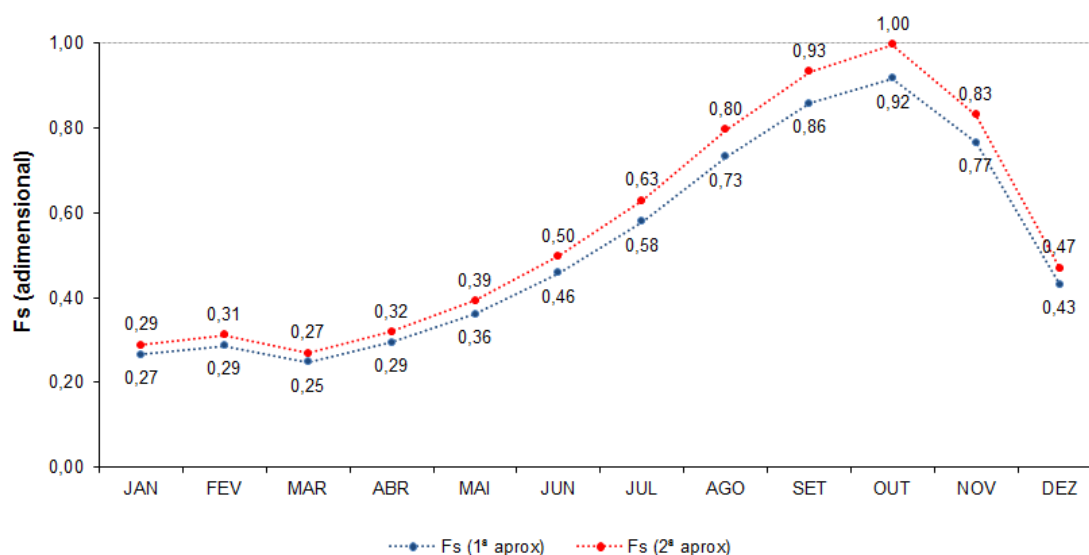


Figura 9 – Fatores de sazonalidade - 1ª e 2ª aproximações.

Sendo o $F_{s(2^a \text{ aprox.})}$ para o mês de novembro estimado em 0,83, e que sua aplicação acarretaria um fator de desconto de cerca de 17% no valor da água para esse mês, o qual, segundo análise da série histórica está associado a uma considerável frequência de ocorrência de vazões mínimas, considerou-se necessário um terceiro aprimoramento para o fator de sazonalidade, sendo para tal, considerados os seguintes aspectos:

- a) na análise do comportamento das vazões ao longo da bacia, foram observadas estações com ocorrência de vazões mínimas no mês de novembro, o que pode ser visto pela análise dos valores de $q_{7,10}$ apresentados na Figura 3.
- b) o fator de sazonalidade, estimado com base em um valor médio, não considera a existência de uma variabilidade interanual e as incertezas associadas à predição das vazões mínimas, as quais são representadas pelo maior intervalo de confiança existente no mês de novembro em relação aos meses em que as vazões mínimas estão associadas quase que exclusivamente à contribuição advinda do escoamento subterrâneo (Figura 7).

Desse modo, o aprimoramento do fator de sazonalidade - 3ª aproximação foi feito pela substituição dos valores médios da relação entre vazões mínimas mensais e anual pelos valores correspondentes ao limite inferior do intervalo de confiança.

A equação 22 apresenta o equacionamento para o cálculo do fator de sazonalidade – 3ª aproximação, sendo o fator de ajuste 1,05, incluído na 2ª aproximação, diferente do valor inicialmente proposto na equação 21, visto que em sua estimativa foi feita a substituição dos valores médios mensais no $F_{s(1^a \text{ aprox.}), i}$ pelos correspondentes limites inferiores do intervalo de confiança.

$$F_{s(3^a \text{ aprox.}), i} = 1,05 (F'_{s(1^a \text{ aprox.}), i}) \quad (22)$$

em que: $F_{s(3^a \text{ aprox.}), i}$ = fator de sazonalidade - 3ª aproximação para o mês i ;
 $F'_{s(1^a \text{ aprox.}), i}$ = fator de sazonalidade - 1ª aproximação para o mês i estimado com base no limite inferior do intervalo de confiança.

A Figura 10 mostra os valores mensais do $F_{s(3^a \text{ aprox.})}$ juntamente ao $F_{s(2^a \text{ aprox.})}$, representados em preto e vermelho, respectivamente. Observa-se que a utilização do intervalo de confiança inferior gera um efeito desejado em relação à aproximação anterior, visto que promove a elevação do fator nos

meses que apresentam maiores variações dos valores de vazão mínima em relação ao valor médio. A variação mais perceptível ocorre no mês de novembro.

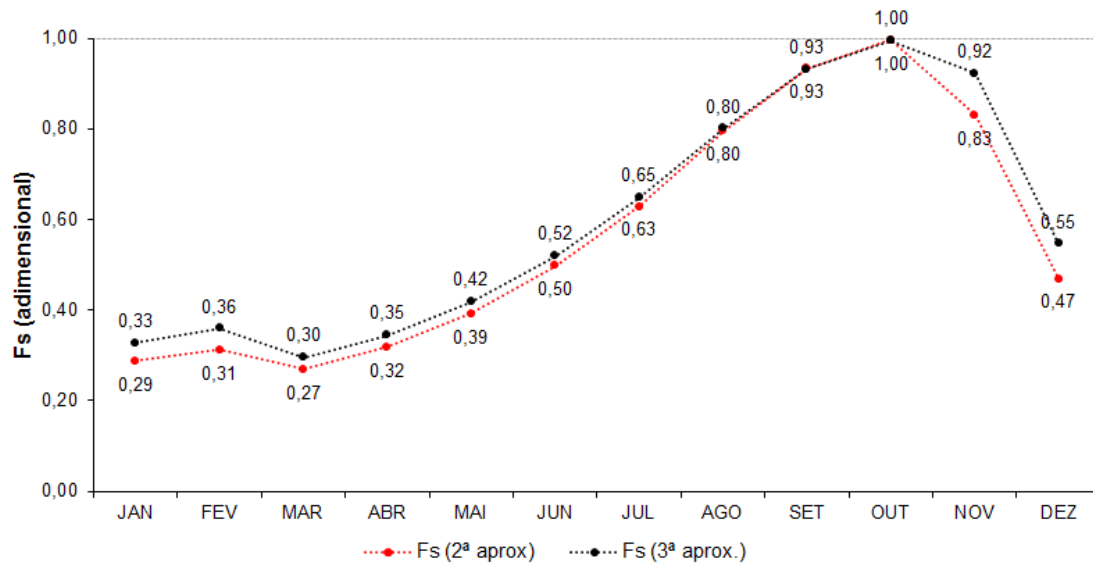


Figura 10 – Fatores de sazonalidade - 2ª e 3ª aproximações.

O fator de sazonalidade – 3ª aproximação constitui, portanto, os valores propostos para o fator de sazonalidade neste trabalho, e tem sua estimativa com base na consideração de todos os aprimoramentos, resumidamente representada na equação:

$$F_{s,i} = \frac{1,05}{\overline{RVM}_{M/A (ICI),i}} \quad (23)$$

em que: $F_{s,i}$ = fator de sazonalidade para o mês i e $\overline{RVM}_{M/A (ICI),i}$ = limite inferior do intervalo de confiança associado à média dos valores obtidos da relação entre a vazão mínima mensal e anual para o mês i .

Desse modo, a cada mês tem-se definido um valor para o fator de sazonalidade, que, como multiplicador, associa um desconto ao valor da água proporcional ao incremento de disponibilidade correspondente a cada mês.

4.2 Aprimoramento de metodologia de valoração da água com base na efetiva demanda hídrica das culturas

4.2.1 Identificação e validação de regiões homogêneas quanto ao balanço hídrico

A identificação de regiões homogêneas pela análise de cluster feita com base no balanço hídrico entre evapotranspiração de referência e precipitação provável com 80% de probabilidade de ocorrência resultou em dois agrupamentos, denominados regiões 1 e 2 (Figura 11).

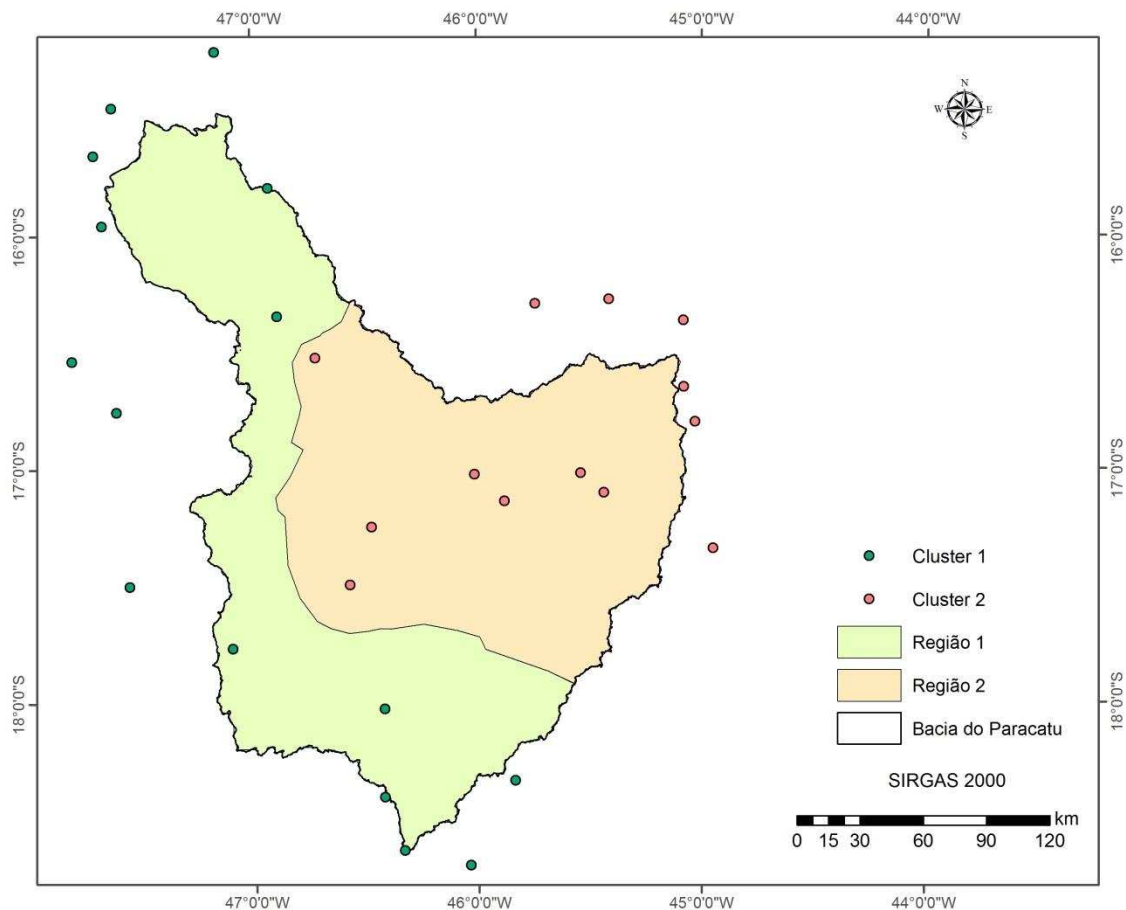


Figura 11 - Regiões homogêneas quanto ao déficit hídrico na Bacia do Paracatu.

A região 1, que abrange as porções noroeste, oeste e sul da bacia, foi delimitada com base na localização de 15 das 28 estações pluviométricas

consideradas para o cálculo do balanço hídrico. Já a região 2, que abrange a porção central, leste e noroeste, foi formada pelas 13 estações restantes.

Essa configuração dos grupos, resultante da medida de ligação completa, foi a que apresentou o melhor desempenho nos testes feitos para as medidas estatísticas de heterogeneidade e discordância. A Tabela 3 mostra que todas as três medidas de heterogeneidade propostas por Hosking e Wallis (1997) foram menores do que 1, portanto, consideradas aceitavelmente homogêneas.

Tabela 3 - Medidas de heterogeneidade por região

Região	Número de estações	H 1	H 2	H 3	Conclusão
Região 1	15	-0,15	-0,16	-2,17	Aceitavelmente homogênea
Região 2	13	-0,23	-0,32	-3,11	Aceitavelmente homogênea

A Figura 12 apresenta o comportamento do balanço hídrico específico estimado para cada região, sendo os valores mensais obtidos pela média dos valores de balanço hídricos espacializados para a bacia do Paracatu. As linhas ligando os marcadores foram utilizadas apenas para facilitar a visualização das variações do balanço hídrico, não como uma indicação de continuidade dos valores.

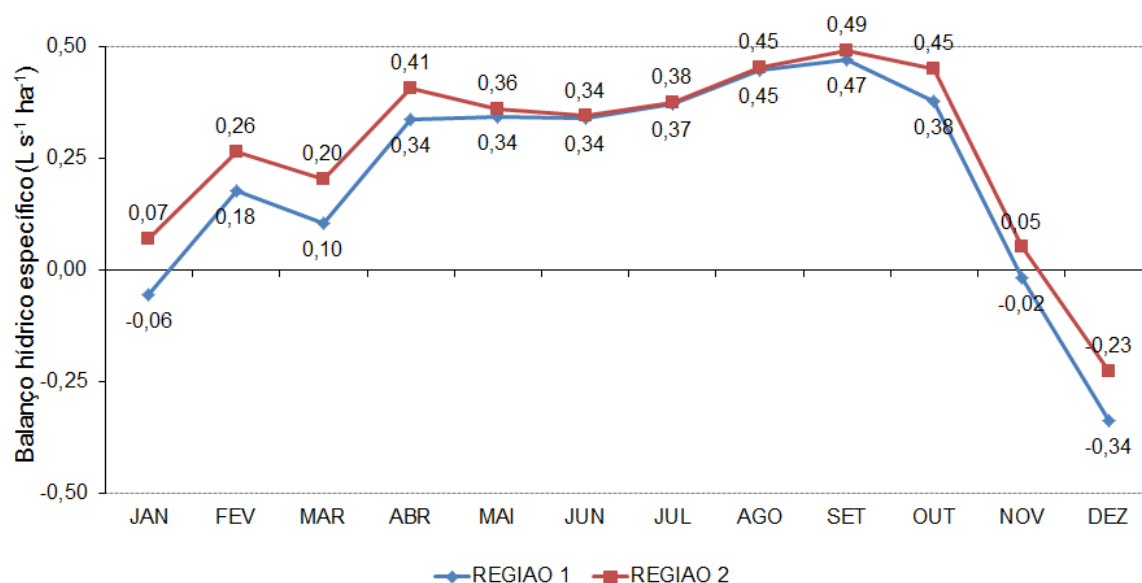


Figura 12 – Balanço hídrico médio específico para cada mês e região homogênea.

Observa-se que, no período de maio a setembro, os valores de déficit hídrico são similares ao longo da bacia, fato este que está diretamente relacionado ao comportamento das precipitações (Figura 13), as quais, associadas a uma probabilidade de ocorrência de 80%, são expressivamente baixas, permitindo que a evapotranspiração, caracterizada pela baixa variabilidade espacial, seja a variável governante do valor de déficit hídrico nesse período. Nos meses de junho, julho e agosto, nos quais, segundo Brasil (1998), chove apenas 2% do total anual, os valores de déficit hídrico foram idênticos para as duas regiões.

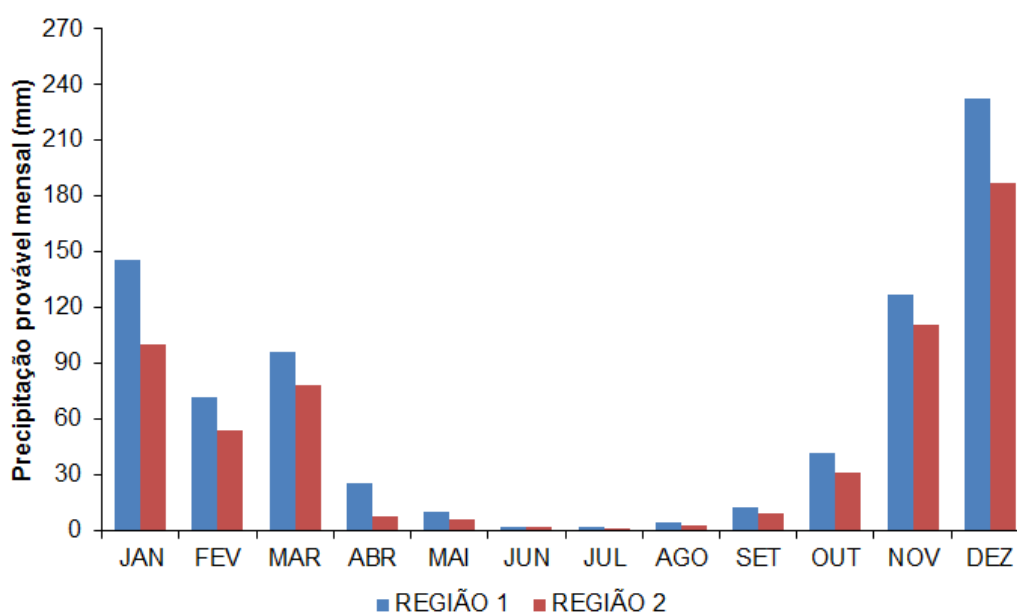


Figura 13 – Precipitações prováveis mensais com 80% de probabilidade de ocorrência correspondentes à localização do centroide das regiões 1 e 2, obtidas pela interpolação por IDW de dados de 28 estações pluviométricas, para o período de 1976 a 2005.

O mês de setembro, que caracteriza o maior déficit hídrico do ano, marca o início de uma pequena mudança de comportamento das duas regiões, entretanto, ainda pouco expressiva em virtude de estar associada ao início das precipitações. O período chuvoso, de outubro a abril, que, segundo IGAM (2006), abrange 93% dos totais anuais, é o que apresenta maiores variações de balanço hídrico ao longo da bacia, o que decorre da maior parcela de participação das precipitações, envolvendo maior variabilidade espacial e

temporal. Os maiores valores de déficit hídrico foram observados na região 2, que confirma o que foi relatado por Brasil (1998) sobre o déficit hídrico total anual ser maior na parte nordeste da bacia, próximo à foz do Paracatu. Essa região, além de exigir maior demanda hídrica, em função das menores precipitações, ainda se caracteriza, segundo evidenciado em estudo de Rodriguez (2004), pela existência de baixas vazões específicas, implicando menor disponibilidade hídrica em relação à região 1.

É evidenciada a ocorrência de excesso hídrico ao longo dos meses de novembro, dezembro e janeiro para a região 1, enquanto na região 2 esse excesso é apontado apenas no mês de dezembro.

A análise do balanço hídrico mostrou que o comportamento dos extremos leste e oeste da bacia do Paracatu é bastante diferente em determinados períodos do ano, resultando em diferentes necessidades de suplementação hídrica para as duas regiões homogêneas identificadas, evidenciando a importância da sua consideração na estimativa das vazões demandadas pela irrigação.

4.2.2 Aprimoramento do fator de uso da água na irrigação

Na sequência, são apresentados os passos para o aprimoramento do fator de uso da água na irrigação, mais especificamente no que diz respeito à variável caracterizada na metodologia (equação 18) como vazão unitária tabelada com base na demanda necessária para a cultura de interesse. Para a representação dos aprimoramentos feitos, foram selecionadas duas culturas temporárias (soja e cana-de-açúcar) e uma permanente (banana), tendo sido para ambas as culturas, consideradas as condições climáticas da região hidrologicamente homogênea 2.

4.2.2.1 Soja

Para a estimativa da vazão unitária necessária para a cultura da soja, foram considerados 12 calendários de cultivo ao longo do ano, correspondentes ao plantio no primeiro dia de cada mês (Figura 14).

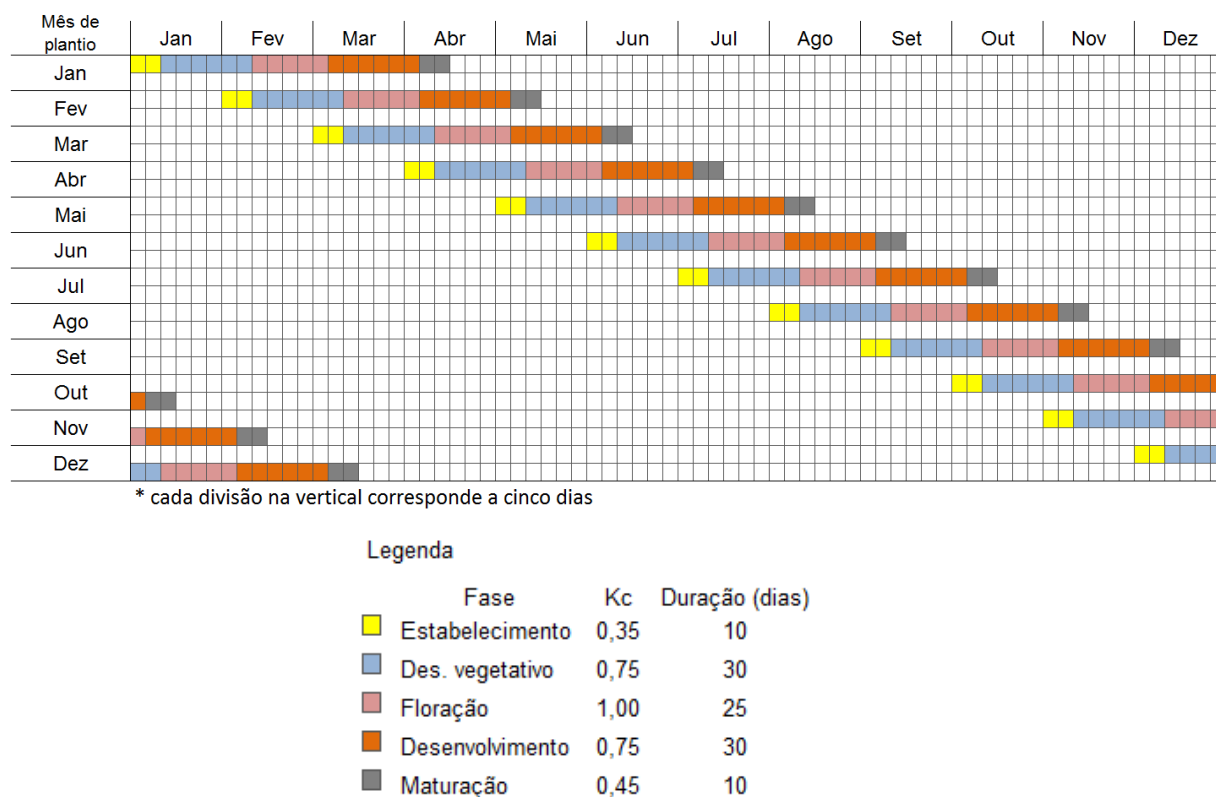


Figura 14 – Representação da distribuição dos estádios de desenvolvimento para a cultura da soja, considerando 12 calendários de cultivo ao longo do ano.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores mensais de $q_{u,i}$ estimados pela equação 16, referentes ao plantio da soja, conforme a distribuição dos estádios de desenvolvimento apresentada na Figura 14. A linha correspondente ao $q_{u,i} \text{ (máx.)}$ corresponde à máxima vazão unitária necessária entre os calendários de cultivo considerados e possibilita ao irrigante a alternativa de desenvolver o plantio em cada um dos 12 meses do ano. Nesse sentido, para as análises posteriores, foram considerados os valores correspondentes aos máximos consumos mensais.

Tabela 4 – Vazão unitária necessária ($L s^{-1} ha^{-1}$) para irrigação da soja na região 2 da bacia do Paracatu, considerando 12 datas de plantio

Mês de plantio	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Jan	0,00	0,34	0,14	0,11								
Fev		0,12	0,22	0,44	0,12							
Mar			0,02	0,52	0,40	0,13						
Abr				0,33	0,46	0,38	0,14					
Mai					0,30	0,45	0,42	0,16				
Jun						0,30	0,48	0,50	0,15			
Jul							0,32	0,58	0,53	0,05		
Ago								0,39	0,63	0,46	0,00	
Set									0,40	0,56	0,00	0,00
Out	0,00									0,32	0,02	0,00
Nov	0,00	0,00									0,00	0,00
Dez	0,02	0,25	0,00									0,00
$q_{u,i} (máx.)$	0,02	0,34	0,22	0,52	0,46	0,45	0,48	0,58	0,63	0,56	0,02	0,00

Pela análise do comportamento dos valores de $q_{u,i} (máx.)$ ao longo do ano, Tabela 4, observa-se que os meses de agosto, setembro e outubro, correspondentes ao plantio efetuado em julho, agosto e setembro, respectivamente, são os que apresentaram os maiores valores de vazão unitária necessária, todas superiores a $0,55 L s^{-1} ha^{-1}$. Fazendo uma analogia entre esse resultado e o estudo do comportamento sazonal das vazões (Figura 7), constata-se que os meses que apresentam maiores magnitudes de demanda são coincidentes com os meses que apresentam menor disponibilidade hídrica.

Diante desse contexto, buscou-se associar aos valores de $q_{u,i} (máx.)$ um fator de desestímulo ao uso da água na irrigação, de modo a evitar, em condições a fio d'água, a ocorrência dos maiores valores de $q_{u,i} (máx.)$ no período de menor disponibilidade hídrica.

Considerou-se como critério para definição dos meses de menores disponibilidades um valor limite de $RVM_{M/A}$ (relação de vazões mínimas mensais e anual) igual a 1,5, que, para a bacia em estudo, corresponde aos meses de agosto, setembro, outubro e novembro (Figura 7). Este último mês, apesar de não apresentar elevado valor de vazão unitária necessária, entra como uma extensão à aplicação do fator de desestímulo em virtude de sua baixa disponibilidade hídrica.

O ajuste proposto consiste em evitar a coincidência do máximo valor de K_c , utilizado na estimativa de $q_{u,i}(\text{máx.})$, com os meses de menor disponibilidade, ou seja, com valores da $RVM_{M/A}$ inferiores a 1,5.

Considerando que para a soja o máximo valor de K_c é igual a 1, correspondente aos 25 dias de floração, a adoção desse ajuste para os meses de agosto a novembro implicou, para este mesmo estágio de desenvolvimento, que fosse considerado um valor de K_c igual a 0,75, o qual corresponde ao valor de K_c imediatamente inferior ao valor máximo. Com isso, os valores de $q_{u,i}(\text{máx.})$ decorrentes da consideração desse ajuste passam a ser chamados de máxima vazão unitária necessária com fator de restrição ($q_{u,i}(\text{rest.})$), e a apresentar para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro os valores 0,47, 0,50, 0,43 e 0,00 $L\ s^{-1}\ ha^{-1}$, respectivamente.

Essa consideração, embora não constitua um impedimento para que a cultura venha a ser cultivada nesse período, visa estimular a utilização mais racional da água, uma vez que cria um custo adicional relacionado ao seu uso.

Nos meses de novembro, dezembro e janeiro, os valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ são, respectivamente, iguais a 0,00, 0,00 e 0,02 $L\ s^{-1}\ ha^{-1}$. Sendo essas variáveis consideradas denominadores na equação 18, sua utilização resultaria na obtenção de valores infinitos para o F_{ui} , o que, em termos práticos, acarreta em inconsistência na cobrança pelo uso da água nesses meses. Além desse fato, há que se considerar que em uma análise de frequência de ocorrência de decêndios com déficit hídrico verificou-se que, nos meses de novembro, dezembro e janeiro, a evapotranspiração de referência foi superior à precipitação em 38,9, 38,4 e 31,4% dos casos, respectivamente.

Desse modo, com o intuito de corrigir a inconsistência associada à aplicação desses valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ nulos, ou expressivamente baixos, e de atender aos eventos de déficit hídrico, foi proposto um segundo ajuste, que consiste no estabelecimento de uma máxima vazão unitária com fator de restrição corrigido em função de um déficit hídrico ($q_{u,i}(\text{rest. corrig.})$) que atenda ao déficit hídrico decendial em 80% do tempo nos meses de novembro, dezembro e janeiro.

Uma vez que os meses de dezembro e janeiro são caracterizados por uma maior disponibilidade hídrica, o segundo ajuste propõe que, para a

estimativa das $q_{u,i} \text{ (rest. corrig.)}$ para o suprimento dos déficits que ocorram neste período, seja utilizado o máximo valor de K_c da cultura. Já para o mês de novembro, de menor disponibilidade, segue-se a mesma restrição de K_c , já especificada. Assim, no caso da soja, enquanto dezembro e janeiro têm seu déficit estimado com valor de K_c igual a 1, para o mês de novembro, é utilizado K_c igual a 0,75.

Seguindo essa proposição, os meses de novembro, dezembro e janeiro passaram a apresentar valores correspondentes a 0,10, 0,08 e 0,10 $\text{L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$, respectivamente. Esses valores de $q_{u,i} \text{ (rest. corrig.)}$ são, juntamente com os valores de $q_{u,i} \text{ (máx.)}$ e $q_{u,i} \text{ (rest.)}$, apresentados da Figura 15. Os valores de $q_{u,i} \text{ (rest. corrig.)}$, apresentados nos rótulos dos marcadores em vermelho, compõem o conjunto de valores aprimorados de $q_{u,i} \text{ (tab.)}$, agora denominados vazões unitárias de referência para outorga de água na irrigação ($q_{u,i} \text{ (ref. out.)}$).

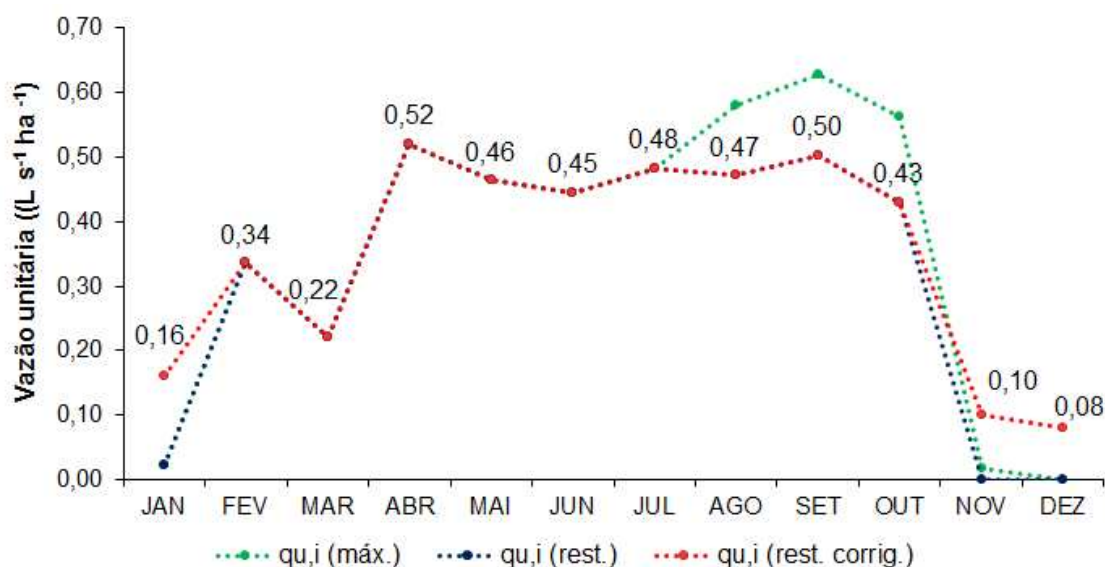


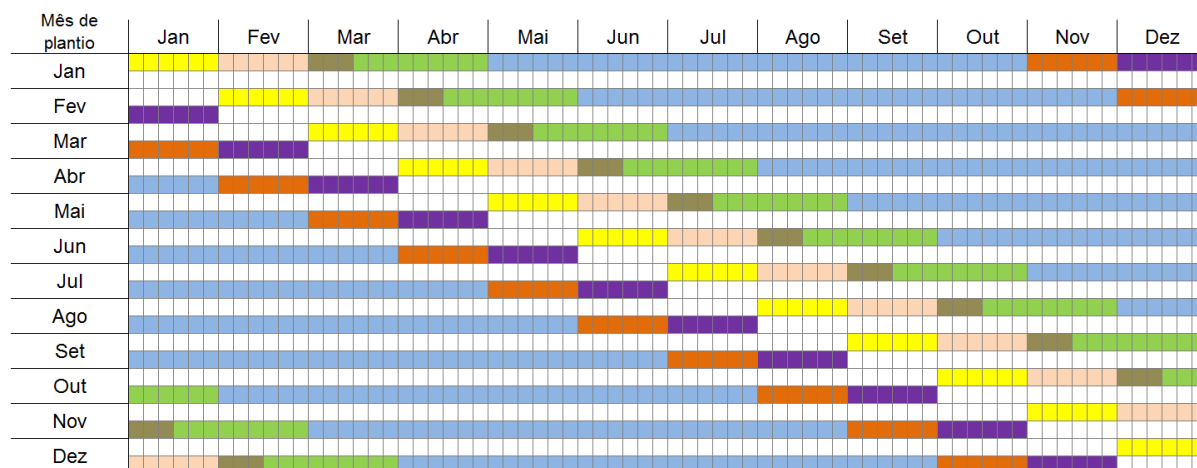
Figura 15 – Vazões unitárias de referência para outorga de água na irrigação da cultura da soja para região 2 da bacia do Paracatu.

Observa-se uma sobreposição dos valores de $q_{u,i} \text{ (máx.)}$ e $q_{u,i} \text{ (rest.)}$ para a maior parte do ano, decorrente de o primeiro o ajuste proposto restringir suas alterações apenas ao quadrimestre de menor disponibilidade hídrica, no qual observa-se um decaimento dos valores de $q_{u,i} \text{ (máx.)}$, acarretando uma

desmotivação quanto à adoção dos calendários de cultivo com início nos meses de julho, agosto e setembro. Já o segundo ajuste apresentado provoca uma sobre-elevação dos valores de $q_{u,i \text{ (rest.)}}$ associados aos meses de novembro, dezembro e janeiro, resultando em uma vazão de referência para outorga mais elevada.

4.2.2.2 Cana-de-açúcar

Assim como para a cultura da soja, para a estimativa da vazão unitária necessária para a cultura da cana-de-açúcar, foram considerados 12 calendários de cultivo ao longo do ano, correspondentes ao plantio no primeiro dia de cada mês (Figura 16).



* cada divisão na vertical corresponde a cinco dias

Legenda

Fase	Kc	Duração (dias)
até 0,25 cob.	0,50	30
0,25 a 0,50 cob.	0,80	30
0,50 a 0,75 cob.	0,95	15
0,75 a cob. comp.	1,10	45
Utilização max.	1,18	180
Início da senescencia	0,93	30
Maturação	0,68	30

Figura 16 – Representação da distribuição dos estádios de desenvolvimento para a cultura da cana-de-açúcar, considerando 12 calendários de cultivo ao longo do ano.

A Tabela 5 apresenta os valores mensais de $q_{u,i}$ estimados pela equação 16, referentes ao plantio da cana-de-açúcar, conforme a distribuição dos estádios de desenvolvimento apresentada na Figura 16. A linha correspondente ao $q_{u,i}(\text{máx.})$ corresponde à máxima vazão unitária necessária entre os calendários de cultivo considerados e foi adotada para o desenvolvimento das análises posteriores.

Tabela 5 – Vazão unitária necessária ($\text{L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$) para irrigação da cana-de-açúcar na região 2 da bacia do Paracatu, considerando 12 datas de plantio

Mês de plantio	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Jan	0,00	0,25	0,29	0,64	0,60	0,57	0,62	0,75	0,82	0,77	0,03	0,00
Fev	0,00	0,03	0,14	0,59	0,56	0,57	0,62	0,75	0,82	0,77	0,20	0,00
Mar	0,03	0,16	0,00	0,45	0,52	0,54	0,62	0,75	0,82	0,77	0,20	0,00
Abr	0,20	0,35	0,06	0,25	0,40	0,50	0,58	0,75	0,82	0,77	0,20	0,00
Mai	0,20	0,52	0,23	0,37	0,24	0,39	0,54	0,70	0,82	0,77	0,20	0,00
Jun	0,20	0,52	0,39	0,53	0,33	0,24	0,42	0,65	0,76	0,77	0,20	0,00
Jul	0,20	0,52	0,39	0,69	0,47	0,33	0,26	0,50	0,71	0,71	0,20	0,00
Ago	0,20	0,52	0,39	0,69	0,60	0,46	0,35	0,31	0,54	0,65	0,15	0,00
Set	0,20	0,52	0,39	0,69	0,60	0,57	0,49	0,42	0,32	0,47	0,09	0,00
Out	0,15	0,52	0,39	0,69	0,60	0,57	0,62	0,59	0,45	0,23	0,00	0,00
Nov	0,10	0,47	0,39	0,69	0,60	0,57	0,62	0,75	0,64	0,37	0,00	0,00
Dez	0,00	0,41	0,34	0,69	0,60	0,57	0,62	0,75	0,82	0,57	0,00	0,00
$q_{u,i}(\text{máx.})$	0,20	0,52	0,39	0,69	0,60	0,57	0,62	0,75	0,82	0,77	0,20	0,00

Pela análise do comportamento dos valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ ao longo do ano, Tabela 5, observa-se que os meses de agosto, setembro e outubro são os que apresentaram os maiores valores de vazão unitária necessária, ambas superiores a $0,75 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Evidencia-se, portanto, que assim como no caso da soja, os maiores valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ estão associados aos meses do ano que apresentam menor disponibilidade hídrica para a bacia do Paracatu.

Observa-se que as maiores magnitudes nos valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ estão associados ao plantio nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril, o que implica que o trimestre de agosto a outubro esteja associado às fases da cultura de maiores demandas hídricas. A opção pelo plantio nos meses de

julho a outubro acarreta uma demanda máxima ao longo do ano, correspondente a $0,71 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, evidenciando que o deslocamento do período de maior demanda hídrica da cultura tem efeito não somente na redução das demandas no período de menor disponibilidade, mas também na diminuição da demanda total ao longo do ciclo de produção.

A aplicação do primeiro ajuste nos valores de $q_{u,i}(\text{máx.})$ para os meses de agosto a novembro apresenta para a cultura da cana-de-açúcar uma particularidade em relação à cultura da soja. Sendo para a cana-de-açúcar, o K_c máximo igual a 1,18 correspondente à fase de utilização máxima da cultura, com duração de 180 dias; e o valor de K_c imediatamente anterior a ser utilizado em sua substituição, igual 1,10, correspondente à fase que se estende de 75% de cobertura à cobertura completa, com duração de 45 dias, a vazão unitária necessária obtida seria ainda expressivamente alta para ser utilizada no período de menor disponibilidade hídrica.

Desse modo, estabeleceu-se, para essas situações, que o K_c utilizado não deve exceder a unidade, ou seja, a demanda das culturas temporárias nos meses de agosto a novembro deve apresentar no máximo a demanda correspondente à evapotranspiração de referência. Considerou-se, portanto, para a estimativa dos valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ correspondentes a esse período, que para as fases correspondentes à finalização da cobertura e à utilização máxima da cultura, fosse adotado um valor de K_c igual a 0,95. Com isso, os valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ decorrentes da consideração desse ajuste para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro passaram a ser 0,60, 0,65, 0,59 e $0,04 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente.

Observa-se que os baixos valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ nos meses de novembro, dezembro e janeiro, iguais a 0,04, 0,00 e $0,20 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$, respectivamente, evidenciam uma necessidade de aplicação do segundo ajuste. Seguindo procedimento similar ao descrito para a cultura da soja, e considerando para o mês de novembro o K_c igual a 0,95 e para os meses de dezembro e janeiro, igual a 1,18, foram obtidos os valores $q_{u,i}(\text{rest. corrig.})$ para a cultura da cana-de-açúcar. Desse modo, foram estimados para os meses de novembro, dezembro e janeiro, os valores de $q_{u,i}(\text{rest. corrig.})$ iguais a 0,13, 0,10 e $0,19 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. O

valor correspondente ao mês de janeiro foi mantido inalterado em virtude de ser inferior a $0,20 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ correspondente ao $q_{u,i}(\text{rest.})$.

Na Figura 17 estão apresentados os valores de $q_{u,i}(\text{rest.})$ e $q_{u,i}(\text{rest. corrig.})$ resultantes da aplicação do primeiro e segundo ajustes aos valores de $q_{u,i}(\text{máx.})$. Os valores de $q_{u,i}(\text{rest. corrig.})$, apresentados nos rótulos dos marcadores em vermelho, compõem o conjunto de valores de $q_{u,i}(\text{ref. out.})$ para a cultura da cana-de-açúcar.

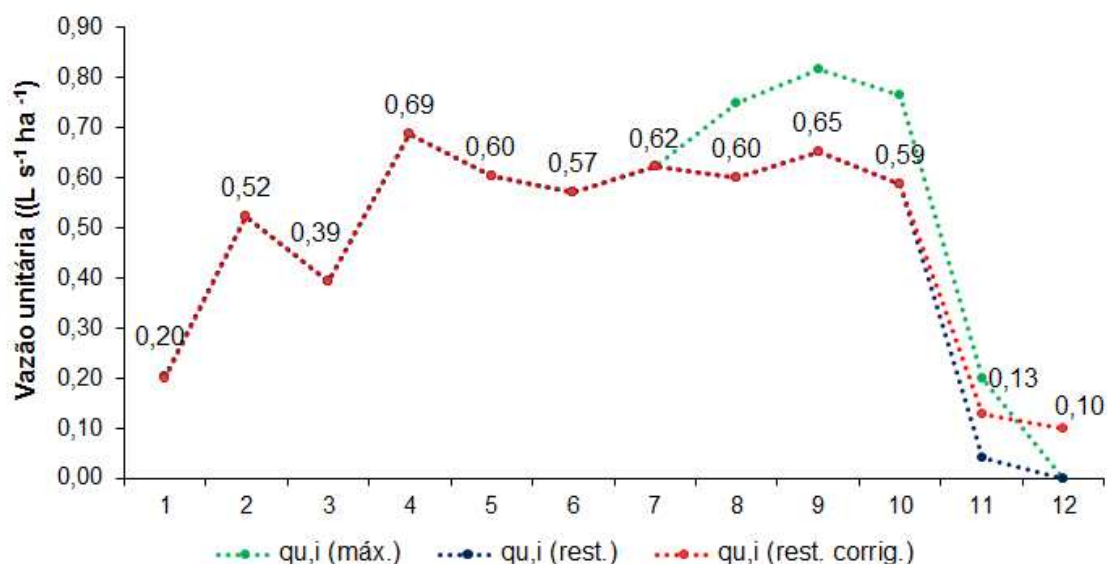


Figura 17 – Vazões unitárias de referência para outorga de água na irrigação da cultura da cana-de-açúcar para região 2 da bacia do Paracatu.

Evidencia-se, em relação aos valores de $q_{u,i}(\text{máx.})$, que a aplicação dos valores de $q_{u,i}(\text{ref. out.})$ apresentados resultariam em um estímulo na adoção de calendários de cultivo com início em agosto, setembro e outubro, uma vez que estes limitam suas demandas no período de menor disponibilidade hídrica aos valores de vazões unitárias estabelecidas como de referência para a outorga e, desse modo, não estariam associadas a um valor adicional quanto ao uso da água para irrigação.

4.2.2.3 Banana

Sendo a banana uma cultura permanente, considerada em seu estágio de produção plena, a estimativa das vazões unitárias necessárias foi feita com base em um único valor de K_c , resultando em um valor de $q_{u,i}$ variável em função das características climáticas de cada mês e constante para as diferentes datas de plantio (Tabela 6). Desse modo, a linha correspondente ao $q_{u,i} \text{ (máx.)}$ apresenta os mesmos valores evidenciados nas linhas anteriores.

Tabela 6 – Vazão unitária necessária ($L s^{-1} ha^{-1}$) para irrigação da banana na região 2 da bacia do Paracatu, considerando 12 datas de plantio

Mês de plantio	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Jan - Dez	0,22	0,54	0,41	0,70	0,62	0,59	0,64	0,76	0,84	0,79	0,22	0,00
$q_{u,i} \text{ (máx.)}$	0,22	0,54	0,41	0,70	0,62	0,59	0,64	0,76	0,84	0,79	0,22	0,00

Uma vez que as culturas permanentes, em função do K_c fixo, não permitem a consideração de uma demanda reduzida no período de menor disponibilidade hídrica a fio d'água, o aprimoramento de seus valores de $q_{u,i} \text{ (tab.)}$ se relaciona unicamente ao segundo ajuste apresentado, que consiste na estimativa de uma vazão unitária necessária à cultura para o atendimento do déficit hídrico nos meses de novembro, dezembro e janeiro, que, nesse caso, foi denominada máxima vazão unitária necessária corrigida em função do déficit hídrico ($q_{u,i} \text{ (corrig.)}$).

Outra particularidade em relação às culturas temporárias é que a estimativa das vazões necessárias ao atendimento do déficit hídrico decendial não apresenta distinção para o valor de K_c entre os meses de novembro, dezembro e janeiro. Nesse caso, para a cultura da banana, os valores de $q_{u,i} \text{ (corrig.)}$ foram estimados considerando um K_c igual a 1,2, resultando para novembro, dezembro e janeiro valores de 0,16, 0,10 e 0,19 $L s^{-1} ha^{-1}$, respectivamente. Como os valores obtidos para os meses de novembro e janeiro, correspondentes a 0,16 e 0,19 $L s^{-1} ha^{-1}$, respectivamente, foram

inferiores aos $q_{u,i}(\text{máx.})$, esses valores de $q_{u,i}(\text{máx.})$ foram mantidos inalterados em $q_{u,i}(\text{corrig.})$.

Na Figura 18 estão apresentados os valores de $q_{u,i}(\text{máx.})$ e $q_{u,i}(\text{corrig.})$ estimados para a cultura da banana. Os valores de $q_{u,i}(\text{corrig.})$, apresentados nos rótulos dos marcadores em vermelho, compõem o conjunto de valores de $q_{u,i}(\text{ref. out.})$.

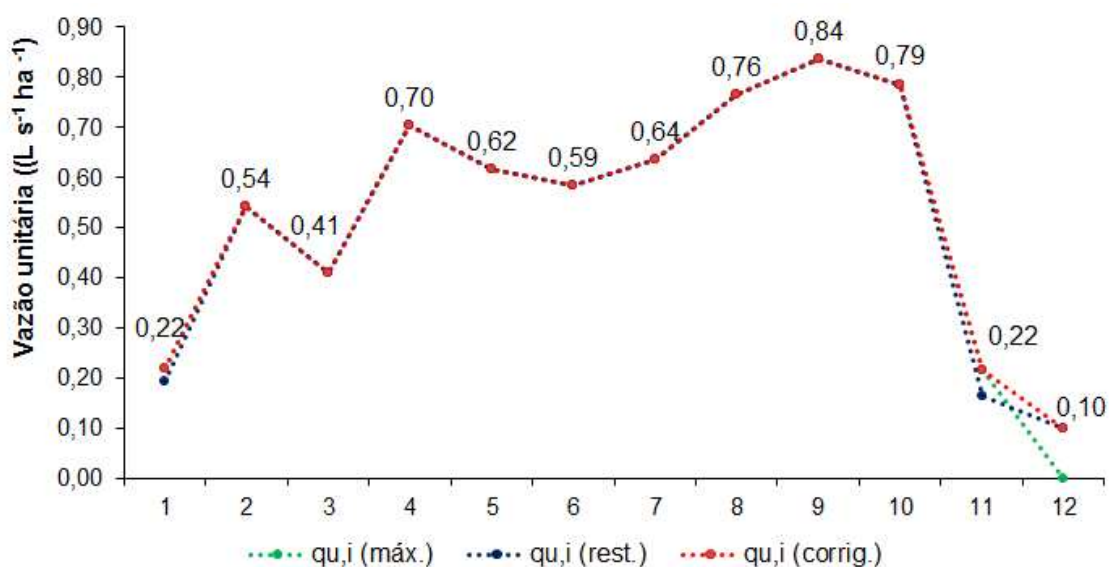


Figura 18 – Vazões unitárias de referência para outorga de água na irrigação da cultura da banana para região 2 da bacia do Paracatu.

Observa-se que no caso da cultura da banana, pelo fato da mesma já estar associada a um considerável valor de $q_{u,i}(\text{máx.})$ nos meses de janeiro e novembro, o segundo ajuste só influenciou o mês de dezembro, no qual o valor da $q_{u,i}(\text{ref.out.})$ foi $0,10 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

4.2.2.4 Valores da vazão unitária de referência para todas as culturas estudadas

Seguindo os procedimentos apresentados para as culturas temporárias e permanentes, foram estimados, considerando a aplicação dos ajustes propostos, os valores de $q_{u,i}(\text{ref.out.})$ correspondentes à outras culturas de maior

interesse na bacia: milho, do feijão e do café para a região 2 da bacia do Paracatu. Esses valores obtidos ao longo do ano são apresentados na Tabela 7, juntamente com os valores das culturas já descritas anteriormente.

Tabela 7 – Vazões unitárias de referência para outorga de água na irrigação ($L s^{-1} ha^{-1}$) na região 2 da bacia do Paracatu

Cultura	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Banana	0,22	0,54	0,41	0,70	0,62	0,59	0,64	0,76	0,84	0,79	0,22	0,10
Café	0,15	0,32	0,21	0,51	0,45	0,44	0,47	0,57	0,61	0,55	0,12	0,07
Cana-de-açúcar	0,20	0,52	0,39	0,69	0,60	0,57	0,62	0,60	0,65	0,59	0,13	0,10
Feijão	0,16	0,37	0,25	0,55	0,49	0,47	0,51	0,59	0,64	0,57	0,13	0,08
Milho	0,18	0,42	0,30	0,59	0,53	0,50	0,55	0,56	0,60	0,53	0,12	0,09
Soja	0,16	0,34	0,22	0,52	0,46	0,45	0,48	0,47	0,50	0,43	0,10	0,08

5 CONCLUSÃO

Para atingir o objetivo proposto, foi desenvolvida uma metodologia para valoração da água com base no critério de disponibilidade sazonal dos recursos hídricos e o aprimoramento de uma metodologia de valoração baseada no critério de efetiva demanda hídrica das culturas na agricultura irrigada, sendo que, em relação a esses pode-se concluir que:

- o fator de sazonalidade possibilitou atribuir a outorgas concedidas a fio d'água uma valoração diferenciada ao longo do ano, sendo o valor atribuído à água decrescente à medida que aumenta disponibilidade hídrica.
- o aprimoramento da metodologia para a concessão de outorga em condições de agricultura irrigada envolveu a proposição de uma vazão unitária de referência para a outorga de irrigação, associada a um critério que acarreta o aumento do custo da água quando o período de maior demanda para a irrigação das culturas temporárias coincidir com o período de menor disponibilidade hídrica superficial a fio d'água.

REFERÊNCIAS

ABAD, E. P. G. **Proposta de fixação de preço da água para irrigação na agricultura, utilizando a metodologia da programação matemática positiva**. 2007. 253f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO: Irrigation and Drainage - 56, 1998.

ALLEN, R. G. **Ref-ET- Reference evapotranspiration calculator, 3.1.15**. Idaho: University of Idaho Research and Extension Center Kimberly, 2013.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Encarte Especial sobre a Crise Hídrica: Informe 2014. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, 28p. 2015a.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Cobrança pelo Uso de Recursos Hídricos**. 2015b. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cobrancaearrecadacao/cobrancaearrecadacao.aspx>>. Acesso em: 25 maio 2015.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2009**. ISBN: 978-85-89629-48-5. Brasília: ANA, 204p., 2009.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8ª ed. Viçosa: UFV, 625p., 2006.

BOF, L. H. N. **Análise de critérios de outorga de direito de uso de recursos hídricos**. 2010. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

BRASIL. Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. **Decreta o Código de Águas**.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado, 1988.

BRASIL – Governo Federal. MINAS GERAIS; Governo do estado. DISTRITO FEDERAL. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu – PLANPAR**. [S. l.]: 1996. v. 1, T. 1. (CD-ROM).

BRASIL. **Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1 da Lei nº 8001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 9 jan. 1997.

BRASIL. **R7 - Relatório Síntese: Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paracatu (PLANPAR)**. CONSÓRCIO MAGNA/DAM/EYSER, RURALMINAS, SEAPA–MG. 150p., 1998.

BRASIL: Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos: **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Síntese Executiva - português. - Brasília: MMA, 2006. 135p. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=c37feae3-8169-4049-900b-e8160661f541&groupId=66920>. Acesso em: 17 jun. 2015.

BRUINSMA, J. **The Resource Outlook to 2050**: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? Prepared for the FAO Expert Meeting on 'How to Feed the World in 2050', Rome, 24 – 26, 2009.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Deliberação CBHSF Nº 56 de 02 de dezembro de 2010. **Dispõe sobre critério complementar de cobrança para os usos externos das águas da bacia do Rio São Francisco, e revoga a Deliberação CBHSF 51, de 14 de maio de 2010**. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/?wpfb_dl=576>. Acesso em: 20 maio 2015.

CEIVAP. Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Deliberação CEIVAP. Deliberação CEIVAP Nº 218/2014 de 25 de setembro de 2014. **Estabelece mecanismos e propõe valores para a cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a partir de 2015**. Disponível em: <<http://ceivap.org.br/deliberacao/2014/deliberacao-ceivap-218.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2015.

CHRISTOFIDIS, D. **Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos**. Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília: ABID, n. 54, p. 46-55, 2002.

CNA - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **O que esperamos do próximo presidente 2015-2018**. Brasília: CNA, 67p., 2014.

CRUZ, N. R.; MENDIONDO, E. M. **A situação atual da cobrança pelo uso dos recursos hídricos no Estado de São Paulo**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves. Anais: ABRH.

DOORENBONS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Roma: FAO: Irrigação e Drenagem - 33, 1994.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. H. **Crop water requirements**. Rome: FAO: Irrigation and Drainage - 24, 1992.

ENGLISH, M.J., SOLOMON, K.H., HOFFMAN, G.J. A paradigm shift in irrigation management. **Jornal Irrigation Drainage Engineering**, v. 128, n. 5, p. 267 - 277, set./out. 2002.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture**: Managing systems at risk. London/Rome, Earthscan/FAO. 2011a.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Water management: Technologies that save and grow**. Factsheet 4: Sustainable crop production intensification (SCPI). Rome, FAO, 2011b.

FERERES, E.; SORIANO M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p. 147-59, 2007.

FINKLER, N. R.; MENDES, L. A.; BORTOLIN, T. A. SCHNEIDER, V. E. Cobrança pelo uso da água no Brasil: uma revisão metodológica. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 33, p. 33-49, abr. 2015.

HOSKING, J. R. M. **Regional frequency analysis: an approach based on L-moments**. R package version 3.0 -1, 2015. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=lmomRFA>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis – An Approach Based on L-Moments**, 224p. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 1997.

IBIO - INSTITUTO BIOATLÂNTICA / FUNARBE – FUNDAÇÃO DE APOIO A UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Relatório técnico: **Estudos de aprimoramento dos mecanismos de cobrança da bacia hidrográfica do Rio Doce**, Viçosa, 2013. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/Estudos/EstudosDeAprimoramentoDosMecanismosDeCobrancaDaBaciaHidrograficaDoRioDoce.pdf>>. Acesso em: 17 de jun 2015.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - Comitê da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu. Resumo executivo: **Plano diretor de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu**. Belo Horizonte: IGAM, 384 p., 2006.

KANG, S., SHI, W.; ZHANG, J. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. **Field Crops Research**, v. 67, n. 3, p. 207 – 214, 2000.

KIRDA, C.; KANBER, R. Water, no longer a plentiful resource, should be used sparingly in irrigated agriculture. **Developments in plant and soil sciences, v. 84: Crop yield response to deficit irrigation**, KIRDA; MOUTEONNET; HERA; NIELSEN, eds., Kluwer, London, p.1- 20, 1999.

KITE, G. W. **Frequence and risk analyses in hydrology**. 5. ed. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, 1988. 257p.

LORITE, I. J.; MATEOS, L.; ORGAZ, F.; FERERES, E. Assessing deficit irrigation strategies at the level of an irrigation district. **Agricultural Water Management**, v. 91, p. 51 – 60, 2007.

MAINDONALD, J.; BRAUM, W. J. DAAG: **Data Analysis And Graphics data and functions**. R package version 1.22, 2015. Disponível em: < <https://cran.r-project.org/web/packages/DAAG/index.html>>. Acesso em: 20 nov 2015.

MARTIN, J. D.; CARLESSO, R.; AIRES, P. A.; GATTO., J. C.; DUBOU, V.; FRIES, H. M.; SCHEIBLER, R. B. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 192–205, 2012.

MATOS, R. A. **Comparação de metodologias de análise de agrupamentos na presença de variáveis categóricas e contínuas**. 2007. 141f. Dissertação (Mestrado em Estatística) — ICEX - Departamento de Estatística, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 3 ed. ISBN 0-471-20454-4 2003. 822 p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte, CPRM, 2007. 552p.

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

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do rio grande**. 2008. 173f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

OLIVEIRA, J. R. S. **Alternativas para o melhor aproveitamento das águas superficiais: estudo de caso para a bacia do Ribeirão entre Ribeiros**. 2011. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

OLIVEIRA, J. R.; PRUSKI, F. F.; NUNES, A. D. A. Otimização do aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na bacia do Ribeirão entre Ribeiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 157-172, 2013.

PEREIRA, L. S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, v. 57, n. 3, p. 175-206, 2002.

PEREIRA, S. B., PRUSKI, F. F., SILVA, D. D. DA; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 11, n. 6, p. 615–622, 2007.

PRUSKI, F. F., BOF, L. H. N., SILVA, L. M. C., SILVA, J. M. A, REGO, F. S., JUSTINO, F. B. Impact of the substitution of reference annual streamflow by monthly streamflow on the potential use of water resources. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 3, p. 496-509, 2014.

PRUSKI, F. F.; PRUSKI, P. L. Tecnologia e inovação frente a gestão de recurso hídricos. In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. (ed.), **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, p. 27- 58, 2011.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. G.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M.; TEIXEIRA, A. F.. Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na bacia do Paracatu. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 199–210, 2007.

R Core Team (2015). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

REBOUÇAS, A. C. **A Política Nacional de Recursos Hídricos e as águas subterrâneas**. Revista Águas Subterrâneas, n. 16, p. 83-95, 2002.

REZENDE, P. S. **Estudo ambiental no município de Paracatu, MG: quantificação, especiação e transporte de elementos tóxicos**. 2013. 139f. Tese (Doutorado em Ciências - Química) - Instituto de Ciências Exatas Departamento De Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

RIBEIRO, M. M. R.; LANNA, A. E. L. A outorga integrada das vazões de captação e diluição. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 151-168, 2003.

RIBEIRO, M. M. R.; LANNA, A. E. L. Instrumentos regulatórios e econômicos: aplicabilidade à gestão das águas e à bacia do rio Pirapama - PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 4, p. 41-70, 2001.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F. Precipitação provável para João Pinheiro, Minas Gerais, utilizando funções de distribuição de probabilidade gama e log-normal. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 5, n. 3, p. 237-243, 1997.

RODRIGUEZ, R. D. G. **Metodologia para Estimativa de Demandas e Disponibilidades Hídricas: estudo de caso da bacia do Paracatu**. 2004. 94f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

RODRIGUEZ, R. DEL G. 1; PRUSKI, F.F.; NOVAES L. F.; SILVA, D.D.; RAMOS, M.M.; TEIXEIRA, A. F. Vazões consumidas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano (urbano e rural) na Bacia do Paracatu no período 1970 a 1996. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, p. 223-233, 2006.

RODRIGUEZ, R. del G.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A. F. Estimativa da demanda de água nas áreas irrigadas da bacia do Rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, p. 172-179, 2007.

SILVA, A.M., DE OLIVEIRA, P.M., DE MELLO, C.R., PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 374-380, 2006.

SILVA, M. V. **Adequação da disponibilidade hídrica com a demanda de água na agricultura**. 2014.104f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

SOUSA, H. T.; PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; CECON, P. R.; SOUZA, J. R. C. **SisCAH: Sistema computacional para análises hidrológicas**. Brasília, DF, Agência Nacional de Águas, 2009. 60 p.

THOM, H. C. S. **A note on the gamma distribution**. **Monthly weather Review**. Washington, v. 86, p.117-121, 1958.

THOMAS, P. T.; MAGALHÃES, P. C.; AZEVEDO, J. P. S. Proposta de uma metodologia de cobrança pelo uso da água vinculada à escassez. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 15, 2003, Curitiba - PR. **Anais...** Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

THOMAS, P. T. **Proposta de uma Metodologia de Cobrança pelo Uso da Água vinculada à Escassez**. 2002. 139f . Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World**. Paris, UNESCO.

WWAP (World Water Assessment Programme). 2012. **The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk**. Paris, UNESCO.

APÊNDICES

APÊNCIDE A

Tabela 1A - Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estações	Latitude	Longitude
42250000	Fazenda Limoeiro	-17,92	-47,01
42251000	Fazenda Córrego do Ouro	-17,61	-46,86
42255000	Fazenda Nolasco	-17,23	-47,02
42257000	Barra do Escurinho	-17,51	-46,65
42290000	Ponte da BR-040 - Paracatu	-17,50	-46,57
42395000	Santa Rosa	-17,26	-46,47
42435000	Fazenda Barra Da Égua	-16,87	-46,59
42440000	Fazenda Poções	-17,04	-46,82
42460000	Fazenda Limeira	-16,21	-47,23
42490000	Unai	-16,35	-46,88
42540000	Santo Antônio do Boqueirão	-16,53	-46,72
42545500	Fazenda o Resfriado	-16,50	-46,66
42546000	Fazenda Santa Cruz	-16,13	-46,75
42600000	Porto dos Poções	-16,84	-46,36
42690001	Porto da Extrema	-17,03	-46,01
42750000	Caatinga	-17,14	-45,88
42840000	Veredas	-18,14	-45,76
42850000	Cachoeira das Almas	-17,35	-45,53
42860000	Cachoeira do Paredão	-17,12	-45,44
42930000	Porto do Cavalo	-17,03	-45,54
42980000	Porto Alegre	-16,91	-45,38

Tabela 2A - Estações climatológicas utilizadas no estudo

Código	Estação	Latitude	Longitude
83377	Brasília - DF	-15,78	-47,93
83379	Formosa - GO	-15,53	-47,33
83384	Arinos - MG	-15,90	-46,05
83428	Unai - MG	-16,37	-46,55
83479	Paracatu - MG	-17,23	-46,88
83481	Joao Pinheiro - MG	-17,70	-46,17
83483	Pirapora - MG	-17,35	-44,92
83531	Patos De Minas - MG	-18,52	-46,43

Tabela 3A - Estações pluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Latitude	Longitude
1747005	Guarda-Mor	-17,77	-47,10
1747001	Campo Alegre de Goiás	-17,50	-47,56
1647002	Cristalina	-16,76	-47,61
1846003	Major Porto	-18,71	-46,04
1846017	Leal de Patos	-18,64	-46,33
1846005	Presidente Olegário	-18,41	-46,42
1845013	São Gonçalo do Abaeté	-18,34	-45,84
1846016	Ponte Firme	-18,03	-46,42
1746007	Ponte da BR-040 - Paracatu	-17,50	-46,57
1746002	Santa Rosa	-17,26	-46,47
1745000	Caatinga	-17,15	-45,88
1745001	Cachoeira do Paredão	-17,11	-45,44
1746001	Porto da Extrema	-17,03	-46,01
1745007	Porto do Cavalo	-17,03	-45,54
1645013	Fazenda Água Branca	-16,81	-45,03
1645009	Cachoeira da Manteiga	-16,66	-45,08
1646003	Santo Antônio do Boqueirão	-16,53	-46,72
1645000	São Romão	-16,37	-45,08
1646001	Unai	-16,35	-46,89
1645005	Vila Urucuia	-16,30	-45,74
1645002	Santo Inácio	-16,28	-45,41
1546005	Cabeceiras	-15,80	-46,92
1547002	Planaltina	-15,45	-47,61
1547001	Fazenda Santa Sé	-15,22	-47,16
1647001	Ponte São Bartolomeu	-16,54	-47,80
1547012	Papuda DF 18	-15,96	-47,66
1547011	Colégio Agrícola	-15,66	-47,70
1744025	Pirapora	-17,35	-44,95

APÊNCIDE B

Quadro 1B - Diagrama de barras de dados de precipitação no período de 1976 a 2005 nas estações pluviométricas utilizadas no estudo

Cód. da estação	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
1546005															
1547001															
1547002															
1547011															
1547012															
1645000															
1645002															
1645005															
1645009															
1645013															
1646001															
1646003															
1647001															
1647002															
1744025															
1745000															
1745001															
1745007															
1746001															
1746002															
1746007															
1747001															
1747005															
1845013															
1846003															
1846005															
1846016															
1846017															

Continuação Quadro 2B - Diagrama de barras de dados de precipitação no período de 1976 a 2005 nas estações pluviométricas utilizadas no estudo

Cód. da estação	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
1546005															
1547001															
1547002															
1547011															
1547012															
1645000															
1645002															
1645005															
1645009															
1645013															
1646001															
1646003															
1647001															
1647002															
1744025															
1745000															
1745001															
1745007															
1746001															
1746002															
1746007															
1747001															
1747005															
1845013															
1846003															
1846005															
1846016															
1846017															

Legenda:



Anos com mais de 95% dos dados

Quadro 2B - Diagrama de barras de dados de dados para o cálculo de evapotranspiração no período de 1976 a 2005 nas estações climatológicas utilizadas no estudo

Cód. da estação	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
83377															
83379															
83384															
83428															
83479															
83481															
83483															
83531															

Continuação Quadro 2B

Cód. da estação	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
83377															
83379															
83384															
83428															
83479															
83481															
83483															
83531															

Legenda:  Anos excluídos com mais de três meses de falhas com dados incompletos ou ausentes.

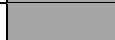
Quadro 3B - Diagrama de barras de dados de precipitação no período de 1976 a 2005 nas estações pluviométricas utilizadas no estudo

Cód. da Estação	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
42435000															
42257000															
42750000															
42850000															
42860000															
42251000															
42460000															
42250000															
42255000															
42440000															
42545500															
42546000															
42290000															
42980000															
42690001															
42930000															
42600000															
42395000															
42540000															
42490000															
42840000															

Continuação Quadro 3B - Diagrama de barras de dados de precipitação no período de 1976 a 2005 nas estações pluviométricas utilizadas no estudo

Cód. da Estação	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
42435000															
42257000															
42750000															
42850000															
42860000															
42251000															
42460000															
42250000															
42255000															
42440000															
42545500															
42546000															
42290000															
42980000															
42690001															
42930000															
42600000															
42395000															
42540000															
42490000															
42840000															

Legenda:



Anos com mais de 95 % dos dados

APÊNCIDE C

Tabela 1C - Valores de $Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$) anual e mensal para cada estação fluviométrica

	Código das estações										
	42257000	42750000	42850000	42860000	42435000	42251000	42460000	42255000	42250000	42545500	42440000
Janeiro	15,07	171,91	16,60	23,49	6,99	13,95	26,71	3,79	1,42	2,23	2,00
Fevereiro	13,72	166,69	18,37	21,36	5,99	12,00	34,83	3,69	1,36	1,39	2,87
Março	15,68	172,28	17,23	22,81	5,37	16,82	43,12	4,02	1,49	2,15	3,26
Abril	12,62	142,11	12,28	16,64	4,64	13,28	42,68	3,40	1,28	2,11	3,14
Maio	9,91	116,45	11,08	13,73	3,07	10,56	32,42	2,86	1,02	1,88	2,66
Junho	7,87	91,50	7,98	10,76	2,10	8,32	24,35	2,36	0,80	1,62	2,09
Julho	6,13	73,29	6,15	8,53	1,73	6,61	18,65	1,93	0,62	1,27	1,67
Agosto	4,50	57,25	4,24	6,40	1,44	5,01	14,66	1,53	0,47	1,13	1,39
Setembro	3,98	49,81	3,20	4,89	1,33	4,13	12,44	1,24	0,37	1,11	1,17
Outubro	3,35	46,20	3,40	5,33	1,05	3,74	11,67	1,18	0,34	1,02	1,11
Novembro	2,83	43,98	6,39	7,84	1,00	3,70	14,08	1,32	0,39	0,88	1,40
Dezembro	4,35	88,14	14,12	19,32	3,62	5,50	21,07	1,85	0,59	1,40	2,22
Anual	3,08	44,41	2,88	4,57	1,03	3,33	8,77	1,04	0,31	0,95	1,04

Continuação Tabela 1C - Valores de $Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$) anual e mensal para cada estação fluviométrica

	Código das estações									
	42546000	42290000	42980000	42690001	42930000	42600000	42395000	42540000	42490000	42840000
Janeiro	2,00	41,40	183,05	144,00	235,33	46,46	72,88	31,90	28,98	2,01
Fevereiro	1,52	34,63	233,93	103,56	224,28	26,03	61,89	26,59	28,64	1,88
Março	2,00	47,25	182,15	150,23	227,55	47,30	83,03	43,53	34,90	1,96
Abril	1,91	36,01	163,14	101,04	182,06	48,39	62,85	38,99	37,33	1,70
Maiο	1,72	28,22	135,58	83,70	151,75	38,85	51,72	31,33	31,45	1,48
Junho	1,60	23,51	111,81	65,71	119,81	29,05	42,50	25,51	23,22	1,38
Julho	1,50	19,60	93,49	50,38	95,72	21,02	35,33	18,23	17,39	1,15
Agosto	1,39	16,17	76,72	38,32	74,47	16,51	28,88	14,37	13,27	1,01
Setembro	1,36	14,07	68,94	31,04	61,01	14,14	25,35	12,03	11,40	0,88
Outubro	1,26	12,45	69,30	31,31	55,34	13,84	23,25	11,29	10,57	0,83
Novembro	1,42	10,21	76,22	33,45	73,43	27,08	18,97	16,57	13,64	1,10
Dezembro	1,85	22,04	114,23	82,55	135,79	29,44	37,96	22,85	23,23	1,61
Anual	1,25	12,50	61,50	27,40	52,72	12,25	22,64	10,90	10,31	0,78