

LAISI BELLON CESCO NETTO

**POTENCIALIDADE DA EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA  
CONSIDERANDO A DISPONIBILIDADE HÍDRICA NATURAL E POTENCIAL**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2017

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

T

C421p  
2017  
Cesconetto, Laisi Bellon, 1990-  
Potencialidade da expansão da cana-de-açúcar irrigada  
considerando a disponibilidade hídrica natural e potencial / Laisi  
Bellon Cesconetto. – Viçosa, MG, 2017.  
x, 87f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.79-83.

1. Biocombustíveis. 2. Álcool. 3. Irrigação agrícola.  
4. Cana-de-açúcar. 5. Recursos naturais. I. Universidade Federal  
de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 662.88

LAISI BELLON CESCONETTO

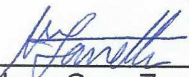
**POTENCIALIDADE DA EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA  
CONSIDERANDO A DISPONIBILIDADE HÍDRICA NATURAL E POTENCIAL**

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

Aprovada: 16 de fevereiro de 2017.



Catariny Cabral Aleman



Sidney Sara Zanetti



Roberto Avelino Cecílio



Renata del Giudice Rodriguez  
(Coorientadora)



Fernando Falco Pruski  
(Orientador)

*A Deus.  
Aos meus pais, meus exemplos de vida.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças para concluir mais uma etapa e iluminado meu caminho.

Aos meus pais, Genésio e Gorete, pelo apoio, orações e amor incondicional.

Ao meu irmão Bruno Henrique, pela amizade, amor e apoio.

Ao Cícero, pelo amor, paciência e por fazer meus dias mais felizes.

Ao professor Fernando Falco Pruski, pela verdadeira orientação, ensinamentos e confiança.

À Renata Rodriguez, por toda ajuda e amizade.

À Mariana, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao GPRH e ao CRRH, por todo o conhecimento compartilhado, em especial Laura, Andressa, Camila, Rayssa, Luane, Nívia e Josiane, por serem verdadeiras amigas e a família que a vida permitiu-me escolher.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

L AISI BELLON CESCONE T TO, filha de Genésio Cesconetto e Maria Gorete Bellon Cesconetto, nasceu em Venda Nova do Imigrante, ES, no dia 15 de novembro de 1990.

Em agosto de 2010 iniciou o curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal Viçosa, concluindo em janeiro de 2015.

Em março de 2015 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2017.

## CONTEÚDO

<b>RESUMO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Biocombustíveis.....	3
2.2 A cultura da cana-de-açúcar.....	4
2.3 Irrigação como forma de suplementação hídrica da cultura da cana-de-açúcar.....	5
2.3.1 Irrigação plena.....	6
2.3.2 Irrigação com déficit .....	6
2.4 Disponibilidade hídrica superficial e gestão dos recursos hídricos no Brasil.....	7
2.5 Bacia do Rio Paracatu .....	8
2.6 Sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros .....	9
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>10</b>
3.1 Caracterização das áreas de estudo .....	10
3.1.1 Bacia do Rio Paracatu.....	10
3.1.2 Sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.....	12
3.2 Disponibilidade hídrica.....	13
3.3 Irrigação plena .....	16
3.3.1 Vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar .....	16
3.3.1.1 Evapotranspiração real da cultura.....	18
3.3.1.2 Precipitação efetiva.....	21
3.3.1.3 Eficiência de aplicação.....	21
3.3.1.4 Meses de plantio .....	21

3.3.2	Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água .....	22
3.3.2.1	Calendário de cultivo de uso mais frequente .....	26
3.3.2.2	Calendário de cultivo mais crítico.....	27
3.3.3	Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica regularizada.....	28
3.3.3.1	Calendário de cultivo de uso mais frequente .....	29
3.4	Irrigação com déficit.....	29
3.4.1	Vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar .....	30
3.4.2	Análise das áreas potencialmente irrigáveis da cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água .....	31
3.4.2.1	Expansão das áreas com cana-de-açúcar .....	32
3.4.2.2	Calendário de cultivo de uso mais frequente .....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>33</b>
4.1	Bacia do Rio Paracatu .....	33
4.1.1	Disponibilidade hídrica .....	33
4.1.2	Irrigação plena.....	37
4.1.2.1	Vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar.....	37
4.1.2.2	Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água .....	42
4.1.2.2.1	Calendário de cultivo de uso mais frequente .....	43
4.1.2.2.2	Calendário de cultivo de uso mais crítico.....	49
4.1.2.3	Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica regularizada.....	51
4.1.3	Irrigação com déficit .....	55
4.1.3.1	Vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar.....	55
4.1.3.2	Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água .....	59
4.1.3.2.1	Expansão das áreas com cana-de-açúcar.....	59
4.1.3.2.2	Calendário de cultivo de uso mais frequente .....	62
4.2	Sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros .....	66
4.2.1	Cultivo exclusivo da cana-de-açúcar .....	67
4.2.2	Calendário de cultivo de uso mais frequente.....	70
4.2.3	Calendário de cultivo de uso mais crítico .....	72
4.2.4	Potencialidade de uso de outros calendários cultivo .....	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>84</b>

## RESUMO

CESCONETTO, Laisi Bellon, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Potencialidade de expansão da cana-de-açúcar irrigada considerando a disponibilidade hídrica natural e potencial.** Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientadora: Renata del Giudice Rodriguez.

O Brasil tem se destacado na produção de etanol, utilizando como matéria prima a cana-de-açúcar, havendo nos últimos anos o avanço da produção canavieira em direção ao Cerrado brasileiro, devido à existência de áreas aptas e à relativa disponibilidade hídrica para atendimento das demandas da irrigação. Nesse sentido, buscou-se analisar a potencialidade de expansão das áreas plantadas na bacia do Rio Paracatu, de acordo com a associação entre a cana-de-açúcar e os calendários de cultivo praticados pelos irrigantes na bacia, considerando para isso a irrigação plena e com déficit, bem como a disponibilidade hídrica natural e a potencial. Analisou-se também a possibilidade de expansão das áreas irrigadas na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros com base nas vazões disponíveis mensais. As áreas potencialmente irrigáveis (API's) foram estimadas em função das vazões unitárias requeridas médias para a irrigação da cana durante todo o ciclo da cultura e em função da disponibilidade hídrica. Comparou-se as API's com as áreas atualmente plantadas com cana, e também com todas as culturas, estimadas nas áreas de estudo com base nos dados disponíveis no IBGE. Em uma análise em macro escala, considerando que a disponibilidade hídrica é destinada apenas para a irrigação, sendo esta o único fator restritivo para a expansão das áreas agrícolas, com base na vazão mínima anual e no calendário de cultivo de uso mais frequente, a API acumulada ( $API_{acum}$ ) estimada na foz na bacia do Rio Paracatu foi superior a 120.000 ha.

Dessa forma, haveria possibilidade de suprimento das demandas hídricas em 21% das áreas plantadas já existentes na bacia, podendo esta ser aumentada em até 19% com a utilização da irrigação com déficit. Se considerada a disponibilidade hídrica potencial seria possível suprir as demandas hídricas de toda a área plantada com culturas permanentes e temporárias, havendo ainda possibilidade de expansão de até 170% dessas áreas. Na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros, considerando a disponibilidade hídrica em base mensal, a possibilidade de expansão das áreas irrigadas varia de acordo com o calendário de cultivo analisado. No calendário mais frequente utilizado pelos irrigantes, de acordo com a  $API_{acum}$  estimada na sub-bacia para o mês de outubro, seria possível atender as demandas da irrigação de 70% da área atual. Caso a semeadura das culturas em rotação fosse atrasada em um mês, em relação ao calendário de uso mais frequente, seria possível suprir toda a área irrigada na sub-bacia, com possibilidade de expansão dessas áreas em até 38%.

## ABSTRACT

CESCONETTO, Laisi Bellon, M.Sc., Federal University of Viçosa, February, 2017. **Potential of expansion of irrigated sugar cane considering natural and potential water availability.** Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-adviser: Renata del Giudice Rodriguez.

Brazil has been outstanding in the production of ethanol, using sugar cane as raw material, in recent years there has been the advance of sugar cane production towards the Brazilian Cerrado, due to the existence of suitable areas and the relative availability of water to meet the demands of the irrigation. In this sense, it was intended to analyze the potential expansion of the planted areas in the Paracatu River basin, according to the association between sugar cane and the cultivation calendars practiced by the irrigators in the basin, considering for this the full and with deficit irrigations, as well as natural and potential water availability. It was also analyzed the possibility of expansion of irrigated areas in the ribeirão Entre Ribeiros sub-basin based on the available monthly flows. The Potentially irrigatable areas (PIA's) were estimated as a function of the average unit flows required for cane irrigation during the whole crop cycle and depending on the water availability. Compared the PIA's with the areas currently planted with sugar cane, as well as with all crops estimated in the study areas based on data available by Brazilian Institute of Geography and Statistics. In a macroscale analysis, considering that water availability is destined only for irrigation, being the only restrictive factor for the expansion of agricultural areas, based on the minimum annual flow and the most frequently used crop calendar, the accumulated PIA ( $PIA_{acum}$ ) estimated at the mouth of the Paracatu River basin was higher than 120.000 ha. That way, there would be possibility of supplying the

water demands in 21% of the already existing planted areas in the basin, which could be increased by up to 19% with the utilization of irrigation with deficit. If the potential water availability is considered, it would be possible to supply the water demands of the whole planted area with permanent and temporary crops, with the possibility of expanding up to 170% of these areas. In the ribeirão Entre RIBEIROS sub-basin, considering the water availability on a monthly basis, the possibility of expansion of irrigated areas varies depending on the crop calendar analyzed. In the most frequent calendar used by irrigators, according to the  $PIA_{acum}$  estimated in the sub-basin for the month of October, it would be possible to meet the irrigation demands of 70% of the current area. If the sowing of the rotating crops is delayed by one month, in relation to most frequent calendar, it would be possible to supply the entire irrigated area in the sub-basin, with the possibility of expanding these areas by up to 38%.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial e, conseqüentemente, o crescimento do consumo per capita de insumos essenciais, como a água e a energia, associada à crescente preocupação com as mudanças climáticas, tem feito com que cada vez mais a sociedade busque fontes de energias renováveis, como uma alternativa para diminuir o consumo de petróleo e, conseqüentemente, a emissão dos gases do efeito estufa. Entre as fontes renováveis, destacam-se os biocombustíveis, produzidos principalmente por cana-de-açúcar e por sementes oleaginosas, tornando assim crescente a busca por áreas aptas para o plantio dessas culturas.

Nesse contexto, o Brasil tem sido considerado uma grande potência para a expansão da produção de biocombustíveis, sem comprometer a produção de alimentos, uma vez que existem áreas agrícolas aptas para a produção da matéria prima, com condições edafoclimáticas favoráveis e relativa abundância nos recursos hídricos.

Devido a essas características, dentre as matérias primas para a produção de biocombustíveis, o Brasil tem se destacado nas produções de soja, milho e cana-de-açúcar. Dentre as três culturas citadas, a cana é a terceira cultura temporária em termos de ocupação de área, mas, mesmo assim, o país tem se destacado na produção do etanol, utilizando-a como matéria prima que também é utilizada na produção de açúcar e na alimentação animal, devido, sobretudo, à conversão fotossintética da cana que permite uma produtividade muito acima das demais culturas. Em 2013 o Brasil produziu cerca de 28 bilhões de litros de etanol e na safra 2016/17 essa produção pode ultrapassar os 30 bilhões de litros (EPE, 2015; CONAB, 2016).

A produção canavieira no Brasil iniciou na região Nordeste e hoje encontra-se concentrada na região Centro-Sul, devido às condições climáticas favoráveis para a sua produção. Entretanto, na busca por novas áreas para a produção da cana, nos últimos anos, tem ocorrido um avanço da fronteira agrícola em direção ao Cerrado brasileiro, devido à maior disponibilidade hídrica e a existência de áreas aptas para o cultivo da cana, mesmo que as precipitações se concentrem em determinados meses do ano (LOARIE et al., 2011). Sendo assim, devido ao longo ciclo da cana-de-açúcar e a intolerância à ocorrência de déficits hídricos em algumas fases de desenvolvimento durante seu ciclo, torna-se necessário a suplementação hídrica por meio da irrigação, seja ela em condição plena ou com déficit.

Nesse sentido, a possibilidade de expansão das áreas agrícola para a produção das matérias primas dos biocombustíveis, em locais onde o regime de precipitação não seja favorável à produção sob condições de sequeiro, está diretamente relacionada a locais em que a disponibilidade hídrica não esteja com o uso já comprometido. Dessa forma, é essencial o manejo adequado, tanto dos recursos hídricos como da irrigação, para que se alcance uma produção sustentável.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivos:

- analisar a possibilidade de expansão das áreas potencialmente irrigáveis com cana-de-açúcar, associadas às culturas mais cultivadas na bacia, de acordo com os calendários mais frequentemente praticados pelos irrigantes na bacia do Rio Paracatu, e em suas principais sub-bacias, sob condições de irrigação plena e com déficit com base na disponibilidade hídrica natural e potencial; e
- analisar a possibilidade de expansão das áreas atualmente irrigadas na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros, sob condições de irrigação plena, com base na disponibilidade hídrica natural e em base mensal.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Biocombustíveis**

Os biocombustíveis são uma alternativa para diminuir a dependência externa de petróleo, seja por questões de segurança ou visando minimizar o impacto na balança de pagamentos, reduzir a emissão de gases do efeito estufa de forma sustentável e buscar fontes limpas e renováveis (LEITE e LEAL, 2007).

Apesar das inúmeras vantagens que os biocombustíveis apresentam em relação aos combustíveis fósseis, eles terão que competir com outras fontes de energia renováveis, sendo necessário, portanto, que se faça o balanço energético da cadeia produtiva. O etanol produzido pela cana-de-açúcar é o mais eficiente em relação a outras culturas como, por exemplo, o etanol produzido com o milho, uma vez que um hectare de cana gera oito mil litros de etanol, enquanto o mesmo espaço de milho gera três mil litros (EMBRAPA, 2015).

No Brasil, o governo incentivou a produção de biocombustíveis ao criar o Proálcool em 1975 (Decreto nº 76.593), o qual estipulou que toda a produção vinda da cana-de-açúcar ou de qualquer outro insumo deveria ser incentivada através do aumento da produção agrícola, do investimento em tecnologia e na criação de unidades produtoras e armazenadoras (IPEA, 2010).

Embora o enfoque da cana-de-açúcar esteja voltado para a produção do etanol, essa cultura também é utilizada na produção de açúcar e na alimentação animal. Do ponto de vista econômico, há grandes oscilações no mercado sucroalcooleiro, o que tem levado a variações na disponibilidade da cana-de-açúcar para as indústrias de biocombustível e, conseqüentemente, fazendo com que o preço do etanol sofra grandes variações.

Além da instabilidade no setor econômico, outro aspecto importante a ser considerado na produção da matéria prima para os biocombustíveis é a necessidade de áreas agrícolas, a qual o Brasil ainda possui uma boa disponibilidade. A posição geográfica, a radiação solar, a relativa abundância de recursos hídricos, com possibilidade de uso da irrigação, tornam o Brasil uma grande potência para a expansão da produção de biocombustíveis sem afetar a produção de alimentos (SALLET e ALVIM, 2011).

## **2.2 A cultura da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas da economia brasileira. O fato do Brasil ser o maior produtor desta cultura, o torna líder nas produções de açúcar e etanol, caracterizando a grande importância no cenário agrícola interno e com um futuro promissor no cenário mundial (CARVALHO et al. 2013).

De acordo com estimativas divulgadas pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) a produção de cana-de-açúcar na safra de 2016/17 foi estimada em 691 milhões de toneladas, distribuídas em 9,1 milhões de ha, o que representaria um incremento de 3,8% em relação à safra anterior. Entretanto, foi estimado que a produtividade fosse de 76,15 kg ha<sup>-1</sup>, representando um pequeno decréscimo em relação à safra anterior (CONAB, 2016).

Trata-se de uma cultura semiperene com um ciclo que pode durar de quatro a cinco cortes. Os cortes ocorrem em intervalos anuais até que a lavoura não seja mais rentável economicamente, uma vez que, com o aumento do número de estágios de cortes, há uma perda gradativa na produtividade agrícola (SALOMÉ et al., 2007)

O ciclo de desenvolvimento da cultura possui quatro principais fases divididas em emergência ou brotação, perfilhamento, crescimento do colmo e a maturação. Na fase da brotação ocorre o rompimento das folhas da gema e o desenvolvimento em direção à superfície do solo e, após 20 a 30 dias do plantio, tem-se a emergência do broto. No perfilhamento ocorre o processo de emissão de colmos por uma mesma planta e os brotos aparecem de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário, podendo continuar até 120 dias. Na fase seguinte, os colmos continuam crescendo e se desenvolvendo, ganham altura e inicia-se o acúmulo de açúcar na base; esse crescimento é estimulado por luz, calor e umidade. Na fase de maturação, o processo de crescimento intenso dos

colmos continua e o excesso de açúcar permanece armazenado na base de cada colmo (GASCHO, G. J.; SHIH, S. F., 1983).

O plantio pode ser feito em dois sistemas. No sistema de ano-e-meio, o ciclo da cultura tem duração de 18 meses e, normalmente, o plantio ocorre entre os meses de janeiro e março. Já no sistema de ano, a duração do ciclo da cultura possui 12 meses, sendo plantada entre os meses de outubro a novembro (MARTINS e OLIVETTE, 2015). Após o primeiro corte da cana, essa passa a ser denominada como cana-soca, em que ocorrerá a brotação da soqueira iniciando-se um novo estágio de corte.

### **2.3 Irrigação como forma de suplementação hídrica da cultura da cana-de-açúcar**

A necessidade hídrica das culturas é determinada pela evapotranspiração, que depende das condições climáticas locais e da fase de desenvolvimento de cada planta.

A cultura da cana-de-açúcar possui uma necessidade hídrica que varia de 1500 a 2500 mm durante a fase de desenvolvimento, dependendo da duração do ciclo da cultura, que pode variar de 12 a 18 meses (DOOREMBOS & KASSAN, 1979 citado por TEODORO, 2011). Já Inman-Bamber & Smith (2005) afirmam que uma precipitação pluvial anual maior que 1000 mm, bem distribuída, é suficiente para obter altas taxas de produção. Dessa forma, há a necessidade de um manejo hídrico adequado durante o desenvolvimento vegetativo para que não ocorram reduções expressivas no rendimento de colmos e de açúcar.

Sendo assim, quando a demanda hídrica da cana-de-açúcar não é suprida pela precipitação, torna-se necessário a suplementação hídrica por meio da irrigação, a qual proporciona inúmeros benefícios para a cultura como, por exemplo, o aumento da produtividade agrícola, melhoria na eficiência dos insumos agrícolas durante todo o ciclo da cultura, maior garantia de estabilidade das usinas de açúcar e álcool, entre outros (TEODORO et al., 2013).

Segundo Doorenbos e Kassan (1994), citado por Silva et al. (2014), nos trópicos úmidos, em condições de sequeiro, a produtividade da cana varia de 70 a 100 t ha<sup>-1</sup>, já nos subtropicos secos, com o uso da irrigação, a produtividade varia de 100 a 150 t ha<sup>-1</sup>, caracterizando a importância da irrigação.

A escolha da melhor alternativa de suplementação hídrica depende das ocorrências e severidade dos déficits hídricos, do nível tecnológico do produtor e da disponibilidade hídrica. Para a cultura da cana-de-açúcar, têm-se algumas alternativas de suplementação hídrica, as quais tem por objetivo suprir 100% das demandas hídricas da cultura ou apenas parte dessas demandas, de forma que não ocorra queda na produtividade.

### **2.3.1 Irrigação plena**

A irrigação plena consiste em atender totalmente a necessidade hídrica da cultura, sendo a quantidade de água a ser aplicada dependente de uma série de fatores atmosféricos, do solo e da cultura.

A irrigação deve ser suspensa, ou reduzida, antes da colheita, visto que a planta sintetiza sacarose e precisa induzi-la e armazená-la em maiores taxas de translocação e, para isso, normalmente a lâmina de irrigação é reduzida entre 30 a 50% (SOUZA et al., 2012). Já Scarpare et al. (2015) afirma que o déficit hídrico deve ser suprido até o décimo mês do ciclo da cultura e, após esse período, deve haver a suspensão da irrigação para favorecer a maturação da cultura.

### **2.3.2 Irrigação com déficit**

Na irrigação suplementar somente parte do déficit hídrico que ocorre no desenvolvimento da cultura é suprido, sendo aplicada quando a disponibilidade de água é o fator limitante da produtividade agrícola, devendo o manejo minimizar as perdas de água.

Segundo Teodoro (2011), o objetivo dessa irrigação é garantir o crescimento da cana com a aplicação de lâminas que podem variar de 180 a 300 mm no final de cada ciclo anual de cultivo, sendo essas lâminas geralmente divididas em três ou cinco aplicações de 60 mm cada uma. Já Pereira et al. (2015) propõem aplicar lâminas correspondentes a 50% do déficit hídrico máximo da cultura durante todo o seu ciclo.

Caixeta (2013) avaliou a influência da irrigação na cana-de-açúcar através de um estudo desenvolvido na região do Alto Paranaíba, no qual determinou as lâminas médias requeridas pela irrigação para maximizar a produtividade em

quatro variedades de cana. Foram analisadas as influências que as aplicações de 0, 50, 75, 100 e 125% da  $E_{t_{pc}}$  na estimativa das lâminas para a irrigação teriam nas variedades testadas. Constatou-se que para a variedade RB 867515, uma das principais variedades cultivada no Estado de Minas Gerais, a aplicação de 75%  $E_{t_{pc}}$  na estimativa da lâmina para irrigação teve produtividade similar à aquela obtida com a lâmina que considerou 125%  $E_{t_{pc}}$  e com menor necessidade de irrigação (CAIXETA, 2013; EPE, 2015).

Outra forma de se definir o quanto de água deve ser aplicada à cana-de-açúcar se refere ao uso da curva de produtividade. A função de produção típica relaciona a lâmina de água aplicada durante o ciclo da cultura e a produtividade comercial, ou relacionar as lâminas aplicadas em cada estágio fenológico com a produtividade (BERNARDO e MANTOVANI, 2006).

## **2.4 Disponibilidade hídrica superficial e gestão dos recursos hídricos no Brasil**

A disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica pode ser determinada por meio da análise das vazões mínimas, caracterizadas pela duração e frequência, observadas durante os períodos de estiagem. Essa vazão reflete o potencial natural disponível para os diversos usos (RODRIGUEZ et al., 2007). Entretanto, quando as demandas são maiores que as disponibilidades hídricas ocorrem quadros de escassez.

De forma a assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água nos padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, foi instituída em 8 de janeiro de 1997, pela Lei 9.433, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), a qual instituiu os instrumentos de gestão, entre eles a outorga de direito de uso da água (BRASIL, 1997).

A quantidade de água possível de ser outorgada varia de acordo com os critérios de cada estado federado e da União. A Agência Nacional de Águas (ANA) adota 70% da  $Q_{95}$  como o limite máximo possível de outorga para os diversos usos múltiplos de água (ANA, 2009). Já o Estado de Minas Gerais, por exemplo, considera que, em algumas bacias, o máximo a ser outorgado é 30% da  $Q_{7,10}$  anual e, em outras bacias, pode-se outorgar no máximo 50% da  $Q_{7,10}$  anual (SEMAD-IGAM, 2012).

A utilização de um único valor outorgável fixo durante todo o ano restringe consideravelmente o uso da água nos meses que não ocorre estiagem. Assim, a adoção de períodos mensais como referência para a outorga seria o mais adequado, uma vez que representa melhor as características das vazões de cada mês (VERGARA et al., 2013).

Segundo Oliveira et al. (2013), a substituição do uso da  $Q_{7,10}$  anual pela  $Q_{7,10}$  mensal para a bacia do Ribeirão Entre Ribeiros, localizada em Minas Gerais, resultou em um aumento de até 209% na vazão possível de ser outorgada. Na bacia do Rio Grande, apenas diferenciando as vazões ocorridas durante o período seco e o período chuvoso, há um aumento de até 61,8% na vazão outorgada (EUCLYDES et al., 2006).

Em alguns locais, mesmo com a substituição de critérios de outorgas, a disponibilidade a fio d'água não é suficiente para atender as demandas dos usuários. Dessa forma, pode-se aumentar a disponibilidade de água através da regularização de vazão dos cursos d'água. De acordo com Nunes e Pruski (2015), nas áreas de cabeceira da bacia do Ribeirão Entre Ribeiros ocorreram incrementos superiores a 15 vezes na disponibilidade hídrica com a adoção da regularização de vazões.

## **2.5 Bacia do Rio Paracatu**

A bacia hidrográfica do Rio Paracatu está inserida nos estados de Minas Gerais, Goiás e no Distrito federal, sendo que mais de 90% da sua área de drenagem encontra-se parte mineira. A bacia destaca-se nas atividades do setor agrícola, mineral e na pecuária (IGAM, 2006).

No setor agrícola a bacia abrange áreas de municípios que possuem destaque na produção de grãos e de cana-de-açúcar como, por exemplo, os municípios de Unai, Cristalina, João Pinheiro e Paracatu, sendo que atualmente tem sido praticada a agricultura irrigada.

O desenvolvimento da agricultura na bacia ocorreu a partir da década de 80, devido aos incentivos governamentais visando a expansão de novas áreas agrícolas, o que levou ao aumento da agricultura sob condições de irrigação (IGAM, 2006). Entretanto, em consequência dessa expansão, evidencia-se que nos últimos anos há uma demanda crescente pelos recursos hídricos na região, sendo necessária a adoção de técnicas adequadas para que se possa minimizar

os impactos advindos desse aumento e, também, para que se possa aproveitar o potencial hídrico da bacia.

## **2.6 Sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros**

A sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros está localizada entre os municípios de Unaí e Paracatu, no noroeste de Minas Gerais, sendo um dos principais afluentes da bacia do Rio Paracatu, contribuindo com 8% da sua vazão média. É uma bacia predominantemente agrícola com destaque para a produção de grãos.

O impulso para o desenvolvimento da agricultura na sub-bacia iniciou com a implantação do Programa Integrado de Desenvolvimento da região Noroeste de Minas Gerais (PLANOROESTE) que tinha por objetivo instalar uma infraestrutura básica de transporte e energia para o desenvolvimento na região. Em seguida, surgiram outros programas que tinham por objetivo modernizar a agricultura existente (SANTOS, 2007). Entretanto, a expansão da agricultura na região não foi acompanhada de um manejo adequado dos recursos naturais, o que levou a sub-bacia a enfrentar uma série de problemas como, por exemplo, a escassez hídrica (VASCONCELOS et al., 2012).

Atualmente já são evidenciados na sub-bacia, principalmente nas áreas de cabeceiras, onde ocorrem as menores disponibilidades hídricas, conflitos entre os usuários de água, o que levou o Ministério Público a intervir e exigir práticas adequadas por parte dos irrigantes, de forma a minimizar os conflitos existentes (OLIVEIRA et al., 2013; SANTOS, 2007). Moreira et al. (2014) identificaram que em mais de 30% da área da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros foram outorgadas vazões superiores aos limites estabelecidos pela legislação, mas que esse problema poderia ser minimizado com a adoção da regularização de vazão.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Caracterização das áreas de estudo**

#### **3.1.1 Bacia do Rio Paracatu**

A bacia hidrográfica do Rio Paracatu (Figura 1) está localizada no Alto-Médio São Francisco, entre as coordenadas geográficas de 47°30'W e 45°10'W, e de 15°30'S e 19°30'S, possuindo uma área de drenagem superior a 45.000 km<sup>2</sup>. Cerca de 92% da sua extensão pertencente ao estado de Minas Gerais, 5% ao estado de Goiás e os outros 3% ao Distrito Federal. O Rio Paracatu é o afluente com maior contribuição real para a formação da vazão do Rio São Francisco, contribuindo com aproximadamente 18,2% (PEREIRA et al., 2007). Suas principais sub-bacias são: Rio Preto, Rio da Prata, Rio do Sono, Rio Escuro e ribeirão Entre Ribeiros (IGAM, 2006).

A bacia do Rio Paracatu abrange áreas totais ou parciais dos municípios mineiros de Paracatu, Guarda-Mor, Lagamar, Presidente Olegário, Buritizeiro, Santa Fé de Minas, Dom Bosco, Unaí, Cabeceira Grande, Natalândia, Brasilândia de Minas, João Pinheiro e São Gonçalo do Abaeté; e dos municípios goianos de Cristalina, Formosa e Cabeceiras; além do Distrito Federal.

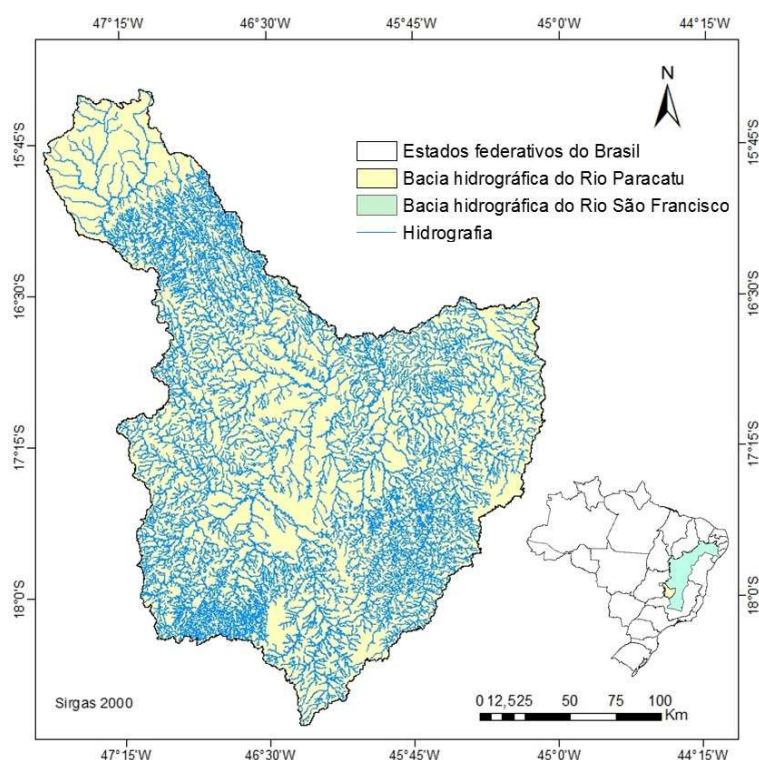


Figura 1 - Localização geográfica da bacia do Rio Paracatu.

De acordo com a classificação de Köppen, a bacia apresenta clima megatérmico chuvoso do tipo Aw, caracterizado por um clima tropical chuvoso típico, com as precipitações variando de 1.054 a 1.537 mm (Figura 2), concentradas no período de outubro a abril, sendo que as maiores precipitações médias anuais ocorrem no sul e noroeste da bacia, decrescendo em direção à foz (IGAM, 2006; VASCONCELOS et al., 2012).

As principais atividades econômicas desenvolvidas na bacia são a pecuária, agricultura e exploração mineral (REZENDE, 2013). As principais culturas cultivadas nos municípios pertencentes à bacia são a soja, o feijão, o milho e a cana-de-açúcar, sendo os municípios de Unaí, Paracatu e Cristalina os que possuem as maiores áreas plantadas (IBGE, 2015).

A agricultura irrigada é o principal usuário de água na bacia, correspondendo a 86,6% do total demandado, sendo que as sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do Rio Preto concentram 53% de toda a área irrigada na bacia (RODRIGUEZ et al., 2007; PRUSKI et al., 2007).

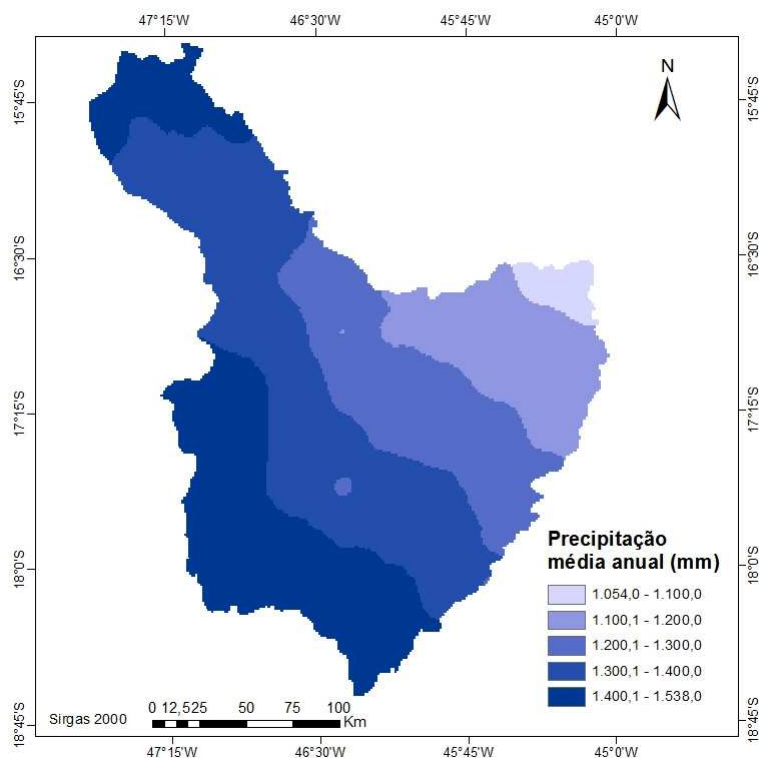


Figura 2 - Precipitação média anual correspondente ao período de 1980 a 2013, na bacia do Rio Paracatu, com os dados de precipitação diária obtidos de Xavier et al. (2015).

### 3.1.2 Sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros

A sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros (Figura 3) localiza-se no noroeste de Minas Gerais entre os municípios de Unaí e Paracatu. Abrange uma área de drenagem próxima a 3900 km<sup>2</sup> e com 163 km de extensão. É o principal afluente da bacia do rio Paracatu, contribuindo com 8% de sua vazão média.

A localização geográfica da sub-bacia faz com que haja predominâncias de um clima tropical chuvoso, de Latossolos, de planaltos suaves e com bom potencial agrícola (VASCONCELOS, 2010). Segundo Brasil (1996), a evapotranspiração potencial média anual é de 1.140 mm e, de acordo com o balanço hidroclimático, durante os meses de maio a setembro ocorrem déficits hídricos em toda a área da sub-bacia.

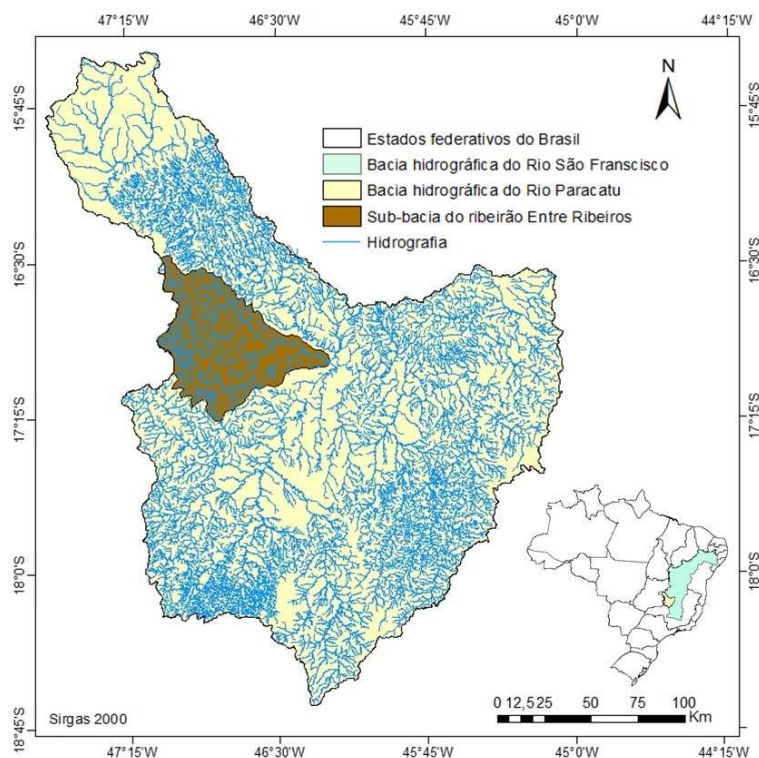


Figura 3 - Localização geográfica da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

A irrigação é a atividade responsável pelo maior consumo de água na bacia, sendo este superior a 92% do total consumido (PRUSKI et al., 2007). De acordo com a Associação de Apoio aos Produtores do Entre Ribeiros (AAPER), em 2014 a sub-bacia possuía uma área irrigada de 21.298 ha e, devido ao aumento da área cultivada, o manejo inadequado e a falta do planejamento no uso dos recursos hídricos, têm feito com que a sub-bacia sofra uma crise hídrica em relação à disponibilidade hídrica (DAB, 2003).

### 3.2 Disponibilidade hídrica

A disponibilidade hídrica de uma bacia pode ser avaliada pela análise das vazões mínimas, caracterizadas pela duração e frequência de ocorrência, e pela vazão média. Somente uma porcentagem dessas vazões são utilizadas para concessão de outorga, sendo a outra parte considerada vazão residual, necessária para a manutenção do meio biótico.

A disponibilidade hídrica da bacia do Rio Paracatu, tanto a fio d'água quanto a vazão regularizada, foi obtida do "Estudo de regionalização de vazões para o aprimoramento do processo de outorga no estado de Minas Gerais". Nesse estudo, foi feita a regionalização da vazão média de longa duração ( $Q_{mid}$ )

e das vazões mínimas ( $Q_{95}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{7,10}$ ), para a hidrografia sob a dominialidade do estado de Minas Gerais, considerando as regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) (GPRH / IGAM, 2012).

Neste trabalho, foram consideradas as vazões mínimas com sete dias consecutivos de duração e com um período de recorrência de dez anos ( $Q_{7,10}$ ) e as vazões médias de longa duração ( $Q_{mld}$ ), cujas equações de regionalização de vazões para cada RHH utilizadas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Equações de regionalização de vazões nas RHH da bacia do Rio Paracatu

RHH	$Q_{7,10}$	$Q_{mld}$
I	$Q_{7,10} = 0,11673 \text{ Peq}_{750}^{0,98702}$	$Q_{mld} = 0,98845 \text{ Peq}_{750}^{0,97146}$
II	$Q_{7,10} = 0,12054 \text{ Peq}_{750}^{0,90740}$	$Q_{mld} = 0,88746 \text{ Peq}_{750}^{0,93582}$
III	$Q_{7,10} = 0,13035 \text{ Peq}_{750}^{0,89122}$	$Q_{mld} = 0,77112 \text{ Peq}_{750}^{0,97078}$

em que:  $Q_{mld}$  = vazão média de longa duração  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $\text{Peq}_{750}$  = vazão equivalente ao volume precipitado considerando a subtração do fator de abstração da precipitação de 750 mm para a formação das vazões,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; e  $Q_{7,10}$  = vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros foi considerado o efeito da sazonalidade das vazões utilizando as vazões mínimas mensais ( $Q_{7,10}$ ) na disponibilidade hídrica a fio d'água. As espacializações das vazões foram feitas com base nas equações disponíveis no estudo de regionalização de vazões desenvolvido por Oliveira et al. (2013). As equações, em bases anual e mensal, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Equações de regionalização das  $Q_{7,10}$  anual e mensais  
(OLIVEIRA et al., 2013)

	$Q_{7,10}$
Anual	$Q_{7,10} = 0,1232 \text{ Peq}_{750}^{0,9697}$
Janeiro	$Q_{7,10} = 0,2193 \text{ Peq}_{750}^{1,1071}$
Fevereiro	$Q_{7,10} = 0,1952 \text{ Peq}_{750}^{1,0861}$
Março	$Q_{7,10} = 0,1982 \text{ Peq}_{750}^{1,1544}$
Abril	$Q_{7,10} = 0,1794 \text{ Peq}_{750}^{1,1953}$
Maio	$Q_{7,10} = 0,1641 \text{ Peq}_{750}^{1,1605}$
Junho	$Q_{7,10} = 0,1434 \text{ Peq}_{750}^{1,1280}$
Julho	$Q_{7,10} = 0,1429 \text{ Peq}_{750}^{1,0646}$
Agosto	$Q_{7,10} = 0,1451 \text{ Peq}_{750}^{1,0030}$
Setembro	$Q_{7,10} = 0,1453 \text{ Peq}_{750}^{0,9634}$
Outubro	$Q_{7,10} = 0,1187 \text{ Peq}_{750}^{0,9959}$
Novembro	$Q_{7,10} = 0,0841 \text{ Peq}_{750}^{1,1547}$
Dezembro	$Q_{7,10} = 0,1458 \text{ Peq}_{750}^{1,1125}$

A disponibilidade hídrica referente a cada trecho ( $Q_{7,10 \text{ local}}$  e  $Q_{\text{mld local}}$ ) da hidrografia foi estimada pelas equações

$$Q_{7,10 \text{ local}} = Q_{7,10 j} - \sum_{i=1}^n Q_{7,10 \text{ local } j-c} \quad (1)$$

e

$$Q_{\text{mld local}} = Q_{\text{mld } j} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{mld local } j-c} \quad (2)$$

em que:  $Q_{7,10 \text{ local}}$  = vazão mínima no trecho de interesse,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $Q_{7,10 j}$  = vazão mínima a jusante do trecho de interesse,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; e  $Q_{7,10 \text{ local } j-c}$  = vazão mínima no trecho antes da confluência com o trecho de interesse,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $Q_{\text{mld local}}$  = vazão média no trecho de interesse,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ;  $Q_{\text{mld } j}$  = vazão média a jusante do trecho de interesse,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; e  $Q_{\text{mld local } j-c}$  = vazão mínima no trecho antes da confluência com o trecho de interesse,  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Nos trechos de cabeceiras, a  $Q_{7,10 \text{ local}}$  e a  $Q_{\text{mld local}}$  são iguais a  $Q_{7,10 j}$  e a  $Q_{\text{mld } j}$ , respectivamente.

As vazões específicas de cada trecho da hidrografia ( $q_{7,10}$  e  $q_{\text{mld}}$ ) foram estimadas pelas equações

$$q_{7,10} = 1000 \frac{Q_{7,10 \text{ local}}}{A} \quad (3)$$

e

$$q_{\text{mld}} = 1000 \frac{Q_{\text{mld local}}}{A} \quad (4)$$

em que:  $q_{7,10}$  = vazão mínima específica no trecho de interesse,  $L \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ;  $A$  = área de drenagem do trecho de interesse,  $\text{km}^{-2}$ ; e  $q_{\text{mld}}$  = vazão média específica no trecho de interesse,  $L \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ .

### 3.3 Irrigação plena

Na irrigação plena considerou-se que toda a necessidade de suplementação hídrica da cultura da cana-de-açúcar fosse suprida por meio da irrigação durante o ciclo da cultura. Apenas nos dois últimos meses do ciclo da cultura, que correspondem à fase fenológica da maturação, considerou-se que não haveria irrigação, seguindo as recomendações de Scarpate et al. (2015).

#### 3.3.1 Vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar

As demandas hídricas para a irrigação da cana-de-açúcar foram calculadas com base no balanço hídrico e na eficiência de aplicação. Para tanto, considerou-se durante o ciclo da cultura, com exceção dos dois últimos meses, um turno de rega de cinco dias. Através da média ponderada das demandas unitárias correspondentes a cada data de plantio da cultura, obteve-se a vazão unitária requerida média pela equação

$$q_{\text{req-méd}} = \sum_{i=1}^n \frac{14,3 q_{\text{req } i}}{100} \quad (5)$$

em que:  $q_{\text{req-méd}}$  = vazão unitária requerida média,  $\text{L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$ ; 14,3 = proporção de área plantada em cada mês de plantio, %;  $q_{\text{req } i}$  = vazão unitária requerida correspondentes a cada data de plantio,  $\text{L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$ ; e 100 = área total plantada, %.

As  $q_{\text{req-méd}}$  foram calculadas para todos os centroides dos pixels, chamados de pontos, que cobriam as áreas de estudo (Figura 4a), espaçados a cada  $0,25^\circ$ . Em seguida, essas informações foram espacializadas pelo método de interpolação Inverso da Distância à Potência (IDW) por meio do software Arcgis 10.1 / ArcMap® da ESRI, de forma que em qualquer ponto das áreas de estudo houvessem informações referentes à vazão requerida pela irrigação (Figura 4b). Com base na hidrografia (Figura 4c), na escala 1:50.000, foram gerados pontos nas extremidades à jusante de cada trecho (Figura 4d) por meio da ferramenta *Feature Vertices to Points* e, em seguida, foi feita a sobreposição dos pontos referentes a cada trecho da hidrografia com o mapa espacializado da  $q_{\text{req-méd}}$ . Com a ferramenta *Extract Values to Points* foi possível extrair os valores referentes às demandas para irrigação nas extremidades a jusante de cada trecho da hidrografia (Figura 4e).

Dessa forma, foram gerados 73 mapas contendo as informações das  $q_{\text{req-méd}}$  nas áreas de estudo, os quais são referentes aos 73 períodos correspondentes aos 12 meses do ciclo da cultura.

Para cada um desses meses, foram analisados os seis mapas da  $q_{\text{req-méd}}$  especializada, a fim de identificar qual foi o período de cinco dias em que ocorreram as máximas  $q_{\text{req-méd}}$  na bacia. Essa identificação foi feita pela média das  $q_{\text{req-méd}}$  obtidas em cada período em todos os pontos que abrangeram as áreas de estudo e, então, foi selecionado o período com a maior média dentro de determinado mês. Sendo assim, ao final da análise foram selecionados os 12 mapas referentes aos períodos de maior demanda dos 12 meses do ciclo da cultura.

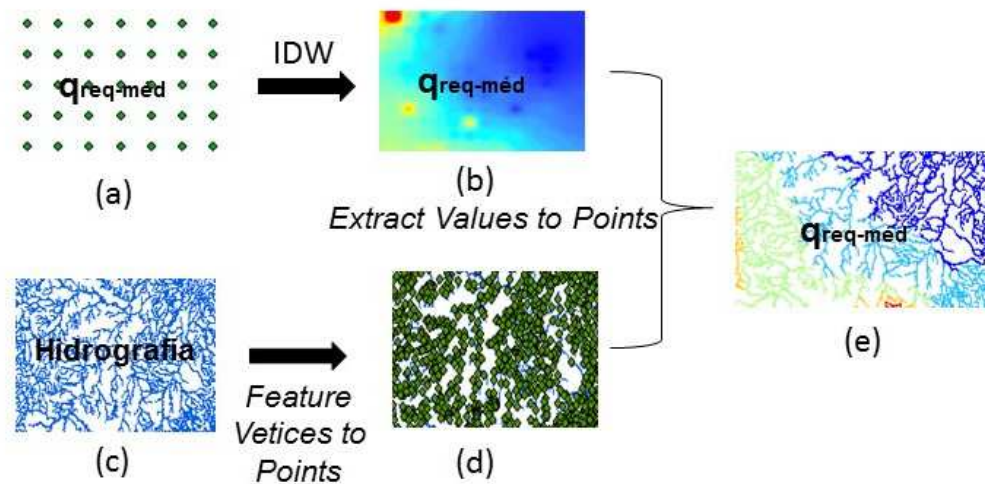


Figura 4 - Informações da  $q_{req-méd}$  referente ao centroide de cada pixel (a),  $q_{req-méd}$  espacializada (b), hidrografia (c), pontos na extremidade a jusante de cada trecho (d) e  $q_{req-méd}$  em cada trecho da hidrografia (e).

A vazão unitária requerida ( $q_{req}$ ) para a irrigação da cana-de-açúcar foi obtida em base diária através da equação

$$q_{req} = \frac{(E_{trc} - P_{ef})}{E_a} \frac{1}{8,64} \quad (6)$$

em que:  $q_{req}$  = vazão unitária requerida para a irrigação,  $L s^{-1} ha^{-1}$ ;  $E_{trc}$  = evapotranspiração real da cultura,  $mm d^{-1}$ ;  $P_{ef}$  = precipitação efetiva,  $mm d^{-1}$ ;  $E_a$  = eficiência de irrigação, adimensional; e 8,64 = fator de conversão de unidade de  $mm d^{-1}$  para  $L s^{-1} ha^{-1}$ .

Na estimativa da  $q_{req}$  considerou-se que se a  $P_{ef}$  for maior que a  $E_{trc}$ , então, a  $q_{req}$  é igual a zero.

### 3.3.1.1 Evapotranspiração real da cultura

A evapotranspiração real da cultura ( $E_{trc}$ ) é definida como a quantidade de água evapotranspirada por uma determinada cultura sob condições normais de cultivo. A  $E_{trc}$  está condicionada, além dos elementos meteorológicos, à

porcentagem de cobertura do solo, ao tipo de cultura e à disponibilidade de água no solo.

A  $E_{trc}$  foi obtida pela equação

$$E_{trc} = E_{t0} K_C K_S \quad (7)$$

em que:  $E_{t0}$  = evapotranspiração de referência,  $mm\ d^{-1}$ ;  $K_C$  = coeficientes de cultura para determinada de desenvolvimento, adimensional; e  $K_S$  = coeficientes de umidade do solo, adimensional.

A evapotranspiração de referência ( $E_{t0}$ ) diária foi obtida através do trabalho desenvolvido por Xavier et al. (2015), no qual os autores desenvolveram pixels com resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , o que equivale a uma distância de 38 km, com dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento, precipitação e de  $E_{t0}$ , calculada pela equação de Penman-Monteith. Os dados foram coletados em estações automáticas e convencionais disponíveis no Brasil, correspondentes ao período de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2013.

Os valores dos coeficientes de cultivo ( $K_C$ ) utilizados neste trabalho foram obtidos em Doorenbos e Kassan (1994) para a cana-de-açúcar, cuja duração do ciclo da cultura possui 12 meses. A Tabela 3 apresenta os valores de  $K_C$  e as respectivas durações dos períodos de desenvolvimento da cultura.

Tabela 3 - Duração dos períodos de desenvolvimento e os valores dos  $K_C$  da cana-de-açúcar (Doorenbos e Kassan, 1994)

<b>Idade da cana (meses)</b>	<b>Período de desenvolvimento</b>	<b><math>K_C</math></b>
0 a 1	Do plantio até 25% de cobertura	0,55
1 a 2	De 25 a 50% de cobertura	0,80
2 a 2,5	De 50 a 75% de cobertura	0,90
2,5 a 4	De 75 a cobertura completa	1,00
4 a 10	Cobertura total do solo	1,05
10 a 11	Início de maturação	0,80
11 a 12	Maturação	0,60

O coeficiente de umidade do solo ( $K_s$ ) é igual a um quando o solo se encontra próximo a capacidade de campo e, à medida que a umidade decresce, esse valor tende a diminuir até que esse valor atinja o correspondente ao de reinício da irrigação, ou seja, quando o solo se encontra no limite da depleção de água, sem que afete o desenvolvimento da cultura. Dessa forma, o  $K_s$  a ser considerado nesse trabalho corresponde à média entre o momento em que o solo se encontra próximo a capacidade de campo e no limite de depleção de água e foi estimado pela equação

$$K_s = \frac{1 + \frac{\log(LAA+1)}{\log(CTA+1)}}{2} \quad (8)$$

em que: LAA = lâmina atual de água no solo, mm; e CTA = capacidade total de armazenamento, mm.

Sendo que:

$$LAA = CTA f \quad (9)$$

e

$$CTA = CAD Z \quad (10)$$

em que:  $f$  = fator de disponibilidade de água quando ainda não há estresse hídrico, adimensional; CAD = capacidade de água disponível,  $\text{mm m}^{-1}$ ; e  $Z$  = profundidade do sistema radicular da cultura, m.

O fator de disponibilidade de água no solo ( $f$ ) é a porcentagem de água disponível no solo para que a cultura não sofra redução expressiva em sua taxa de evapotranspiração máxima, sendo dependente das condições climáticas e da cultura. O valor de  $f$  utilizado neste trabalho, igual a 0,65, foi obtido no Boletim FAO 56, assim como o valor da profundidade efetiva do sistema radicular ( $Z$ ) que foi igual a 1,2 m.

Já a capacidade de água disponível no solo (CAD) foi obtida com base no estudo desenvolvido por Rossato et al. (2004). Os autores desenvolveram um mapa interpolado, com resolução de 0,25°, contendo os valores da CAD

correspondente ao primeiro metro de perfil de solo para todo o território brasileiro. Os autores utilizaram funções de pedo-transferência para estimar esses valores com base em características do solo como a textura, a densidade global e o conteúdo de matéria orgânica.

### **3.3.1.2 Precipitação efetiva**

Na determinação da precipitação efetiva ( $P_{ef}$ ), o escoamento superficial foi desconsiderado e partiu-se do princípio de que toda a água que precipita infiltra no solo, de acordo com as seguintes condições:

- se a precipitação diária ( $P$ ) for maior ou igual à capacidade real de água no solo ( $CRA$ ), então a  $P_{ef} = CRA$ ; e

- se  $P$  for menor que  $CRA$ , então  $P_{ef} = P$ .

A  $CRA$  foi obtida através da equação

$$CRA = CAD \cdot Z \quad (11)$$

As precipitações diárias, referentes ao período de 1 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2013, foram obtidas no trabalho de Xavier et al. (2015).

### **3.3.1.3 Eficiência de aplicação**

Através da análise dos dados do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE, 2006) constatou-se que o método de irrigação predominante da cana-de-açúcar nas áreas de estudo é a aspersão.

De acordo com a Nota Técnica nº 364/2007/GEOOUT/SOF-ANA, citada por ANA (2013), as eficiências de aplicações para os diversos sistemas de aspersão variam de 80 a 90%. Sendo assim, considerou-se nesse trabalho o quartil superior entre a média dessas eficiências, sendo igual a 87,5%.

### **3.3.1.4 Meses de plantio**

Com base em informações extraídas da CONAB (2013) e IBGE (2006), a colheita da cana-de-açúcar ocorre entre os meses de maio a novembro em Minas Gerais. Dessa forma, considerou-se que no primeiro dia de cada um desses meses, maio a novembro, inicia-se um novo ciclo da cana-de-açúcar em

determinada área, sendo essas áreas distribuídas equitativamente em cada data de plantio.

A Figura 5 apresenta os meses de início de cada ciclo da cana, chamados neste trabalho de meses de plantio, associados às fases de desenvolvimento da cultura e as respectivas durações de cada fase. Não foram utilizadas outras datas de plantio devido ao longo ciclo da cana-de-açúcar, pois se concluiu que atrasar ou adiantar o plantio em um mês não haveria variações significativas nas demandas hídricas para a irrigação.

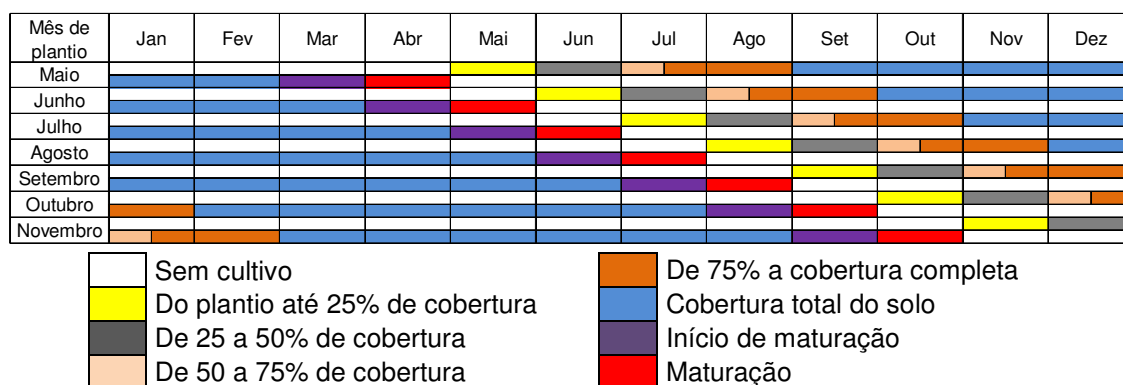


Figura 5 - Meses de plantio da cana-de-açúcar e as durações das fases fenológicas.

### 3.3.2 Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água

A análise da possibilidade de expansão das áreas irrigadas foi feita com base nas áreas potencialmente irrigáveis (API's) e nas áreas plantadas já existentes com cana-de-açúcar e com as demais culturas na bacia do Rio Paracatu e, também, em algumas seções específicas, denominadas de sub-bacias. De acordo com a codificação de bacias hidrográficas pelo método de Otto Pfafstetter, utilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA), existem nove sub-bacias no Rio Paracatu, considerando o nível quatro, entre as quais está o ribeirão Entre Ribeiros. A localização e o código em nível quatro para cada sub-bacia integrante do Rio Paracatu estão apresentados na Figura 6. Os códigos, nomes e as áreas de drenagem de cada uma das sub-bacias encontram-se na Tabela 4. A sub-bacia 7485 não foi considerada neste trabalho devido ao seu tamanho insignificante para as análises feitas neste trabalho.

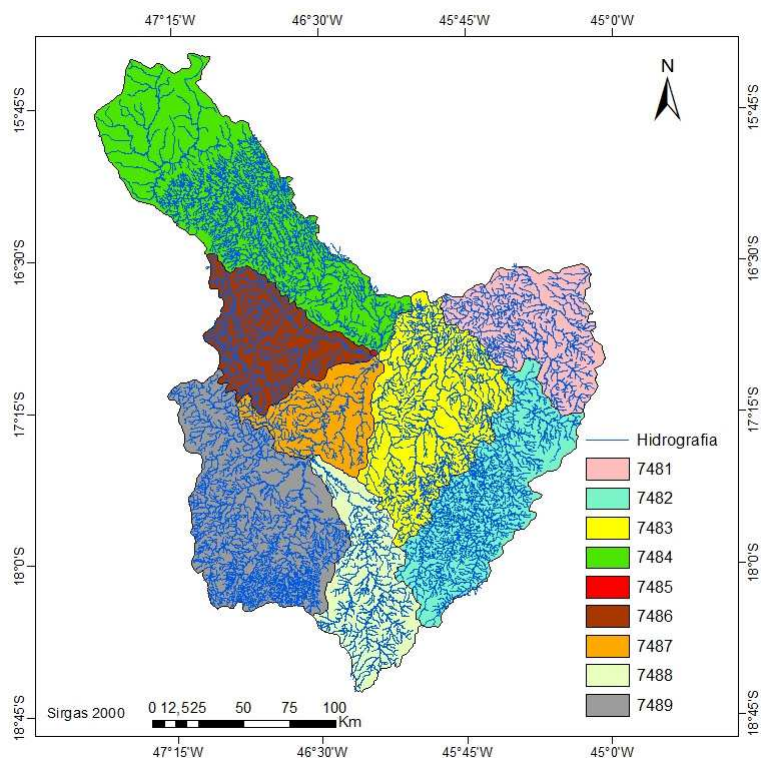


Figura 6 - Sub-bacias integrantes do Rio Paracatu de acordo com a classificação Otto em nível quatro.

Tabela 4 – Sub-bacias do Rio Paracatu de acordo com a classificação Otto e as respectivas áreas de drenagem

<b>Código</b>	<b>Sub-bacia</b>	<b>Área de drenagem (km<sup>2</sup>)</b>
7481	Baixo Paracatu	4.252
7482	Rio do Sono	5.792
7483	Médio – Baixo Paracatu	6.475
7484	Rio Preto	10.149
7486	Ribeirão Entre Ribeiros	3.835
7487	Médio Paracatu	2.798
7488	Rio da Prata	3.960
7489	Rio Escuro	7.724

Considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água em bases anual e mensal, foram estimadas inicialmente as áreas potencialmente irrigáveis para cada trecho da hidrografia ( $API_{\text{trecho}}$ ) pela equação

$$API_{\text{trecho}} = \frac{x \cdot Q_{7,10 \text{ local}} \cdot 1000}{q_{\text{req-méd}}} \quad (12)$$

em que:  $API_{\text{trecho}}$  = área potencialmente irrigável em cada trecho, ha; e  
 $x$  = percentagem da  $Q_{7,10}$  passível para outorga, adimensional.

Na bacia do Rio Paracatu considerou-se uma percentagem de 50% da  $Q_{7,10}$  anual como a vazão máxima passível de outorga, uma vez que na legislação vigente no Estado de Minas Gerais essa é a percentagem utilizada como referência para concessão de outorgas nos rios de domínios estaduais, conforme a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548 de 29 de março de 2012 (SEMAD-IGAM, 2012). Nos rios de domínio federal também se considerou 50% da  $Q_{7,10}$  anual. Na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros também foram consideradas as disponibilidades hídricas referentes a 50% da  $Q_{7,10}$  mensal.

Em seguida fez-se o somatório das  $API_{\text{trecho}}$  estimadas nas áreas de cabeceira em direção à foz da bacia ( $API_{\text{acum}}$ ), ou sub-bacia, através da equação

$$API_{\text{acum}} = \sum_{i=1}^n API_{\text{trecho}} \quad (13)$$

em que:  $API_{\text{acum}}$  = somatório das  $API_{\text{trecho}}$  das cabeceiras até a foz, ha.

As informações relativas às áreas plantadas de cana-de-açúcar e as áreas considerando todas as culturas foram coletadas no banco de dados do IBGE referentes ao ano de 2015. Como essas informações estão disponíveis para cada município (Apêndice A) e, como alguns deles não estão inseridos totalmente nas áreas de estudo, foi necessário estimar as áreas plantadas existentes na bacia do Rio Paracatu e também nas sub-bacias. Neste trabalho considerou-se que toda a área plantada é irrigada.

As áreas plantadas de cana-de-açúcar na bacia e nas sub-bacias foram estimadas pela equação

$$AAP_C = \sum_{i=1}^n \frac{A_{M-B}}{A_M} A_{C-M} \quad (14)$$

em que:  $AAP_C$  = área atualmente plantada de cana de açúcar na área de interesse, ha;  $A_{M-B}$  = área do município inserida na área de interesse, km<sup>2</sup>;  $A_M$  = área total do município, km<sup>2</sup>; e  $A_{C-M}$  = área plantada de cana-de-açúcar no município, ha.

As áreas plantadas considerando todas as culturas na bacia e nas sub-bacias foram estimadas pela equação

$$AAP_T = \sum_{i=1}^n \frac{A_{M-B}}{A_M} A_{T-M} \quad (15)$$

em que:  $AAP_T$  = área atualmente plantada na área de interesse, ha; e  $A_{T-M}$  = área plantada no município, ha.

A análise da possibilidade de expansão da irrigação na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros, considerando a disponibilidade hídrica sazonal, foi feita com base na área irrigada ( $AAI_T$ ) em 2014 na sub-bacia de acordo com informações cedidas pela AAPER. Além disso, foi calculada a diferença relativa entre as API's estimadas com base na vazão mensal e as API's estimadas com base na vazão anual pela equação

$$\Delta API_{A-M} = \left( \frac{API_{acum \text{ mensal}} - API_{acum \text{ anual}}}{API_{acum \text{ anual}}} \right) 100 \quad (16)$$

em que:  $\Delta API_{A-M}$  = diferença relativa entre as API's estimadas em bases mensal e anual, %;  $API_{acum \text{ mensal}}$  = área potencialmente irrigada estimada com base na vazão mensal, ha; e  $API_{acum \text{ anual}}$  = área potencialmente irrigável com base na vazão anual, ha.

As análises das API's na bacia, e também nas sub-bacias, foram feitas baseadas em duas condições: a) calendário de cultivo de uso mais frequente pelos irrigantes e b) calendário de cultivo mais crítico em termos de demandas hídricas.

### **3.3.2.1 Calendário de cultivo de uso mais frequente**

As principais culturas presentes na bacia do Rio Paracatu são a soja, o feijão, o milho e a cana-de-açúcar (IBGE, 2015). As principais rotações praticadas na bacia são entre o milho e o feijão / soja.

O calendário agrícola praticado na bacia, segundo a AAPER, relativo à rotação entre as culturas do milho e do feijão / soja, o semeio do milho ocorre no início do mês de fevereiro e o do feijão / soja no início de outubro. A partir disso, Silva (2014) estimou para a sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros as demandas hídricas para a irrigação das culturas considerando o calendário agrícola praticado pelos irrigantes (Figura 7). Foram testadas outras datas de semeadura, chamadas de calendários de cultivo, no intuito de analisar qual seria o impacto da alteração na data de semeio, frente à disponibilidade hídrica na sub-bacia.

De acordo com a Figura 7, para a semeadura do milho em 1 de fevereiro, há necessidade de suplementação hídrica entre os meses de abril a junho, e para o semeio do feijão em 1 de outubro, a suplementação hídrica através da irrigação torna-se necessária durante o mês de outubro. Nos ciclos dessas duas culturas a máxima vazão requerida, cerca de  $0,39 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , ocorreu para a cultura do milho na terceira semana do mês de abril.

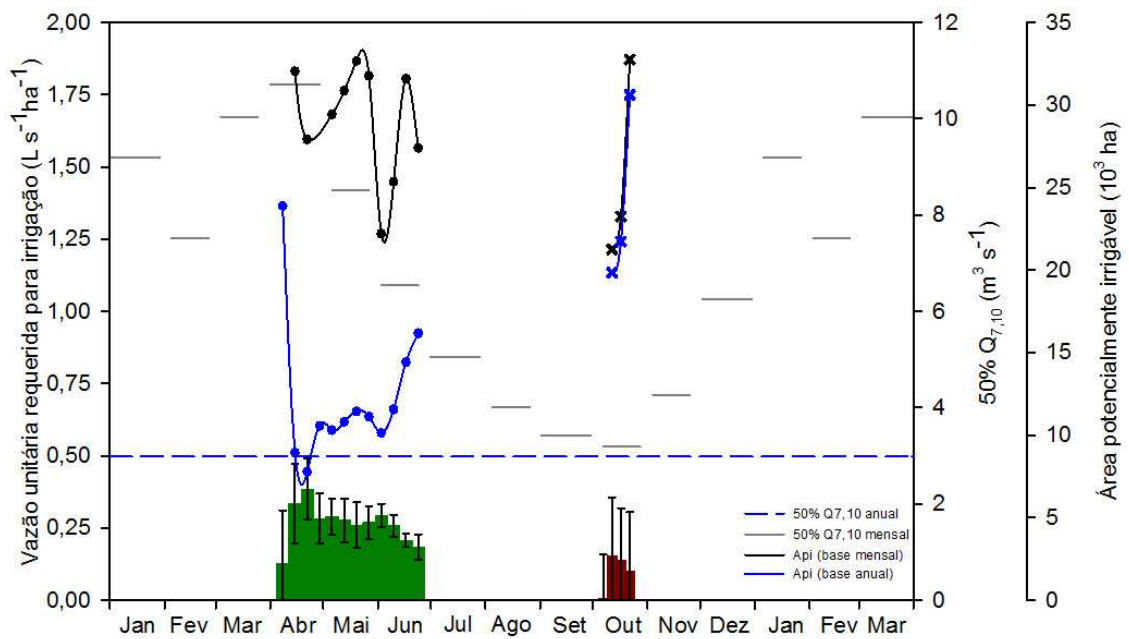


Figura 7 - Vazão unitárias requeridas para a irrigação do milho, em verde, e para o feijão, em marrom (SILVA, 2014).

Para esse calendário, nos períodos com ocorrência de déficits hídricos para a cultura da cana-de-açúcar e as culturas em rotação, foi estimada a vazão unitária média ( $q_{uni-méd}$ ), entre as  $q_{req-méd}$  estimadas para a cana-de-açúcar e as vazões estimadas ( $q_i$ ) por Silva (2014), pela equação

$$q_{uni-méd} = \frac{a q_{req-méd} + (1 - a) q_i}{100} \quad (17)$$

em que:  $q_{uni-méd}$  = vazão unitária média,  $L s^{-1} ha^{-1}$ ;  $q_i$  = vazão unitária para a irrigação das culturas em rotação,  $L s^{-1} ha^{-1}$ ; e  $a$  = percentagem da área plantada com cana-de-açúcar, %.

As  $API_{trecho}$  e  $API_{acum}$  para essa condição foram estimadas pelas equações 12 e 13, respectivamente.

### 3.3.2.2 Calendário de cultivo mais crítico

Entre os calendários de cultivos analisados por Silva (2014), para a sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros o calendário mais crítico, em relação à demanda

hídrica para a irrigação, refere-se à semeadura do milho em primeiro de maio e o semeio do feijão / soja em primeiro de janeiro.

A Figura 8 apresenta as demandas hídricas para as irrigações requeridas relativas ao plano de rotação entre o milho e feijão no calendário de cultivo mais crítico. Para a cultura do milho há necessidade de suplementação hídrica durante os meses de maio a setembro e não ocorreram déficits hídricos para o feijão. A vazão unitária máxima requerida para a irrigação do milho ocorreu no mês de julho, em torno de  $0,45 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ .

Assim como no calendário mais frequente, neste também foram sobrepostos os períodos de ocorrência de déficits hídricos para a cultura da cana-de-açúcar e as culturas em rotação, sendo a  $q_{\text{uni-méd}}$  calculada pela equação 17. Já as  $API_{\text{trecho}}$  e  $API_{\text{acum}}$  foram calculadas pelas equações 12 e 13, respectivamente.

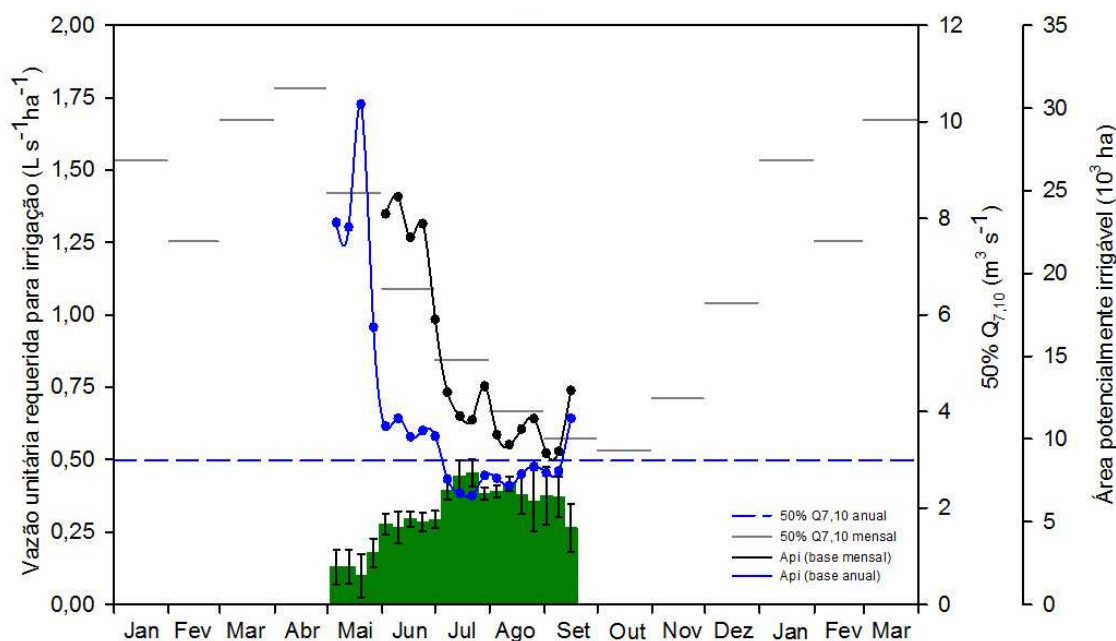


Figura 8 - Vazão unitárias requeridas para a irrigação do milho, em verde, (SILVA, 2014).

### 3.3.3 Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica regularizada

As API's de cana-de-açúcar, considerando a disponibilidade hídrica regularizada, foram estimadas inicialmente para cada trecho da hidrografia,

procedendo-se posteriormente o somatório das áreas obtidas nos trechos de cabeceiras em direção à foz da bacia, ou das sub-bacias, através das equações

$$API_{\text{trechoR}} = \frac{(Q_{\text{mld local}} - X Q_{7,10 \text{ local}})1000}{q_{\text{req-méd}}} \quad (18)$$

e

$$API_{\text{acumR}} = \sum_{i=1}^n API_{\text{trechoR}} \quad (19)$$

em que:  $API_{\text{trechoR}}$  = área potencialmente irrigável em cada trecho da hidrografia considerando a disponibilidade hídrica regularizada, ha; e  $API_{\text{acumR}}$  = somatório das  $API_{\text{trechoR}}$  das cabeceiras até a foz da bacia, ou sub-bacia, ha.

Na bacia do Rio Paracatu considerou-se a regularização plena ( $Q_{\text{mld}} - 50\% Q_{7,10}$  anual) como a vazão máxima passível de outorga, uma vez que na legislação vigente no estado de Minas Gerais é utilizada essa vazão como referência para concessão de outorgas nos rios de domínios estaduais, conforme a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548 de 29 de março de 2012 (SEMAD-IGAM, 2012).

As análises da possibilidade de expansão das áreas irrigáveis na bacia, e também nas sub-bacias, foram feitas com base nas  $API_{\text{acumR}}$  estimadas e nas áreas calculadas pelas equações 14 e 15, considerando o calendário de uso mais frequente.

### 3.3.3.1 Calendário de cultivo de uso mais frequente

A possibilidade de expansão das áreas plantadas na bacia, e nas sub-bacias, com todas as demandas hídricas sendo supridas pela irrigação foi realizada de forma semelhante ao item 3.3.2.1.

## 3.4 Irrigação com déficit

A irrigação com déficit consiste no suprimento de parte da demanda hídrica da cultura. Neste trabalho considerou-se determinadas porcentagens da  $E_{t_{pc}}$  nas estimativas das  $q_{\text{req}}$ . Considerou-se neste trabalho uma redução máxima de 25%

da  $E_{t_{pc}}$  nos cálculos das vazões requeridas para a irrigação da cana-de-açúcar, de acordo com o trabalho desenvolvido por Caixeta (2013).

### 3.4.1 Vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar

As vazões unitárias médias para a irrigação com déficit ( $q_{req-médD}$ ) da cana-de-açúcar foram estimadas através da média ponderada das vazões unitárias durante todo o ciclo da cultura correspondentes, aos sete meses de plantio pela equação

$$q_{req-médD} = \sum_{i=1}^n \frac{14,3 q_{req-D i}}{100} \quad (20)$$

em que:  $q_{req-médD}$  = vazão unitária requerida média com aplicação de déficit,  $L s^{-1} ha^{-1}$ ; e  $q_{req-D i}$  = vazão unitária requerida com aplicação de déficit correspondente a cada data de plantio, maio a novembro,  $L s^{-1} ha^{-1}$ .

As espacializações das  $q_{req-médD}$  foram feitas da mesma forma descrita no item 3.3.1.

A vazão unitária requerida na irrigação com déficit ( $q_{req-D}$ ) da cana-de-açúcar foi obtida em base diária, considerando turno de rega de cinco dias, através da equação

$$q_{req-D} = \frac{(y E_{t_{pc}} K_S - P_{ef})}{E_a} \frac{1}{8,64} \quad (21)$$

em que:  $y$  = percentagem da  $E_{t_{pc}}$  aplicada, adimensional; e  $E_{t_{pc}}$  = evapotranspiração potencial da cultura,  $mm d^{-1}$ .

As  $q_{req-D}$  na irrigação com déficit foram estimadas em função da aplicação de 90, 80 ou 75% da  $E_{t_{pc}}$ , da seguinte forma: no período que ocorreu a máxima demanda na irrigação plena, durante todo o ciclo da cultura, aplicou-se 75% da  $E_{t_{pc}}$  e obteve-se uma  $q_{req-médD}$ . Se as  $q_{req-méd}$  dos demais períodos excedessem essa  $q_{req-médD}$ , então se estimavam as  $q_{req-médD}$  desses períodos considerando os déficits correspondentes às reduções em 10, 20 e 25% da  $E_{t_{pc}}$  nas estimativas

das novas vazões para a irrigação. Considerou-se, para cada um desses períodos, a maior vazão entre as três estimadas e que não excedesse a vazão recalculada inicialmente com a aplicação de 75% da  $E_{t_{pc}}$ .

### 3.4.2 Análise das áreas potencialmente irrigáveis da cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água

Análise da possibilidade de expansão das áreas irrigáveis, utilizando a irrigação com déficit, foi feita com base nas API's e nas áreas plantadas já existentes, estimadas pelas equações 14 e 15.

Considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água em bases anual e mensal, foram estimadas as áreas potencialmente irrigáveis na irrigação com déficit em cada trecho da hidrografia ( $API_{trechoD}$ ) pela equação

$$API_{trechoD} = \frac{x \cdot Q_{7,10 \text{ local}} \cdot 1000}{q_{req-médD}} \quad (22)$$

em que:  $API_{trechoD}$  = área potencialmente irrigável na irrigação com déficit em cada trecho da hidrografia, ha; e  $x$  = percentagem da  $Q_{7,10}$  passível para outorga, adimensional.

As API's acumuladas ao longo da hidrografia na irrigação com déficit ( $API_{acumD}$ ) foram estimadas pela equação

$$API_{acumD} = \sum_{i=1}^n API_{trechoD} \quad (23)$$

em que a  $API_{acumD}$  é o somatório das  $API_{trechoD}$  das cabeceiras até a foz da bacia, ou sub-bacia, na irrigação com déficit, em ha.

As análises da potencialidade de expansão das áreas irrigáveis com a irrigação com déficit, foram baseadas em duas condições: a) expansão das áreas com cana-de-açúcar e b) calendário de cultivo de uso mais frequente.

### 3.4.2.1 Expansão das áreas com cana-de-açúcar

A análise da expansão das áreas irrigadas foi feita baseada na hipótese de que toda a API fosse ocupada apenas pela cultura da cana-de-açúcar e, também, considerando as áreas já existentes com cana na bacia e nas sub-bacias.

### 3.4.2.2 Calendário de cultivo de uso mais frequente

A análise da possibilidade de expansão das áreas irrigadas foi feita de forma similar ao item 3.3.2.1.

Entretanto, nos períodos em que ocorreram demandas hídricas para a irrigação da cana-de-açúcar e das culturas em rotação simultaneamente, a vazão unitária média com a aplicação de déficit para a cana ( $q_{\text{uni-médD}}$ ) foi estimada pela equação

$$q_{\text{uni-médD}} = \frac{a q_{\text{req-médD}} + (1 - a) q_i}{100} \quad (24)$$

em que a  $q_{\text{uni-médD}}$  é a vazão unitária média com o uso da irrigação com déficit em  $\text{L s}^{-1} \text{ha}^{-1}$ .

As  $API_{\text{trechoD}}$  e  $API_{\text{acumD}}$  para essa condição foram calculadas pelas equações 22 e 23, respectivamente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão são apresentados separadamente para cada área de estudo, na seguinte sequência: bacia do Rio Paracatu e sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

### 4.1 Bacia do Rio Paracatu

#### 4.1.1 Disponibilidade hídrica

A disponibilidade hídrica da bacia do Rio Paracatu foi analisada considerando a regularização de vazão e a disponibilidade natural. Para a obtenção da disponibilidade hídrica foi necessária a espacialização das vazões com o uso das equações de regionalização de vazão disponíveis na Tabela 1, e que resultaram nos mapas da  $Q_{mld}$  e da  $Q_{7,10}$  ao longo da hidrografia (Apêndice B).

A obtenção da disponibilidade hídrica em cada trecho da hidrografia foi feita pela diferença entre o valor da vazão ( $Q_{mld}$  ou  $Q_{7,10}$ ) a jusante do trecho de interesse e o somatório das vazões a montante dos trechos antes da confluência. Em seguida, as vazões obtidas em cada trecho foram divididas pelas suas respectivas áreas de drenagem, resultando nas vazões específicas ( $q_{mld}$  ou  $q_{7,10}$ ) para cada trecho da hidrografia (Figuras 9 e 10).

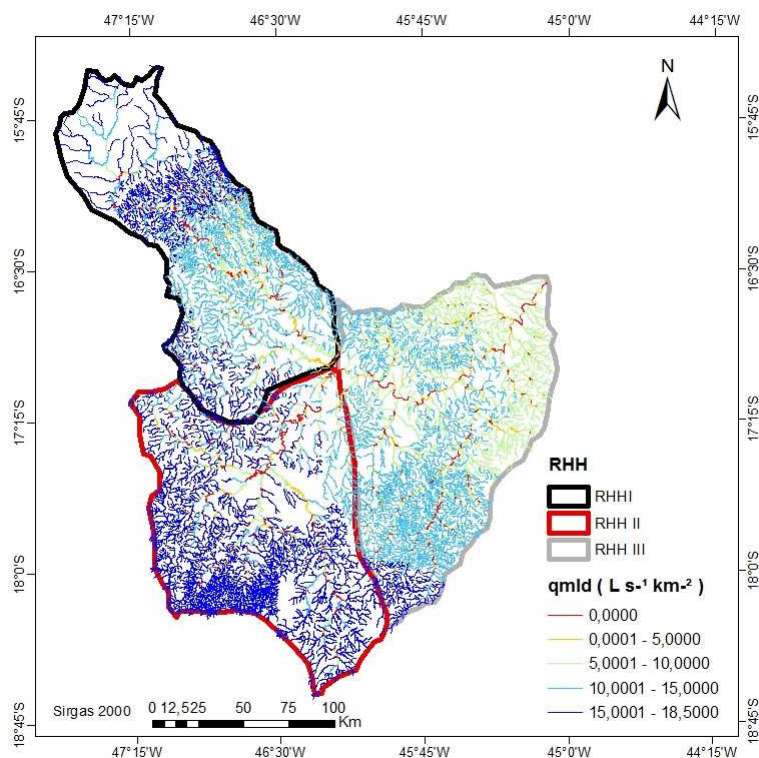


Figura 9 - Vazões específicas ( $q_{mld}$ ) para cada trecho da hidrografia e a localização das RHH da bacia do Rio Paracatu.

A  $q_{mld}$  variou, em 75% dos trechos da hidrografia, de 10,0 a 18,5  $L s^{-1} km^{-2}$ , sendo que entre esses trechos 41% tiveram vazões específicas superiores a 15,0  $L s^{-1} km^{-2}$ , estando estes concentrados nas regiões sul e noroeste da bacia, onde foram evidenciadas também as maiores precipitações médias anuais, que variam de 1.300 a 1560 mm (Figura 2). Nos trechos próximos à foz da bacia, as  $q_{mld}$  tenderam a apresentar valores menores, de 5,0 a 10,0  $L s^{-1} km^{-2}$ , reflexo da ocorrência de menores precipitações médias anuais. Em alguns trechos da hidrografia, destacados em vermelho, a  $q_{mld}$  apresentou valores de vazões incrementais negativos, fato que está associado ao problema da descontinuidade de vazões.

A descontinuidade de vazões é uma limitação que tem sido evidenciada no processo de regionalização de vazão, quando feita pelo método de regressão múltipla, e que leva a vazões incrementais nulas ou extremamente altas, e que não seguem o comportamento esperado decorrente do regime de precipitações. Esse problema ocorre na transição de uma região homogênea para outra ou, até mesmo, em trechos da hidrografia dentro da própria região (PRUSKI et al., 2012). Neste trabalho, evidenciou-se que as vazões incrementais negativas ocorreram, sobretudo, nas confluências dentro de uma mesma região. Devido a

essa limitação, considerou-se a vazão igual a zero nos trechos em que foi obtida uma vazão incremental negativa.

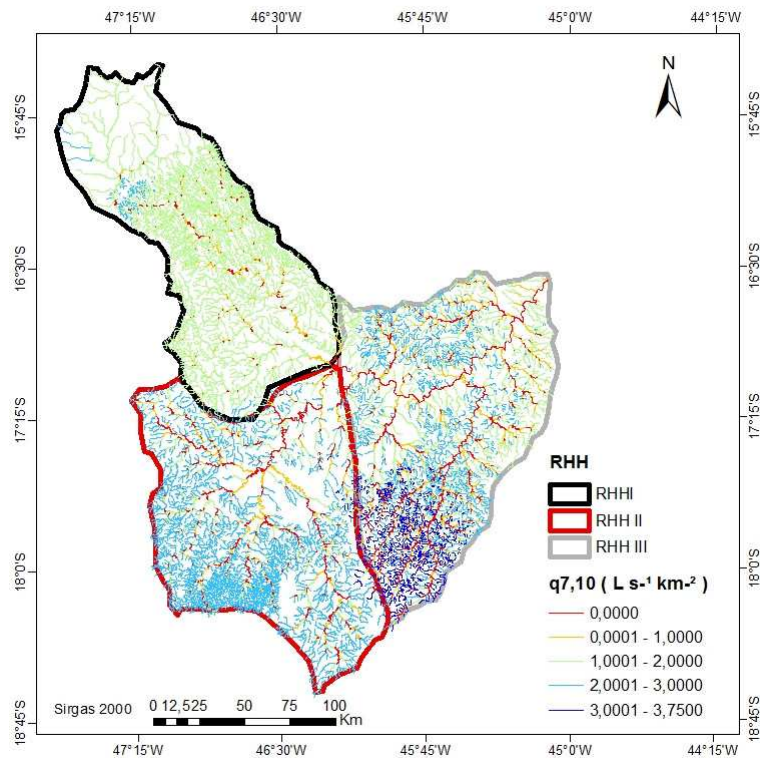


Figura 10 - Vazões específicas ( $q_{7,10}$ ) para cada trecho da hidrografia e a localização das RHH da bacia do Rio Paracatu .

O comportamento da  $q_{7,10}$  ao longo da bacia não apresentou uma relação de dependência tão forte com a precipitação média anual, quanto à observada para a  $q_{mld}$ . Tal fato está associado à formação das vazões, sendo que a  $q_{mld}$  é formada com as contribuições dos escoamentos superficial e subterrâneo, enquanto a  $q_{7,10}$  está mais diretamente associada à contribuição do lençol freático (NOVAES et al., 2009; NUNES e PRUSKI, 2015). Outro fator que pode explicar o comportamento da  $q_{7,10}$  é a formação hidrogeológica da bacia (Figura 11).

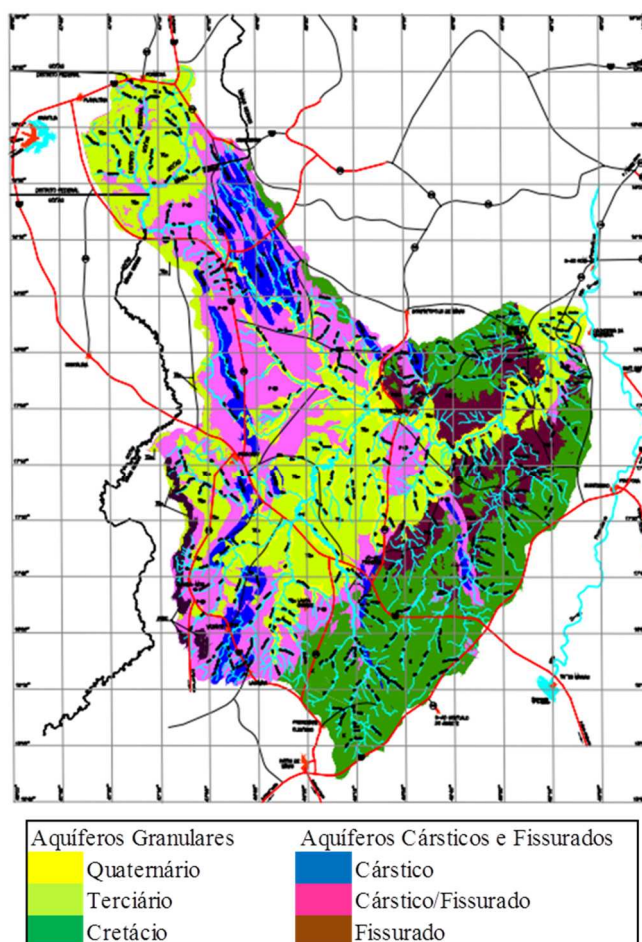


Figura 11 - Distribuição dos sistemas de aquíferos na bacia do Rio Paracatu (Adaptado de: IGAM, 2006).

Na RHH I a  $q_{7,10}$  variou de 1,0 a 2,0  $L s^{-1} km^{-2}$  e está localizada em uma área com predominância de aquíferos cársticos-fissurados. Nessas áreas, com formação cárstica, há uma grande variabilidade espacial da permeabilidade e da capacidade de infiltração, fazendo com que ocorra um rápido esgotamento da água do solo para o leito do curso d'água, fato que pode antecipar o período de recessão nessas áreas (RODRIGUES, 2013).

Na RHH II observou-se a ocorrência de valores de  $q_{7,10}$  que variaram 2,0 a 3,0  $L s^{-1} km^{-2}$  na maioria dos trechos da hidrografia, enquanto na RHH III observou-se valores de  $q_{7,10}$  superiores a 3,0  $L s^{-1} km^{-2}$ , que ocorreram em uma área onde há ocorrência de aquíferos cretáceos, constituídos por arenitos predominantemente finos e que são caracterizados por aquíferos livres, que fornecem significativa quantidade de água através das fontes de encosta, contribuindo para a formação das vazões dos cursos d'água (VASCONCELOS et al., 2012).

Além disso, assim como observado para a  $q_{mld}$ , em alguns trechos ao longo da bacia também ocorreram vazões incrementais negativas, as quais foram consideradas nulas.

#### 4.1.2 Irrigação plena

Na irrigação plena considerou-se que toda a necessidade de suplementação hídrica da cana-de-açúcar fosse suprida pela irrigação.

##### 4.1.2.1 Vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar

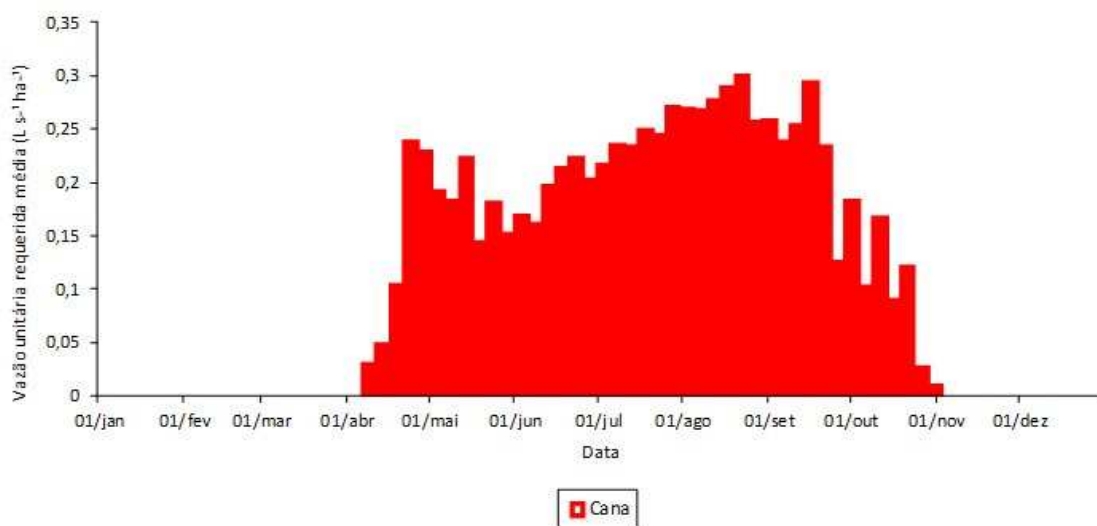
As vazões unitárias requeridas pela irrigação foram calculadas e função do balanço hídrico e na eficiência de aplicação.

Na Tabela 5 se apresenta um exemplo contendo as vazões requeridas pela irrigação ( $q_{req}$  e  $q_{req-méd}$ ) durante o período de 9 a 13 de setembro em dois pontos que estão localizados ao sul e próximo à foz da bacia do Rio Paracatu, considerando todos os meses de plantio, as proporções de áreas irrigadas e os  $K_c$  correspondentes às fases fenológicas da cultura durante esse período.

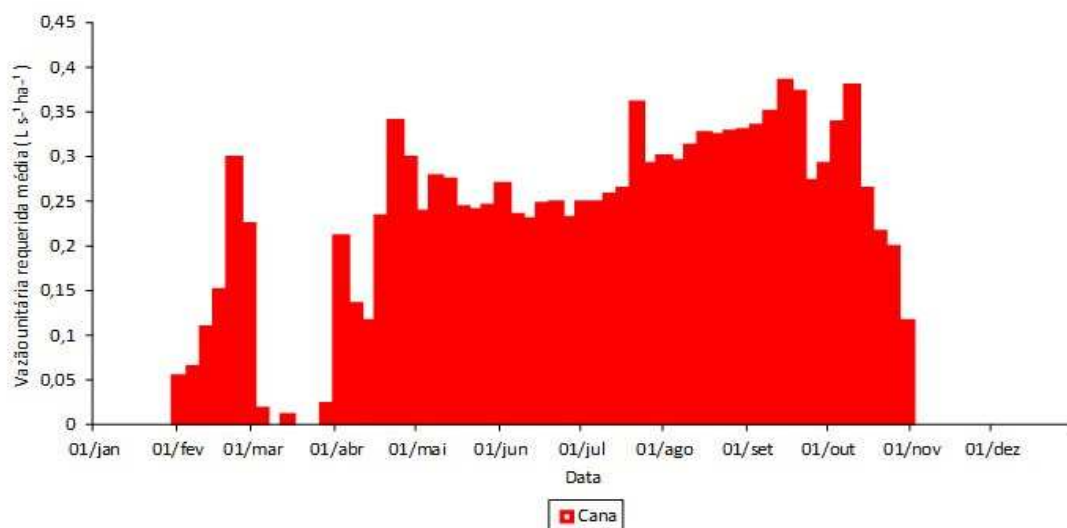
Tabela 5 – Vazões requeridas pela irrigação ( $q_{req}$  e  $q_{req-méd}$ ),  $K_c$  e proporção de área irrigada em dois pontos, localizados ao sul (46,125°W; 18,375°S) e próximo à foz (44,875°W; 16,375°S) do Rio Paracatu

Mês de plantio	$K_c$	$q_{req}$ (L s <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )		Proporção de área irrigada na bacia (%)	$q_{req-méd}$ (L s <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> )	
		Sul	Foz		Sul	Foz
Maio	1,05	0,47	0,64	14,30		
Junho	1,00	0,51	0,62	14,30		
Julho	0,95	0,45	0,55	14,30		
Agosto	0,80	0,41	0,50	14,30	0,29	0,38
Setembro	0,55	0,22	0,33	14,30		
Outubro	0,80	0,00	0,00	14,30		
Novembro	0,60	0,00	0,00	14,30		

Na Figura 12 apresentam-se as  $q_{\text{req-méd}}$  estimadas em pontos localizados ao sul e próximo à foz da bacia, respectivamente, para os períodos em que ocorreram déficits hídricos durante o ciclo da cana-de-açúcar. A  $q_{\text{req-méd}}$  representa a média das  $q_{\text{req}}$  correspondentes aos sete meses de plantio, ou seja, as demandas hídricas para a irrigação da cana em diferentes estádios fenológicos e com as áreas irrigadas distribuídas equanimemente ao longo desses meses, conforme está apresentado na Tabela 5.



(a)



(b)

Figura 12 - Vazões unitárias requeridas médias ( $q_{\text{req-méd}}$ ) durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar em dois pontos localizados ao sul ( $46,125^{\circ}\text{W}$ ;  $18,375^{\circ}\text{S}$ ) (a) e próximo à foz ( $44,875^{\circ}\text{W}$ ;  $16,375^{\circ}\text{S}$ ) (b) da bacia do Rio Paracatu.

Analisando as Figuras 12a e 12b, nota-se que as demandas hídricas para a irrigação possuem comportamentos distintos. Para o ponto ao sul da bacia, durante todo o ciclo da cana, os déficits hídricos se concentraram entre os meses de abril ao início de novembro, sendo que a máxima  $q_{\text{req-méd}}$  ( $0,29 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) ocorre na terceira semana do mês de agosto. Já no ponto próximo à foz, a máxima  $q_{\text{req-méd}}$  ocorre na segunda semana de setembro, sendo cerca de 30% superior à máxima demanda hídrica estimada no sul da bacia.

Nota-se também que, apenas no ponto localizado próximo à foz, há necessidade de suplementação hídrica da cana no período correspondente ao final de janeiro até o início de março, ocorrendo vazões unitária de até  $0,30 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , fato este associado aos maiores déficits hídricos nas áreas próximas à foz da bacia do Rio Paracatu.

O período de ocorrência da máxima  $q_{\text{req-méd}}$  ( $0,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) foi considerado o mais crítico em termos de demanda hídrica, sendo este, portanto, o valor utilizado como referência para as análises de demanda de água pela irrigação feitas no decorrer deste trabalho.

Após uma análise em nível de bacia, constatou-se que durante os meses de janeiro e dezembro não houve necessidade de suplementação hídrica da cultura da cana-de-açúcar. Nos demais meses, de fevereiro a novembro, foi evidenciada a necessidade de suplementação hídrica da cana-de-açúcar, entre os quais foi constatado que no período de 9 a 13 de setembro ocorreram as máximas  $q_{\text{req-méd}}$  durante todo o ciclo da cultura (Figura 13). Dessa forma, optou-se por discutir os resultados referentes a esse período, uma vez que representa a situação mais crítica na bacia.

Durante o período de 9 a 13 de setembro as maiores  $q_{\text{req-méd}}$  estão concentradas nos trechos próximos à foz da bacia, diminuindo em direção às regiões noroeste e sul da bacia. O comportamento das vazões requeridas ao longo da hidrografia foi reflexo do balanço hídrico na bacia. Nas regiões sul e noroeste ocorreram as maiores precipitações médias anuais (Figura 2) e os menores valores de  $E_0$  (Figura 14), resultando em uma menor necessidade de suplementação hídrica. Seguindo em direção à foz da bacia, houve um aumento no déficit hídrico, uma vez que as precipitações diminuíram e a  $E_0$  aumentou e, conseqüentemente, as  $q_{\text{req-méd}}$  foram maiores.

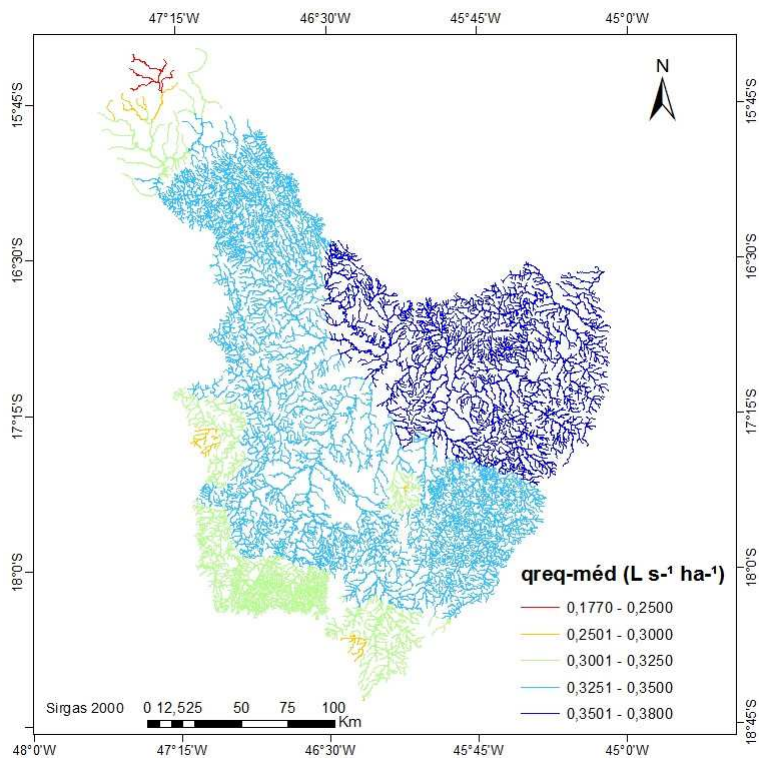


Figura 13 - Vazões unitárias médias requeridas ( $q_{req-méd}$ ) em cada trecho da hidrografia, correspondentes ao período de 9 a 13 de setembro, para a bacia do Rio Paracatu.

A maior  $q_{req-méd}$  estimada durante o ciclo da cultura em toda a bacia foi de  $0,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  (Tabela 5), na qual se evidencia que, embora tenha tido uma  $q_{req}$  correspondente ao plantio em maio igual a  $0,64 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , também foram considerados outros períodos com menores demandas, como os correspondentes aos meses de plantio de junho, julho, agosto e setembro. Além disso, também foram computados os plantios dos meses de outubro e novembro, para os quais não houve irrigação, seguindo as recomendações de Scarpate et al. (2015), a fim de ocasionar uma maior concentração de açúcar na cultura antes da colheita. Conseqüentemente, considerando essas informações, obteve-se uma  $q_{req-méd}$  igual a  $0,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ .

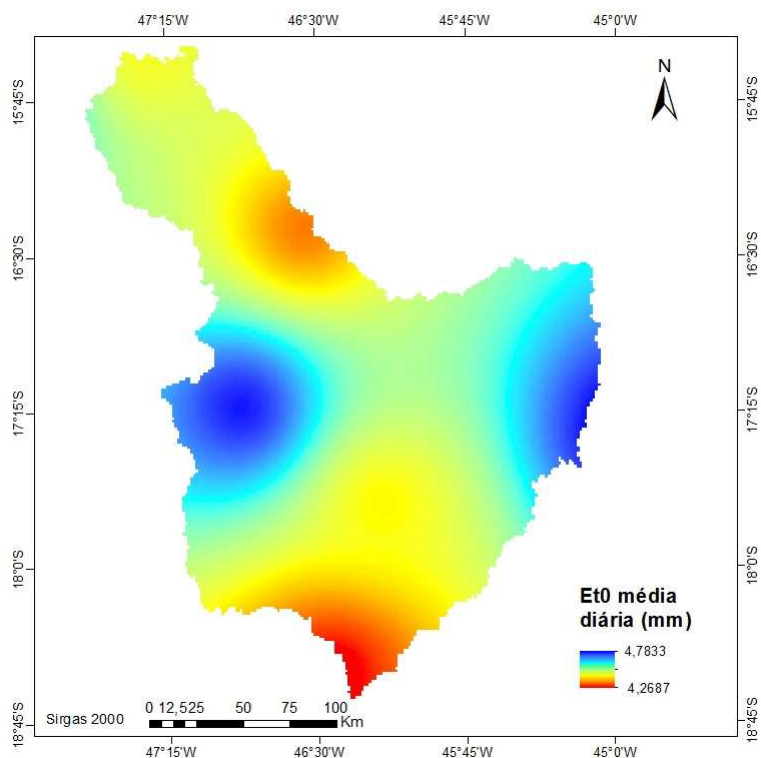


Figura 14 -  $E_t0$  média diária no mês de setembro com os dados obtidos de Xavier et al. (2015).

Para uma análise comparativa, a  $q_{req-méd}$  obtida neste trabalho ( $0,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) foi comparada com os valores que são utilizados nas análises dos pedidos de outorga no estado de Minas Gerais, uma vez que a maior parte da área da bacia é de domínio deste estado. Segundo o Manual Técnico e Administrativo de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos no Estado de Minas Gerais (2010), o consumo de água na agricultura irrigada por aspersão, método mais utilizado na irrigação da cana-de-açúcar, varia de 1,0 a  $1,4 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . Dessa forma, a  $q_{req-méd}$  estimada representou 38% do limite inferior dos valores que são utilizados por Minas Gerais e, ainda, mesmo utilizando a  $q_{req}$  que foi estimada para a fase de maior demanda da cultura,  $0,64 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , ainda assim, os valores que têm sido utilizados nos pedidos de outorgas são, no mínimo, 56% superiores a máxima  $q_{req}$ .

Também foi feita a análise comparativa entre a maior  $q_{req-méd}$  e os valores normalmente praticados nas outorgas para irrigação segundo os critérios utilizados pela ANA e, para isso, foi feita uma simulação de um pedido de outorga para um ponto de captação na foz da bacia do Rio Paracatu. Para a determinação da vazão requerida no projeto de pedido de outorga foram utilizadas as recomendações do Manual de Procedimentos Técnicos e

Administrativos de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (2013), no qual é recomendado que, para o cálculo da vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar seja utilizado um  $K_C$  médio igual a 1,25 e, em vez do uso da precipitação efetiva no balanço hídrico, seja utilizada uma precipitação efetiva provável. Como resultado desta simulação, obteve-se uma vazão unitária requerida igual a  $0,89 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , mais do que o dobro da maior  $q_{\text{req-méd}}$  estimada neste trabalho. Essa diferença está associada ao uso de um valor de  $K_C$  referente à fase de maior desenvolvimento da cultura por parte da ANA, resultando na máxima vazão requerida pela irrigação.

Sendo assim, a utilização de uma  $q_{\text{req}}$  que seja representada pela média das demandas, pode representar um expressivo benefício em termos do planejamento e gestão dos recursos hídricos, uma vez que está associada a valores mais representativos das condições médias das  $q_{\text{req}}$  no âmbito da bacia, em relação aos valores que têm sido praticados nos projetos de irrigação.

#### **4.1.2.2 Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água**

Embora a presente avaliação, do comportamento das API's considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água, seja de aplicação mais apropriada em uma macroescala, procedeu-se a análise individualizada para cada trecho da hidrografia, para, posteriormente, realizá-la de forma acumulativa. O passo a passo relativo a essa análise é apresentado na sequência.

A estimativa da API foi feita inicialmente para cada trecho da hidrografia ( $API_{\text{trecho}}$ ) em função da  $q_{\text{req-méd}}$ , considerando os 12 períodos mensais correspondentes aos 12 maiores valores de  $q_{\text{req-méd}}$  selecionados, conforme descrito no item 4.1.2.1, e da disponibilidade hídrica representada pela  $Q_{7,10}$  anual disponível para outorga em cada trecho da hidrografia.

Dos 12 períodos selecionados, apenas para os meses de janeiro e dezembro não houve necessidade de suplementação hídrica. Para os demais meses foram gerados 10 mapas contendo as  $API_{\text{trecho}}$  referentes a cada período e, em seguida, computou-se o somatório dessas áreas seguindo a direção das cabeceiras para a foz da bacia, permitindo a totalização da API's ( $API_{\text{acum}}$ ). Dessa forma, foram gerados 10 mapas das  $API_{\text{acum}}$  ao longo da hidrografia,

sendo apresentado e discutido o correspondente à situação mais crítica na bacia e, conseqüentemente, às menores  $API_{acum}$ .

Procedeu-se com a análise da possibilidade de expansão das áreas irrigadas com base nas API's de cana-de-açúcar, na bacia do Rio Paracatu, durante o período mais crítico do ciclo da cultura, considerando duas condições: a) o calendário de cultivo mais frequente utilizado pelos irrigantes, e b) o calendário de cultivo mais crítico em relação à demanda de água.

#### **4.1.2.2.1 Calendário de cultivo de uso mais frequente**

A condição relativa ao calendário de uso mais frequente utilizado atualmente pelos irrigantes, segundo a AAPER, corresponde ao plano de rotação no qual a semeadura do milho ocorre no início de fevereiro e a do feijão / soja no início de outubro.

Os períodos de ocorrência de déficits hídricos para as culturas em rotação foram sobrepostos com os períodos com necessidade de suplementação hídrica da cana-de-açúcar e, sendo assim, fez-se a média entre as vazões unitárias requeridas para as culturas em rotação, que foram estimadas por Silva (2014) (Figura 7), e as  $q_{req-méd}$  estimadas neste trabalho para a cana, obtendo-se assim as vazões unitárias médias.

A Figura 15 apresenta as vazões unitárias médias, sendo estas correspondentes às demandas relativas à média da cultura da cana (barras em vermelho) e da cultura do milho (barras em verde) ou do feijão (barras em marrom), considerando que cada cultura ocupe a metade da área plantada, ou seja, metade da área sendo ocupada pela cana e metade ocupada pelas culturas em rotação.

Nota-se que no período mais crítico do ciclo da cana-de-açúcar, de 9 a 13 de setembro, não há necessidade de suplementação hídrica das culturas em rotação e, portanto, toda a disponibilidade hídrica permissível para outorga é destinada apenas para a irrigação da cana, desconsiderando-se os demais usuários de água na bacia.

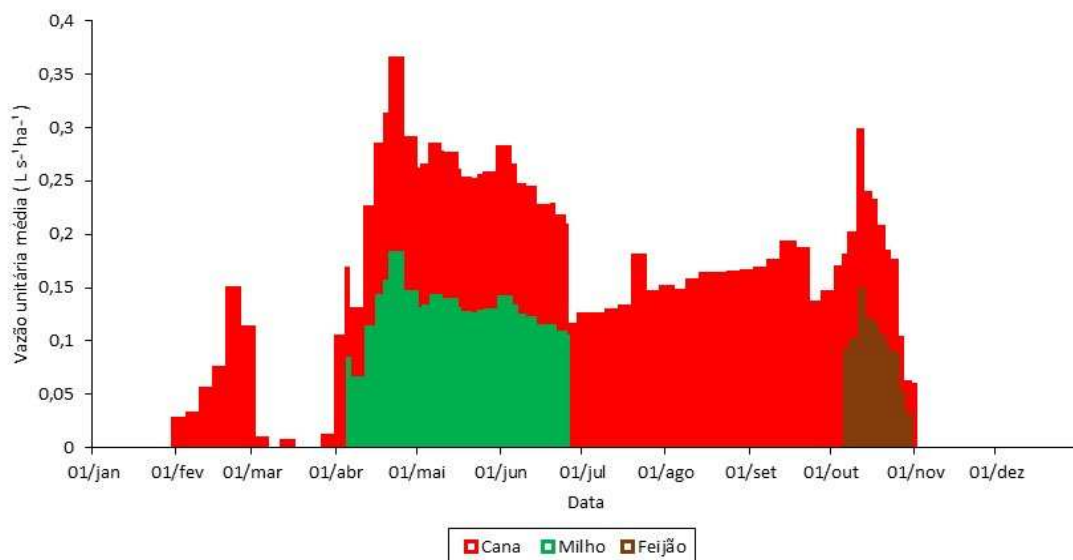


Figura 15 - Vazões unitárias médias entre as culturas em rotação e a cana em um ponto próximo à foz (44,875°W; 16,375°S) do Rio Paracatu.

Nos períodos que há demandas hídricas para a irrigação, tanto das culturas em rotação como da cana simultaneamente, a máxima vazão unitária média ocorre no final de abril, estimada em  $0,37 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , valor muito próximo à máxima  $q_{\text{req-méd}}$  estimada para a cana-de-açúcar ( $0,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ), que ocorre no período de 9 a 13 de setembro, considerado o período mais crítico durante o ciclo da cana, em termos de demanda hídrica para a irrigação.

Para o plano de rotação entre o milho e a soja, o comportamento das vazões unitárias médias entre essas duas culturas e a cana é semelhante ao plano de rotação entre o milho e o feijão, sendo a máxima vazão unitária média ( $0,37 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) evidenciada no final de abril, também obtida também combinação das culturas do milho e da cana.

Portanto, com base na análise realizada para a cultura da cana-de-açúcar individualmente, evidencia-se que a máxima demanda unitária foi de  $0,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , ocorrendo em setembro. Já a maior demanda unitária, correspondente à rotação das culturas, ocorreu no mês de abril, igual a  $0,39 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  (Figura 7). Para a condição relacionada ao uso de parte da área com a cultura da cana e parte correspondente ao cultivo simultâneo com as culturas em rotação, o consumo médio foi de  $0,37 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , correspondente à última semana de abril. Com base nessas informações pode-se evidenciar que as vazões unitárias requeridas para a irrigação não sofrem alterações

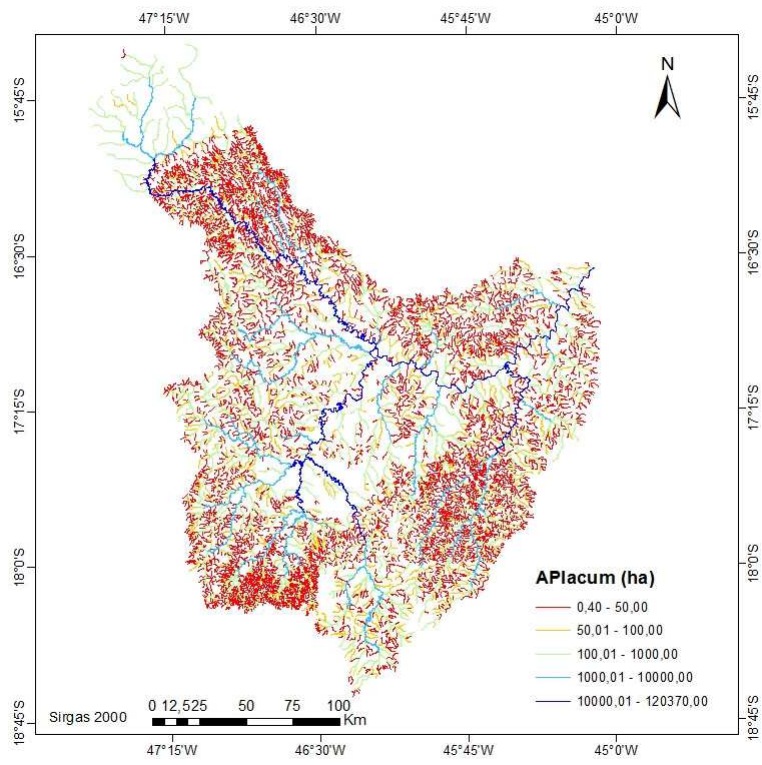
expressivas, estando as variações associadas apenas ao seu período de ocorrência, motivo pelo qual se considerou para as análises realizadas na sequência um valor correspondente a  $0,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ .

Sendo assim, as análises das  $API_{\text{acum}}$  foram feitas considerando que, primeiramente, toda a área é ocupada pela cana-de-açúcar e, depois, considerando parte da área com a cana e parte com o cultivo simultâneo das demais culturas.

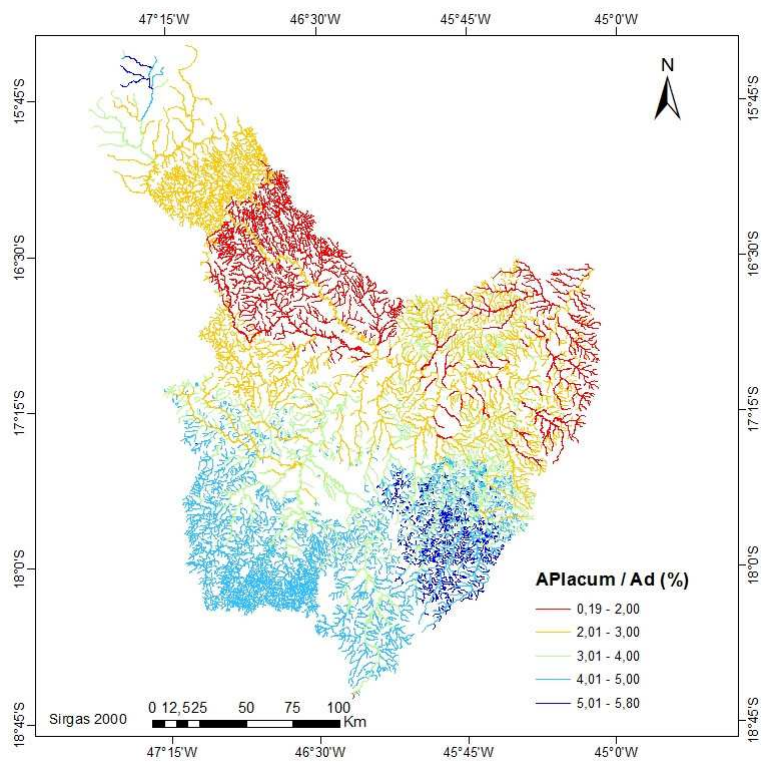
A seguir são apresentadas as  $API_{\text{acum}}$  (Figura 16a) e a relação entre essas áreas e as áreas a montante da foz de cada trecho ( $A_d$ ) (Figura 16b) ao longo da hidrografia, considerando a demanda correspondente ao período de 9 a 13 de setembro.

A  $API_{\text{acum}}$  estimada na foz da bacia, desconsiderando os demais segmentos usuários, é de aproximadamente 120.370 ha, o que corresponde a 2,7% da área de drenagem da bacia do Rio Paracatu. Em 2015 a área plantada de cana-de-açúcar estimada para a bacia era de 50.000 ha e, dessa forma, considerando que toda a área fosse ocupada com a cultura da cana e que esta fosse irrigada, ainda seria possível aumentá-la em até 140%.

As relações entre as  $API_{\text{acum}}$  e as  $A_d$  ao longo da hidrografia variaram de 0,19%, em trechos de cabeceiras localizados próximos à foz, a 5,80%, nos trechos localizados ao sul da bacia. O comportamento dessas relações indica que há uma tendência de decréscimo das APIs no sentido da região sul em direção à foz da bacia, comportamento este que está diretamente relacionado à diminuição das  $q_{7,10}$  e ao aumento do déficit hídrico nesse mesmo sentido.



(a)



(b)

Figura 16 -  $API_{acum}$  (a) e a relação entre a  $API_{acum}$  e  $A_d$  (b) correspondente ao período de 9 a 13 de setembro, para a bacia do Rio Paracatu.

Procedeu-se com a avaliação da possibilidade de expansão das áreas irrigadas da cana-de-açúcar também para as oito sub-bacias constituintes da bacia do Rio Paracatu (Figura 6), considerando-se, para tanto, a disponibilidade hídrica a fio d'água e as demandas hídricas da cana-de-açúcar no período mais crítico.

Na Tabela 6 estão apresentadas, para cada sub-bacia, as  $API_{acum}$ , a relação dessas áreas com as áreas de drenagem, as áreas plantadas de cana-de-açúcar ( $AAP_C$ ) e a relação entre as  $API_{acum}$  e as  $AAP_C$ .

Tabela 6 -  $API_{acum}$ , relação das  $API_{acum}$  com as áreas de cada sub-bacia,  $AAP_C$  e a relação entre as  $API_{acum}$  e a  $AAP_C$  em cada sub-bacia

Sub-bacia	$API_{acum}$ (ha)	$\frac{API_{acum}}{A_{sub-bacia}} 100$ (%)	$AAP_C$ (ha)	$\frac{API_{acum}}{AAP_C}$
7481	8026	1,89	177	45,44
7482	17810	3,07	11580	1,54
7483	15031	2,32	13008	1,16
7484	25529	2,51	4155	6,14
7486	9082	2,37	5661	1,60
7487	7060	2,52	6206	1,14
7488	12347	3,12	4191	2,95
7489	25485	3,30	4446	5,73

Nas oito sub-bacias analisadas, de acordo com as  $API_{acum}$  estimadas para cada uma delas, considerando a disponibilidade hídrica como fator limitante, é possível irrigar de 1,89 a 3,30% da área de drenagem de cada uma delas, sendo as maiores relações de  $\frac{API_{acum}}{A_{sub-bacia}}$  obtidas nas regiões às quais estão associadas as maiores  $q_{7,10}$  e os menores déficits hídricos.

De acordo com as relações entre as  $API_{acum}$  e as  $AAP_C$ , considerando o calendário de cultivo mais frequente utilizado pelos irrigantes da bacia, a disponibilidade hídrica seria suficiente para atender as demandas da irrigação em todas as sub-bacias, havendo, ainda, potencial de expansão dessas áreas. Dentre as oito sub-bacias, as mais críticas em termos de expansão da irrigação da cana são as do Médio-Baixo Paracatu (7483) e do Médio Paracatu (7487), nas quais haveria uma possibilidade de expansão de apenas 16 e 14%, respectivamente, valores estes relacionados ao fato de já existirem altas

proporções de áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Nas sub-bacias em que a proporção da área ocupada com cana é ainda muito pequena, evidencia-se uma grande disponibilidade hídrica para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar sob condições de irrigação, como é o caso das sub-bacias do Rio Prata (7488), do Rio Escuro (7489), do Rio Preto (7484) e do Baixo Paracatu (7481), nas quais seria possível, pelo menos, triplicar a área cultivada com cana.

De acordo com a  $API_{acum}$  estimada na foz da bacia, a disponibilidade hídrica a fio d'água outorgável, considerando a irrigação simultânea da cana-de-açúcar e das demais culturas, seria suficiente para suprir apenas 21% da área plantada na bacia, considerando que todas as culturas sejam irrigadas.

Na Tabela 7 estão apresentadas as  $API_{acum}$ , as áreas plantadas considerando todas as culturas ( $AAP_T$ ) e a relação entre as  $API_{acum}$  e as  $AAP_T$  em cada sub-bacia.

Tabela 7 -  $API_{acum}$ ,  $AAP_T$  e a relação entre as  $API_{acum}$  e a  $AAP_T$  em cada sub-bacia

Sub-bacia	$API_{acum}$ (ha)	$AAP_T$ (ha)	$\frac{API_{acum}}{AAP_T}$
7481	8026	6530	1,23
7482	17810	20701	0,86
7483	15031	19811	0,76
7484	25529	248539	0,10
7486	9082	94701	0,10
7487	7060	41927	0,17
7488	12347	35538	0,35
7489	25485	116498	0,22

Dentre as oito sub-bacias analisadas, em cinco delas a vazão máxima permissível para outorga é insuficiente para suprir as demandas da irrigação já existentes, nas quais seriam possíveis irrigar um percentual inferior a 35% da área já plantada, sendo as sub-bacias mais críticas, em termos do suprimento da necessidade hídrica das culturas, a do Rio Preto (7484) e a do ribeirão Entre Ribeiros (7486), as quais já possuem uma alta demanda hídrica para a irrigação, uma vez que nelas estão inseridos parte dos municípios de Paracatu e Unaí, que estão entre os maiores produtores de grãos de Minas Gerais (IBGE, 2015).

Nas demais sub-bacias, em que o percentual de área irrigada foi superior a 76%, há uma maior disponibilidade hídrica, possibilitando o suprimento das necessidades hídricas das culturas com o uso da irrigação plena em maiores áreas plantadas, tendo ainda possibilidade de expansão em 23% da área plantada existente na sub-bacia do Baixo Paracatu (7481).

Dessa forma, fica evidente que a consideração de 50% da  $Q_{7,10}$  anual não é suficiente para suprir toda a necessidade de irrigação da área plantada em sete sub-bacias, o que caracteriza a necessidade de regularização de vazões para o atendimento destas demandas e às demandas associadas aos demais segmentos usuários.

#### **4.1.2.2.2 Calendário de cultivo de uso mais crítico**

A condição relativa ao calendário de cultivo mais crítico, em termos de demanda hídrica para a irrigação, corresponde ao plano de rotação no qual a semeadura do milho ocorre no início de maio e a do feijão / soja no início de janeiro.

Assim como no calendário de uso mais frequente, os períodos de ocorrência de déficits hídricos para as culturas em rotação foram sobrepostos com os períodos com necessidade de suplementação hídrica da cana-de-açúcar e, sendo assim, fez-se a média entre as vazões unitárias requeridas para as culturas em rotação, que foram estimadas por Silva (2014) (Figura 8), e as  $q_{req-méd}$  estimadas neste trabalho para a cana (vazões unitárias médias), obtendo-se as vazões unitárias médias entre as culturas em rotação e a cana.

A Figura 17 apresenta as vazões unitárias médias, que são correspondentes às demandas relativas à média da cultura da cana e da cultura do milho, considerando que cada cultura ocupe a metade da área plantada, ou seja, metade da área sendo ocupada pela cana e metade ocupada pelas culturas em rotação.

Nota-se que, para este calendário de cultivo, durante todo o ciclo da cultura do milho, há a necessidade de suplementação hídrica nos mesmos períodos em que ocorrem os déficits hídricos da cana-de-açúcar, sendo que a máxima vazão unitária média ocorre na terceira semana de julho, igual a  $0,41 \text{ L s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Durante o período mais crítico, em termos de demanda hídrica para a irrigação no ciclo da cana, que é de 9 a 13 de setembro, a vazão unitária média entre o milho e a

cana é de  $0,36 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , sendo, portanto, esta vazão próxima à máxima  $q_{\text{req-méd}}$  estimada para a cana-de-açúcar ( $0,38 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) neste mesmo período.

Portanto, evidencia-se que no calendário de cultivo mais crítico há um aumento de quase 10% na vazão unitária média, que passa a ocorrer na terceira semana de julho, comparada com a vazão no período mais crítico da cana-de-açúcar (9 a 13 de setembro). Dessa forma, aplicando a legislação vigente no estado de Minas Gerais, a qual considera a vazão máxima passível de outorga igual a 50% da  $Q_{7,10}$  anual, esse incremento na demanda para a irrigação teria um impacto de quase 10% na API estimada no período de 9 a 13 de setembro. Entretanto, o fato da máxima vazão unitária média ocorrer em um período com maior disponibilidade hídrica a fio d'água, permite que com a adoção de um manejo adequado dos recursos hídricos e da irrigação, através da utilização da irrigação com déficit e a adoção de critérios sazonais, seja possível contornar os impactos advindos do aumento da demanda sem transtornos para a produtividade da cultura.

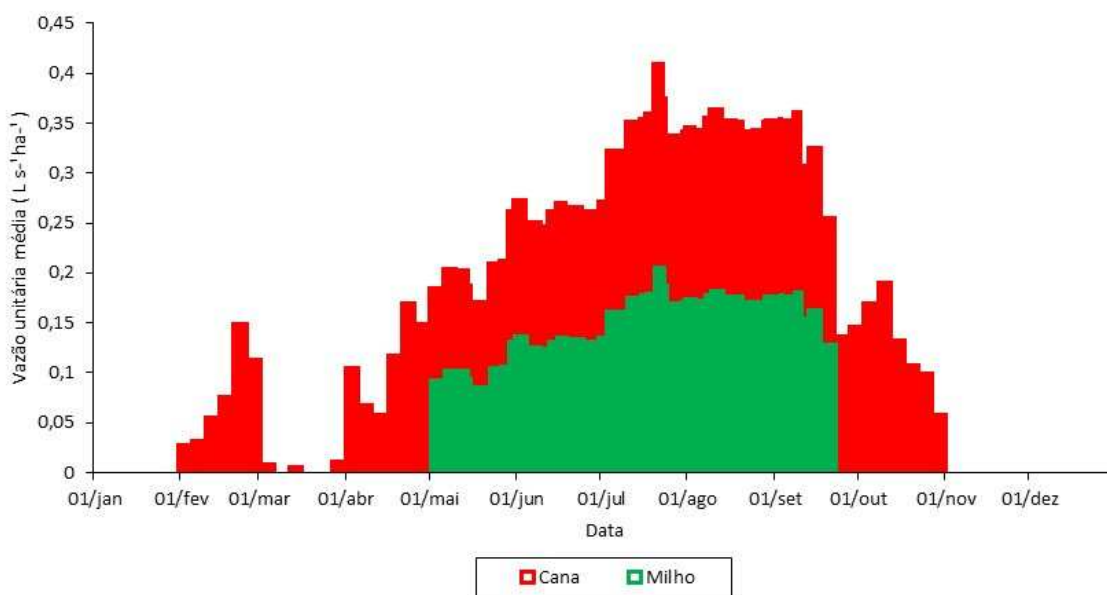


Figura 17 - Vazões unitárias médias entre as culturas em rotação e a cana-de-açúcar em um ponto próximo à foz ( $44,875^{\circ}\text{W}$ ;  $16,375^{\circ}\text{S}$ ) do Rio Paracatu.

#### **4.1.2.3 Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica regularizada**

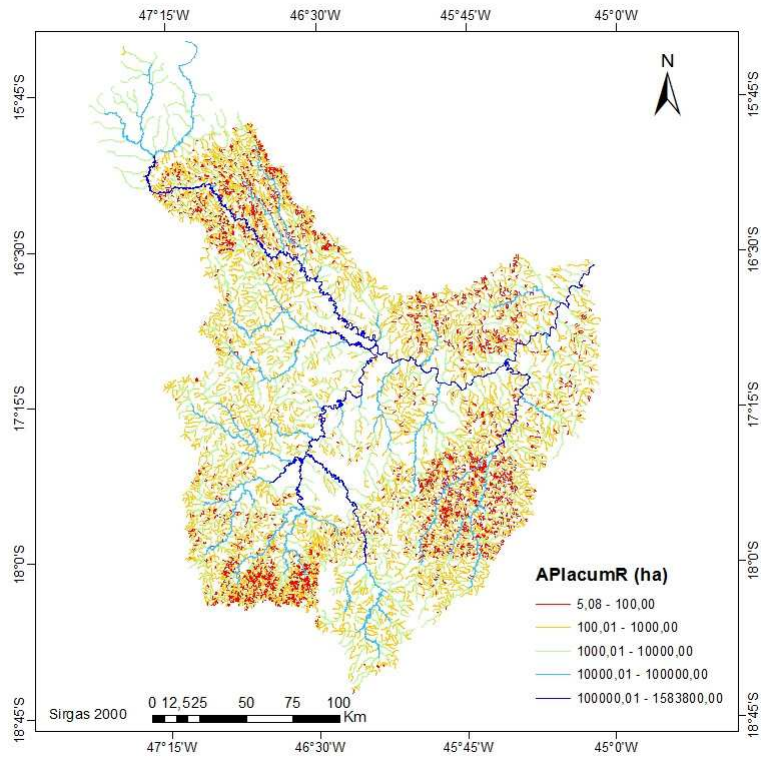
Visto que a consideração da disponibilidade hídrica a fio d'água, representada por 50% da  $Q_{7,10}$  anual, é insuficiente para atender até mesmo as demandas da irrigação na bacia do Rio Paracatu, procedeu-se a análise do quanto seria possível irrigar utilizando a disponibilidade hídrica máxima possível de ser regularizada.

As API's foram estimadas conforme a descrição feita na metodologia e partiu-se do princípio de que a máxima vazão permissível para outorga em condições de regularização ( $Q_{mld} - 50\% Q_{7,10}$  anual) seja destinada para a irrigação, desprezando os demais usos na bacia, sendo, portanto, a disponibilidade hídrica o único fator restritivo para a expansão da agricultura irrigada na bacia.

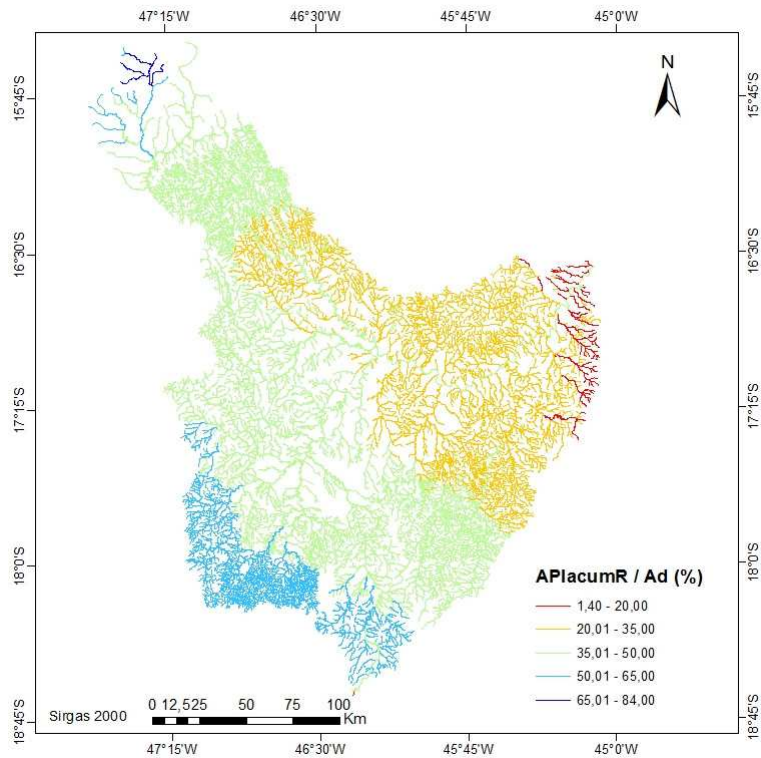
A análise da possibilidade de expansão das áreas irrigadas na bacia do Rio Paracatu, e também nas sub-bacias, foi feita com base nas API's da cana-de-açúcar referentes ao seu período mais crítico, de 9 a 13 de setembro, e no calendário de cultivo de uso mais frequente pelos irrigantes na bacia. Considerou-se, primeiro, que toda a área plantada é ocupada apenas por cana-de-açúcar e, em seguida, a área é ocupada pela cana e pelas demais culturas em rotação simultaneamente.

A Figura 18a apresenta as  $API_{acumR}$  ao longo da hidrografia durante o período mais crítico do ciclo da cana, a qual seria possível irrigar mais de 1,5 milhões de ha na bacia do Rio Paracatu, correspondendo a 35% da área de drenagem da bacia, e cerca de 1200% superior à  $API_{acum}$  estimada para o mesmo período considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água.

Na Figura 18b apresentam-se as relações entre as  $API_{acumR}$  e  $A_d$  de cada trecho da hidrografia. Essas relações variaram, em mais de 95% dos trechos da hidrografia, de 14%, em trechos de cabeceiras localizados próximos à foz, a 65%, nos trechos localizados ao sul da bacia. O comportamento dessas relações está diretamente relacionado à diminuição da  $q_{mld}$  e ao aumento do déficit hídrico ao sul em direção à foz da bacia, indicando que há uma tendência de decréscimo das API's nesse mesmo sentido. Nos trechos localizados no noroeste da bacia, essa relação chegou a 84% devido ao menor déficit hídrico e, conseqüentemente, à possibilidade de irrigar maiores áreas.



(a)



(b)

Figura 18 -  $API_{acumR}$  (a) e a relação entre a  $API_{acumR}$  e  $A_d$  (b) em cada trecho da hidrografia, correspondente ao período de 9 a 13 de setembro, para a bacia do Rio Paracatu.

A disponibilidade hídrica regularizada permite expandir a área estimada ocupada por cana-de-açúcar na bacia em 2015 em até 30 vezes, supondo que toda a  $API_{acumR}$  estimada na foz da bacia seja ocupada apenas por cana. Considerando as demais culturas presentes na bacia, há um potencial de expansão de até 170%, sendo que as necessidades de suplementação hídrica das culturas são supridas com o uso da irrigação plena.

Na Tabela 8 estão apresentadas, para cada sub-bacia, as  $API_{acumR}$ , a relação dessas áreas com as áreas de drenagem, as áreas plantadas de cana-de-açúcar ( $AAP_C$ ), a relação entre as  $API_{acumR}$  e as  $AAP_C$ , as áreas plantadas considerando todas as culturas ( $AAP_T$ ) e a relação entre as  $API_{acumR}$  e as  $AAP_T$ .

Tabela 8 -  $API_{acumR}$ , relação das  $API_{acumR}$  com as áreas de cada sub-bacia,  $AAP_C$ , relação entre as  $API_{acumR}$  e a  $AAP_C$ ,  $AAP_T$  e a relação entre  $API_{acumR}$  e  $AAP_T$  em cada sub-bacia

<b>Sub-bacia</b>	<b><math>API_{acum}</math> (ha)</b>	<b><math>\frac{API_{acumR}}{A_{sub-bacia}}</math> 100 (%)</b>	<b><math>AAP_C</math> (ha)</b>	<b><math>\frac{API_{acumR}}{AAP_C}</math></b>	<b><math>AAP_T</math> (ha)</b>	<b><math>\frac{API_{acumR}}{AAP_T}</math></b>
7481	84861	19,95	177	480,42	6530	13,00
7482	184593	31,87	11580	15,94	20701	8,92
7483	167751	25,91	13008	12,90	19811	8,46
7484	395628	38,98	4155	95,22	248539	1,59
7486	140104	36,54	5661	24,75	94701	1,48
7487	97898	34,99	6206	15,77	41927	2,33
7488	168734	42,61	4191	40,26	35538	4,75
7489	344230	44,56	4446	77,42	116498	2,95

Nas oito sub-bacias analisadas, considerando a disponibilidade hídrica como um fator restritivo e as  $API_{acum}$  para cada uma delas, a consideração da regularização plena na disponibilidade hídrica permite irrigar de 19,95 a 44,56% da área de drenagem de cada uma delas, em que as maiores relações de  $\frac{API_{acumR}}{A_{sub-bacia}}$  foram obtidas nas regiões onde ocorreram as maiores  $q_{mld}$  e os menores déficits hídricos.

O aumento das  $API_{acumR}$  em relação as áreas estimadas em função da disponibilidade hídrica a fio d'água está diretamente relacionado ao aumento da

disponibilidade hídrica, em razão da regularização de vazões, como foi constatado em um estudo realizado na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros (7486). No estudo citado, evidenciou-se que a substituição do critério para condições a fio d'água, que permite outorgar até 50% da  $Q_{7,10}$  anual, pelo critério correspondente as condições de regularização de vazões, que permite outorgar até no máximo a diferença entre a  $Q_{mld}$  e 50% da  $Q_{7,10}$  anual, resultaria em um aumento de 1390 a 1610% na disponibilidade hídrica da sub-bacia (NUNES e PRUSKI, 2015).

De acordo com as relações de  $\frac{API_{acumR}}{AAP_C}$  e de  $\frac{API_{acumR}}{AAP_T}$ , a disponibilidade hídrica máxima possível de ser regularizada é suficiente não só para atender as demandas hídricas de irrigação de todas as áreas plantadas com cana-de-açúcar, como também as áreas plantadas considerando todas as culturas presentes na bacia e, ainda, há potencial de expansão dessas áreas sob condições de irrigação plena. A sub-bacia do Baixo Paracatu (7481) possui os maiores potenciais de expansões das áreas plantadas, tanto de cana-de-açúcar como também das demais culturas, sendo estes potenciais associados às menores  $AAP_C$  e às  $AAP_T$ .

Analisando as possibilidades de expansões das áreas plantadas nas sub-bacias do Rio Paracatu, considerando que as demandas hídricas de todas as culturas sejam supridas pela irrigação plena, é possível expandir as áreas plantadas nessas sub-bacias em no mínimo 48%. As duas sub-bacias com as menores possibilidades de expansões das áreas plantadas são as do Rio Preto (7484) e do ribeirão Entre Ribeiro (7486). Essas duas sub-bacias já possuem altas demandas hídricas para a irrigação devido à existência de grandes áreas plantadas, sendo que no período mais seco do ano de 2014 somente os municípios de Unaí e Paracatu, que são pertencentes a essas duas sub-bacias, possuíam uma área irrigada por pivô central de quase 121.000 ha (ANA, 2016).

Nas demais sub-bacias é possível no mínimo duplicar a  $AAP_T$  devido à maior disponibilidade hídrica, a qual possibilita o suprimento das necessidades de suplementação hídrica das culturas com o uso da irrigação plena em maiores áreas. Dessa forma, evidencia-se que a utilização da regularização de vazões é uma importante ferramenta para a gestão dos recursos hídricos na bacia, uma vez que, além de minimizar os conflitos já existentes entre os usuários de água, possibilita ainda a expansão da agricultura irrigada em toda a bacia.

### 4.1.3 Irrigação com déficit

A fim de potencializar o uso dos recursos hídricos utilizando a disponibilidade hídrica natural, foi simulada a aplicação com déficit para a cultura da cana-de-açúcar.

A aplicação do déficit consistiu na redução do valor da  $E_{t_{pc}}$  com base no estudo desenvolvido por Caixeta (2013) na região do Alto Paranaíba, MG, e, seguindo as recomendações do autor, considerou-se a aplicação mínima de 75%  $E_{t_{pc}}$  na estimativa das demandas hídricas para a irrigação da cana-de-açúcar.

#### 4.1.3.1 Vazão requerida pela irrigação da cana-de-açúcar

As vazões unitárias requeridas médias na irrigação com déficit ( $q_{req-médD}$ ) foram estimadas conforme descrito na metodologia, sendo que, para cada período de cinco dias durante todo o ciclo da cultura, as vazões unitárias para a irrigação da cana-de-açúcar foram estimadas em função da aplicação de 90, 80 ou 75% da  $E_{t_{pc}}$ .

A Figura 19 apresenta um exemplo da aplicação de déficit durante o ciclo da cana em um ponto próximo à foz da bacia e em que os déficits foram definidos da forma descrita a seguir. No período que ocorreu a maior demanda na irrigação plena, de 9 a 13 de setembro, aplicou-se a máxima redução da  $E_{t_{pc}}$  (25%), obteve-se uma  $q_{req-médD}$  para essa nova condição ( $0,28 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ). Caso as  $q_{req-méd}$  dos demais períodos excedessem a vazão calculada com 25% de redução na  $E_{t_{pc}}$  no período mais crítico, então se estimavam as  $q_{req-médD}$  desses períodos considerando os déficits correspondentes às reduções em 10, 20 e 25% da  $E_{t_{pc}}$  nas estimativas das novas vazões para a irrigação, sendo que foi considerada, para cada um desses períodos, a maior vazão entre as três estimadas que não excedesse a vazão recalculada para o período mais crítico.

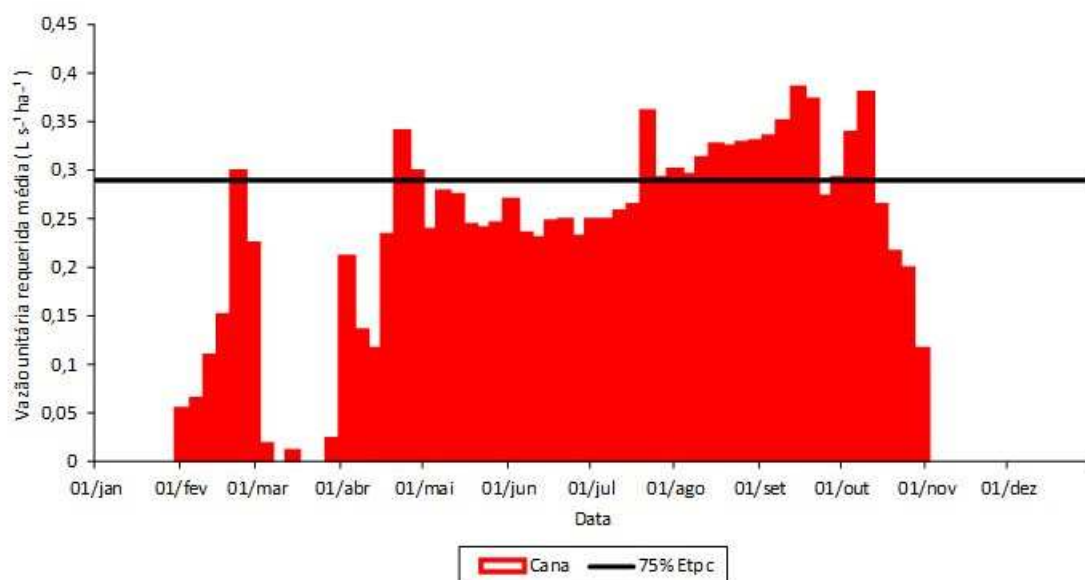
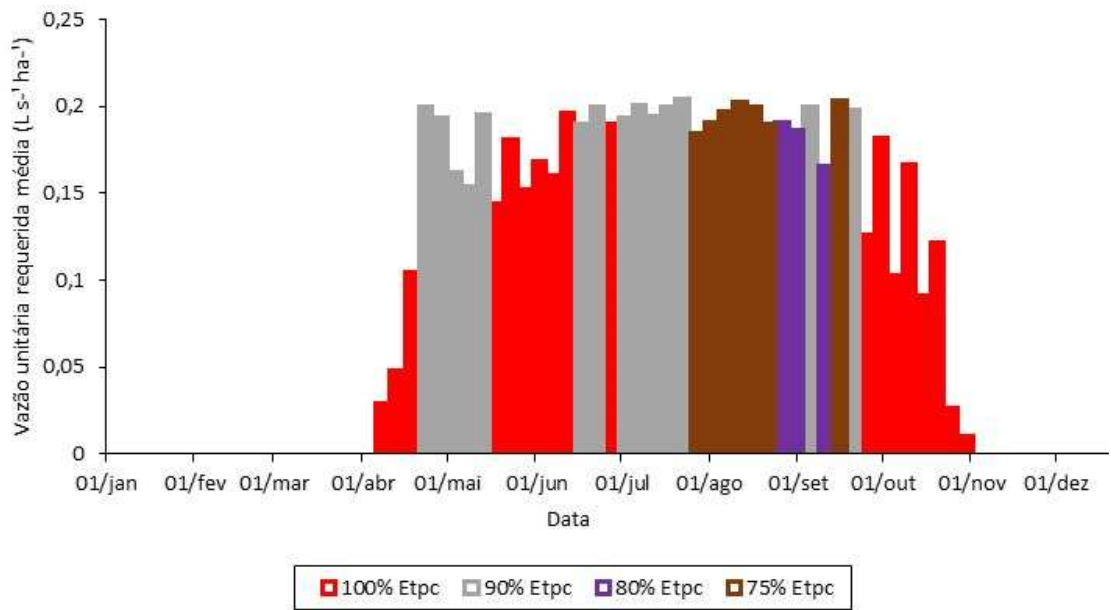


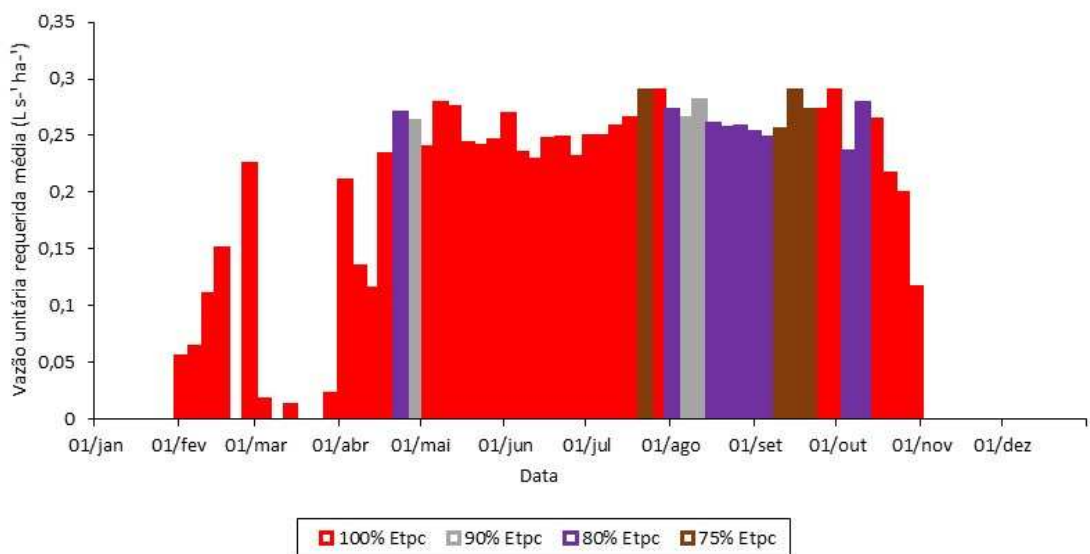
Figura 19 - Vazões unitárias requeridas médias ( $q_{req-méd}$ ) na irrigação plena e a aplicação de 75% da  $E_{tpc}$  no período mais crítico, durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar em um ponto próximo à foz (44,875°W; 16,375°S) da bacia do Rio Paracatu.

A Figura 20 apresenta as  $q_{req-médD}$  estimadas com a aplicação de déficits para os pontos localizados próximos ao sul e à foz da bacia considerando a aplicação de 100% (barras em vermelho), 90% (barras em cinza), 80% (barras em lilás) ou 75% da  $E_{tpc}$  (barras em marrom).

Observa-se que os períodos de ocorrência de déficit hídrico foram distintos nos dois pontos analisados. No sul da bacia as necessidades de suplementação hídrica das culturas ocorrem de abril ao início de novembro e nas proximidades da foz ocorrem demandas para irrigação também nos meses de fevereiro a março, fato este que está associado ao aumento da  $E_{t0}$  que ocorre do sul em direção à foz da bacia durante esses meses. Além disso, também se observa que ao sul da bacia os períodos com aplicação da irrigação com déficits são superiores aos observados nas proximidades da foz, uma vez que, de acordo com a Figura 12a, as variações nas amplitudes das  $q_{req-méd}$  ao longo do ciclo da cultura são inferiores as que ocorrem próximo à foz da bacia (Figura 12b).



(a)



(b)

Figura 20 - Vazões unitárias requeridas médias ( $q_{req-médD}$ ) durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar em pontos localizados ao sul ( $46,125^{\circ}W$ ;  $18,375^{\circ}S$ ) (a) e próximo à foz ( $44,875^{\circ}W$ ;  $16,375^{\circ}S$ ) da bacia do Rio Paracatu (b).

Nota-se também que os períodos mais críticos durante o ciclo da cana-de-açúcar com a aplicação dos déficits máximos, foram distintos nos dois pontos analisados, sendo que ao sul da bacia esse período ocorreu em 14 a 18 de

agosto e com a  $q_{\text{req-médD}}$  na irrigação com déficit estimada em  $0,21 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . Já nas proximidades da foz a  $q_{\text{req-médD}}$  no período mais crítico, 9 a 13 de setembro, foi cerca de 30% superior ao valor estimado no sul da bacia.

A Figura 21 apresenta as  $q_{\text{req-médD}}$  necessárias para a suplementação hídrica da cultura da cana-de-açúcar ao longo de toda a hidrografia durante o período de 9 a 13 de setembro, considerando a redução em 25% da  $E_{\text{t}_{\text{pc}}}$ . As  $q_{\text{req-médD}}$  ao longo de todos os trechos da hidrografia tiveram uma redução média de 22%, comparadas às demandas para a irrigação plena estimadas para o mesmo período.

O comportamento das  $q_{\text{req-médD}}$  ao longo da hidrografia foi reflexo do balanço hídrico na bacia e similar ao que foi discutido para a irrigação plena (item 4.1.2.1). Essas vazões variaram de  $0,19 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , em trechos localizados na parte oeste da bacia, a  $0,28 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  nos trechos próximos à foz do Rio Paracatu.

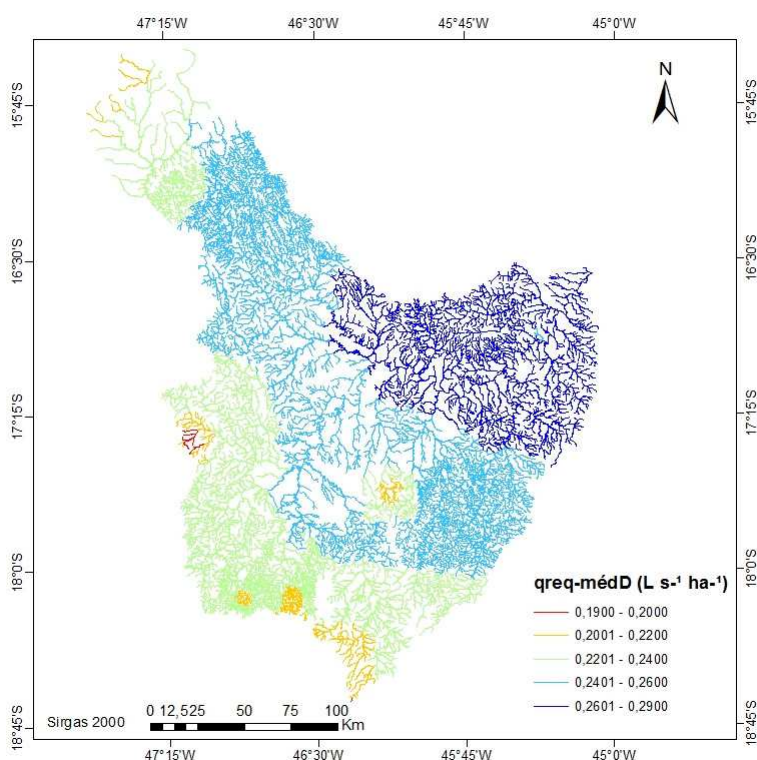


Figura 21 - Vazões unitárias médias requeridas ( $q_{\text{req-médD}}$ ) com aplicação de 75% da  $E_{\text{t}_{\text{pc}}}$ , em cada trecho da hidrografia, correspondentes ao período de 9 a 13 de setembro, para a bacia do Rio Paracatu.

#### **4.1.3.2 Análise das áreas potencialmente irrigáveis para a cana-de-açúcar considerando a disponibilidade hídrica a fio d'água**

A análise das API's foi feita individualmente para cada trecho da hidrografia, sendo estimadas em função da  $q_{\text{req-médD}}$  e da vazão a fio d'água disponível para outorga, representada por 50% da  $Q_{7,10}$  anual.

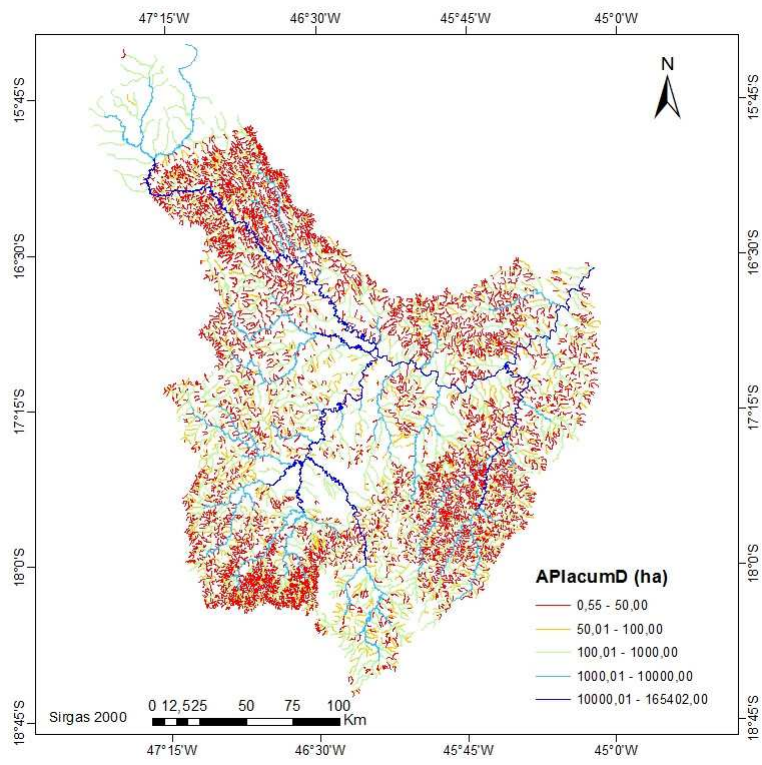
A seguir são apresentados e discutidos os resultados referentes ao período mais crítico durante todo o ciclo da cultura da cana, que é de 9 a 13 de setembro, por ter sido o período com a maior redução na  $E_{t_{pc}}$ . Para esse período, a análise da possibilidade de expansão das áreas irrigadas na bacia do Rio Paracatu é feita considerando que toda a área plantada é ocupada apenas por cana-de-açúcar e, posteriormente, a análise é feita baseada no calendário de cultivo mais frequente.

##### **4.1.3.2.1 Expansão das áreas com cana-de-açúcar**

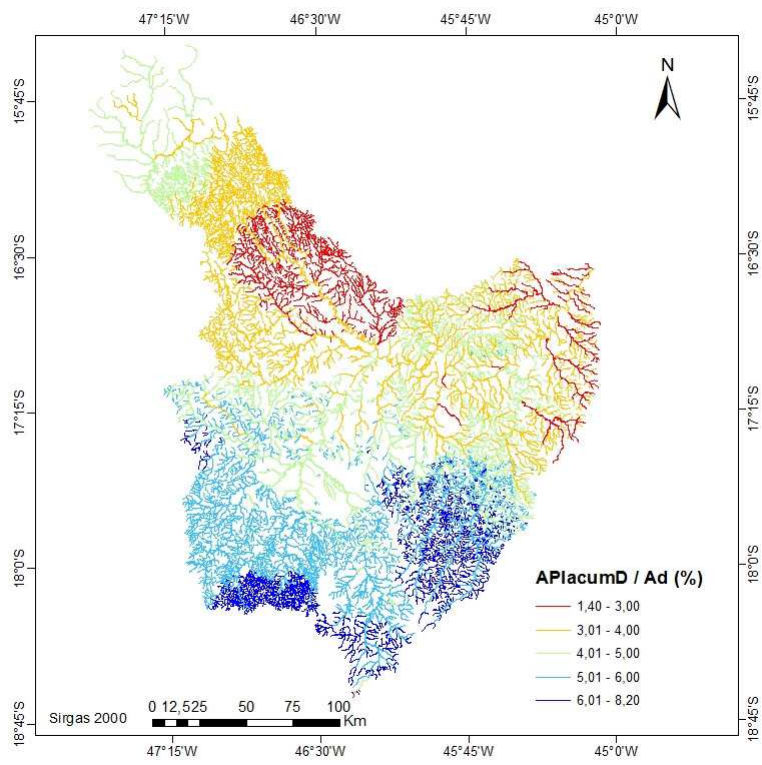
Na análise da possibilidade de expansão das áreas plantadas com cana-de-açúcar, utilizando a irrigação com déficit, assim como na irrigação plena, também se considerou que toda a disponibilidade hídrica a fio d'água permissível para outorga (50% da  $Q_{7,10}$  anual) destina-se apenas para a irrigação da cana-de-açúcar.

Durante o período de 9 a 13 de setembro a API, considerando a aplicação de 75% da  $E_{t_{pc}}$  ( $API_{\text{acumD}}$ ) na foz da bacia, foi estimada em aproximadamente 165.402 ha (Figura 22a), representando um aumento de 37% em relação à  $API_{\text{acum}}$  obtida com a irrigação plena, e equivalendo, portanto, a 3,6% da área de drenagem da bacia do Rio Paracatu.

A aplicação da redução máxima na estimativa das demandas para a irrigação faz com que as relações entre as  $API_{\text{acumD}}$  e as  $A_d$  ao longo da hidrografia (Figura 22b) variem de 2,3 a 8,2%. O comportamento dessas relações indica que há uma tendência de decréscimo das API's estimadas nos trechos localizados na parte sul em direção aos trechos localizados próximos à foz da bacia, comportamento este associado à diminuição da  $q_{7,10}$  e ao aumento do déficit hídrico nesse mesmo sentido.



(a)



(b)

Figura 22 -  $API_{acumD}$  (a) e a relação entre a  $API_{acumD}$  e  $A_d$  (b) em cada trecho da hidrografia correspondente ao período de 9 a 13 de setembro, da bacia do Rio Paracatu.

A utilização da disponibilidade hídrica a fio d'água associada ao uso da irrigação com déficit possibilita suprir os mais de 50.000 ha de cana existentes estimados na bacia e, ainda, há potencial para expandi-la em aproximadamente 230%, porém essa expansão não ocorre uniformemente nas oito sub-bacias integrantes da bacia do Rio Paracatu.

Na Tabela 9 são apresentadas, para cada sub-bacia, as  $API_{acumD}$ , a relação dessas áreas com as áreas de drenagem, as áreas plantadas de cana-de-açúcar ( $AAP_C$ ) e a relação entre as  $API_{acumD}$  e as  $AAP_C$ .

Tabela 9 -  $API_{acumD}$ , relação das  $API_{acumD}$  com as áreas de cada sub-bacia,  $AAP_C$  e a relação entre as  $API_{acumD}$  e a  $AAP_C$  em cada sub-bacia

<b>Sub-bacia</b>	<b><math>API_{acumD}</math> (ha)</b>	<b><math>\frac{API_{acumD}}{A_{sub-bacia}} 100</math> (%)</b>	<b><math>AAP_C</math> (ha)</b>	<b><math>\frac{API_{acumD}}{AAP_{cana}}</math></b>
<b>7481</b>	10926	2,57	177	61,85
<b>7482</b>	24592	4,25	11580	2,12
<b>7483</b>	20656	3,19	13008	1,59
<b>7484</b>	33987	3,35	4155	8,18
<b>7486</b>	12554	3,27	5661	2,22
<b>7487</b>	9760	3,49	6206	1,57
<b>7488</b>	17287	4,37	4191	4,12
<b>7489</b>	35642	4,61	4446	8,02

De acordo com as  $API_{acumD}$  estimadas, nas oito sub-bacias é possível irrigar de 2,57 a 4,61% das áreas de drenagens de cada uma delas, considerando a disponibilidade hídrica como um fator restritivo, sendo as maiores relações de  $\frac{API_{acumD}}{A_{sub-bacia}}$  obtidas nas sub-bacias que estão localizadas em áreas com as maiores disponibilidades hídricas e os menores déficits hídricos.

Segundo as relações  $\frac{API_{acumD}}{AAP_C}$ , a disponibilidade hídrica é suficiente para atender as demandas da irrigação das  $AAP_C$  em todas as sub-bacias, possibilitando, ainda, a expansão dessas áreas. Dentre as oito sub-bacias analisadas, as com menores potenciais para a expansão da cultura da cana são as do Médio-Baixo Paracatu (7483) e do Médio Paracatu (7487), nas quais haveria uma possibilidade de expansão das áreas já existentes de no máximo 60% devido à alta proporção de  $AAP_C$  já existente. Nas demais sub-bacias,

evidencia-se que há uma grande disponibilidade hídrica para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar sob condições de irrigação e seria possível, pelo menos, duplicar as áreas cultivadas com cana com o uso da irrigação com déficit.

#### **4.1.3.2.2 Calendário de cultivo de uso mais frequente**

Na condição relativa ao calendário de uso mais frequente utilizado pelos irrigantes, correspondente ao plano de rotação entre as culturas do milho e do feijão / soja (Figura 7), os déficits hídricos das culturas em rotação sob condição de irrigação plena foram sobrepostos com os períodos que há necessidade de suplementação hídrica da cana-de-açúcar. Dessa forma, fez-se a média entre as vazões unitárias estimadas por Silva (2014) para a irrigação das culturas do milho e do feijão, e as  $q_{\text{req-médD}}$  estimadas neste trabalho para a cana sob condições de irrigação com déficit, obtendo-se, assim, as vazões unitárias médias.

A Figura 23 apresenta as vazões unitárias médias correspondentes as demandas hídricas para a irrigação da cana-de-açúcar e do milho, ou do feijão, considerando que cada cultura ocupe metade da área plantada, e a vazão unitária média obtida após a aplicação da redução em 25% da  $E_{t_{pc}}$  na estimativa da demanda da cana, no período de 21 a 25 de abril (linha preta) em um ponto próximo à foz da bacia.

Notou-se que quando há a necessidade de suplementação hídrica das culturas em rotação e da cana simultaneamente, o período mais crítico da cana-de-açúcar deixa de ocorrer em setembro, como foi na irrigação plena, e passa a ocorrer no período de 21 a 25 de abril. Dessa forma, a aplicação do déficit hídrico máximo (75% da  $E_{t_{pc}}$ ) na estimativa da demanda para irrigação ocorreu primeiramente no período de 21 a 25 de abril, obtendo-se uma  $q_{\text{req-médD}}$  próxima à foz da bacia do Rio Paracatu igual a  $0,26 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  e, conseqüentemente, uma vazão unitária média igual a  $0,32 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ .

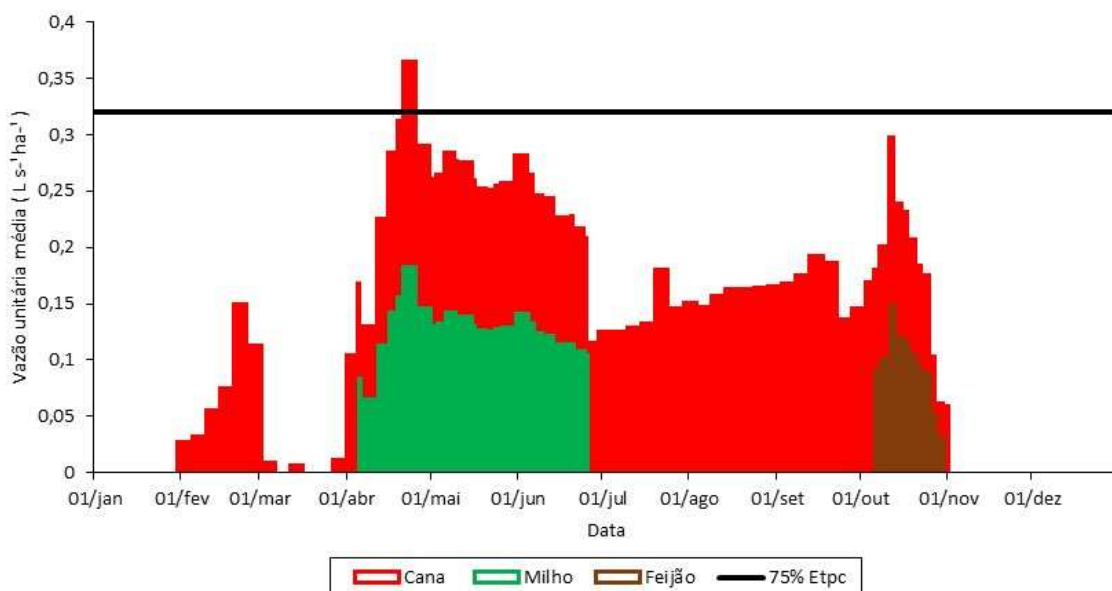


Figura 23 - Vazões unitárias médias entre as culturas em rotação e a cana e a aplicação de 75% da  $E_{tpc}$  na estimativa da vazão da cana no período de 21 a 25 de abril em um ponto próximo à foz ( $44,875^{\circ}W$ ;  $16,375^{\circ}S$ ) da bacia do Rio Paracatu.

Considerando que 50% da área plantada é ocupada por cana-de-açúcar e 50% pelas culturas em rotação, nos períodos em que há apenas a necessidade de suplementação hídrica da cana, não foi necessária a aplicação da irrigação com déficit na cultura, uma vez que as vazões unitárias médias referentes a esses períodos são inferiores à vazão unitária média estimada no período mais crítico da cana na irrigação com déficit, como observado na Figura 23. Nos períodos em que ocorreram demandas hídricas para a irrigação da cana e das culturas em rotação ao mesmo tempo, houve necessidade da redução da  $E_{tpc}$  nas estimativas das  $q_{req-médD}$  apenas no período mais crítico (21 a 25 de abril), uma vez que nos demais períodos as vazões unitárias médias foram inferiores à vazão no período mais crítico.

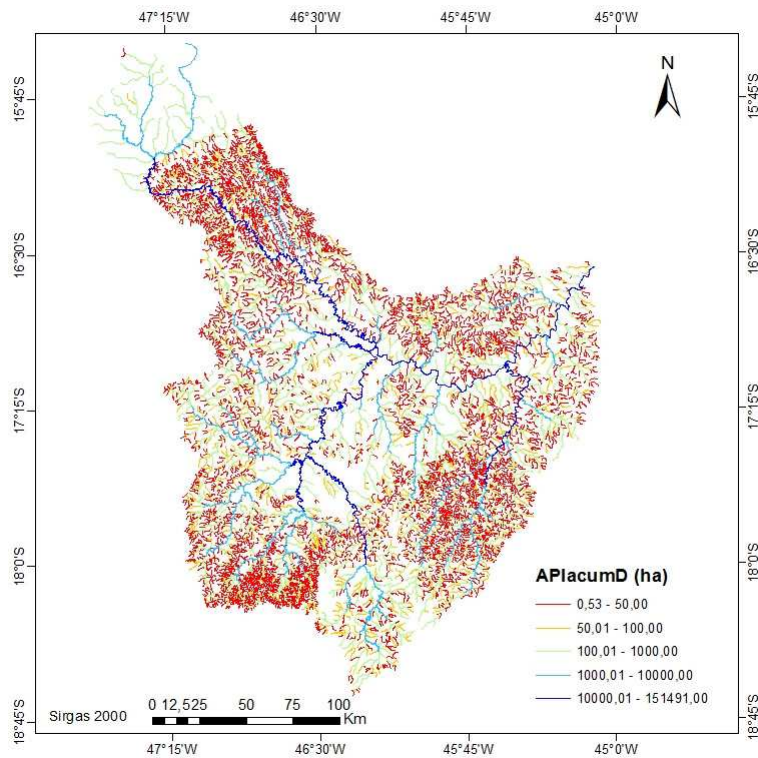
Nas análises feitas a seguir, sobre a potencialidade de expansão das áreas irrigadas sob condições de irrigação com déficit na bacia do Rio Paracatu, e também nas suas sub-bacias, considerando que metade da área é ocupada por cana-de-açúcar e a outra metade ocupada pelas demais culturas em rotação, foram consideradas as  $q_{req-médD}$  referentes ao período de 21 a 25 de abril.

Com base nas vazões unitárias médias estimadas no período mais crítico e considerando que toda a disponibilidade hídrica a fio d'água, representada por

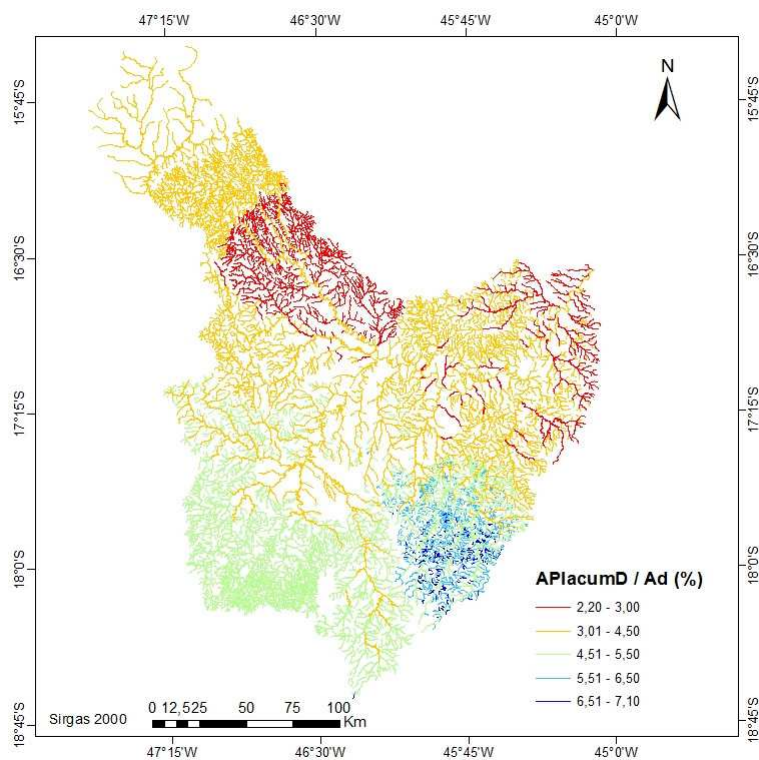
50% da  $Q_{7,10}$  anual, é destinada apenas à irrigação das culturas presentes na bacia, procedeu-se com a análise da possibilidade de expansão das áreas plantadas na bacia e, posteriormente, nas sub-bacias do Rio Paracatu.

Durante o período de 21 a 25 de abril a  $API_{acumD}$  na foz da bacia foi estimada em 151.491 ha (Figura 24a), representando um aumento de 19% em relação à  $API_{acum}$  obtida para o mesmo período com a irrigação plena, e equivalendo, portanto, a 3,4% da área de drenagem da bacia do Rio Paracatu.

A Figura 24b apresenta as relações entre a  $API_{acumD}$  e as  $A_d$  ao longo da hidrografia, as quais variam de 2,2 a 7,1%, sendo que as maiores relações foram evidenciadas no sul e noroeste da bacia e apresentaram uma tendência de decréscimo em direção à foz, seguindo o mesmo comportamento da  $q_{7,10}$  e do déficit hídrico na bacia.



(a)



(b)

Figura 24 -  $API_{acumD}$  (a) e a relação entre a  $API_{acumD}$  e  $A_d$  (b) em cada trecho da hidrografia correspondente ao período de 21 a 25 de abril, da bacia do Rio Paracatu.

A Tabela 10 apresenta, para cada sub-bacia, as  $API_{acumD}$ , a relação dessas áreas com as áreas de drenagem, as áreas plantadas considerando todas as culturas ( $AAP_T$ ) e a relação entre as  $API_{acumD}$  e as  $AAP_T$ .

Nas oito sub-bacias analisadas, o uso da irrigação com déficit, com redução em 25% na  $Et_{pc}$ , possibilita irrigar de 2,37 a 4,02% das áreas de drenagem de cada uma das sub-bacias, sendo que as maiores porcentagens estão relacionadas aos locais com maiores disponibilidades hídricas e com menores déficits hídricos.

A máxima disponibilidade hídrica a fio d'água permissível para outorga, associada à irrigação com déficit, permite suprir as demandas hídricas para a irrigação em todas as áreas plantadas nas sub-bacias do Baixo Paracatu (7481) e do Rio do Sono (7482), as quais possuem um potencial mínimo de expansão de 8%. Este potencial de expansão está associado às menores áreas plantadas nessas sub-bacias. Nas demais sub-bacias a disponibilidade hídrica representada por 50% da  $Q_{7,10}$  anual é insuficiente para atender as demandas

hídricas das áreas plantadas já existentes. Nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros (7486) e do Rio Preto (7484) possuem a situação mais crítica em função das altas demandas hídricas para a irrigação das áreas plantadas já existentes.

Tabela 10 -  $API_{acumD}$ , relação das  $API_{acumD}$  com as áreas de cada sub-bacia,  $AAP_T$  e a relação entre as  $API_{acumD}$  e a  $AAP_T$  em cada sub-bacia

<b>Sub-bacia</b>	<b><math>API_{acumD}</math> (ha)</b>	$\frac{API_{acumD}}{A_{sub-bacia}} \cdot 100$ (%)	<b><math>AAP_T</math> (ha)</b>	$\frac{API_{acumD}}{AAP_T}$
<b>7481</b>	10084	2,37	6530	1,54
<b>7482</b>	22291	3,85	20701	1,08
<b>7483</b>	18770	2,90	19811	0,95
<b>7484</b>	33017	3,25	248539	0,15
<b>7486</b>	12020	3,14	94701	0,13
<b>7487</b>	9199	3,29	41927	0,22
<b>7488</b>	15034	3,80	35538	0,42
<b>7489</b>	31076	4,02	116498	0,27

Dessa forma, nota-se que apenas o uso da irrigação com déficit não é suficiente para atender as demandas hídricas pela irrigação das áreas já existentes em seis sub-bacias do Rio Paracatu. Entretanto, o fato do período crítico para a cana-de-açúcar, associada às culturas em rotação, ocorrer em um período com maior disponibilidade hídrica a fio d'água, permite que com a adoção de um manejo adequado dos recursos hídricos, através da adoção das disponibilidades hídricas sazonais, seja possível contornar os impactos advindos do aumento das demandas pela irrigação e, também, pelos demais segmentos usuários.

#### **4.2 Sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros**

As análises da potencialidade de expansão das áreas irrigadas na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros foram feitas com base nas  $API$ 's estimadas considerando apenas as condições de irrigação plena e as disponibilidades hídricas a fio d'água, em bases mensal e anual, e para quatro condições: a) cultivo exclusivo da cana-de-açúcar, b) calendário de cultivo mais frequente

utilizado pelos irrigantes, c) calendário de cultivo mais crítico em relação à demanda de água e d) potencialidade de uso de outros calendários de cultivo.

#### 4.2.1 Cultivo exclusivo da cana-de-açúcar

No cultivo exclusivo da cana-de-açúcar considerou-se que todas as disponibilidades hídricas permissíveis para outorga em bases anual e mensal são destinadas apenas para a irrigação da cana, desprezando as demandas das demais culturas e dos outros segmentos usuários de água.

As vazões unitárias requeridas médias ( $q_{\text{req-méd}}$ ) para a irrigação da cana-de-açúcar na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros foram obtidas no item 4.1.2.1 e selecionaram-se apenas os trechos da hidrografia correspondentes a esta sub-bacia. Já as disponibilidades hídricas mensais e anual foram obtidas pela espacialização das vazões com o uso das equações de regionalização de vazão disponíveis na Tabela 2.

Na Figura 25 são apresentadas as  $q_{\text{req-méd}}$  estimadas durante todo o ciclo da cana-de-açúcar para um ponto localizado próximo à foz da sub-bacia, em que as  $q_{\text{req-méd}}$  representam as médias das  $q_{\text{req}}$  correspondentes aos sete meses de plantio, com as áreas plantadas distribuídas equanimemente ao longo desses meses, e as disponibilidades hídricas naturais mensais e anual permissíveis para outorga na foz do ribeirão Entre Ribeiros.

Nota-se que nas proximidades da foz da sub-bacia não há necessidade de suplementação hídrica da cana-de-açúcar durante o mês de janeiro, início de março, em quase todo o mês de novembro e no mês de dezembro. Nos demais meses as demandas hídricas para a irrigação oscilaram entre 0,01 a  $0,36 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ , sendo que a máxima vazão ocorreu no período de 9 a 13 de setembro da mesma forma como foi evidenciado para a foz da bacia do Rio Paracatu.

A substituição da  $Q_{7,10}$  anual pelas  $Q_{7,10}$  mensais na foz da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros, considerando os resultados obtidos por Oliveira et al. (2013), possibilita em aumento de, no mínimo, 158% na disponibilidade hídrica dos meses de janeiro a abril. A partir do mês de maio até outubro nota-se um decaimento constante nos incrementos das vazões mensais em relação à vazão anual. No mês de outubro ocorre o menor incremento na vazão mensal em relação à anual, sendo no máximo de 5,9% e, portanto, este é o mês mais crítico

em termos de disponibilidade hídrica. Já nos últimos dois meses há um aumento nas vazões mensais da ordem de 36% em novembro e de aproximadamente 100% em dezembro. No mês de setembro, em que ocorreu a máxima demanda hídrica para a irrigação da cana-de-açúcar, há um incremento na disponibilidade hídrica mensal, da ordem de 19% quando comparada com a vazão anual.

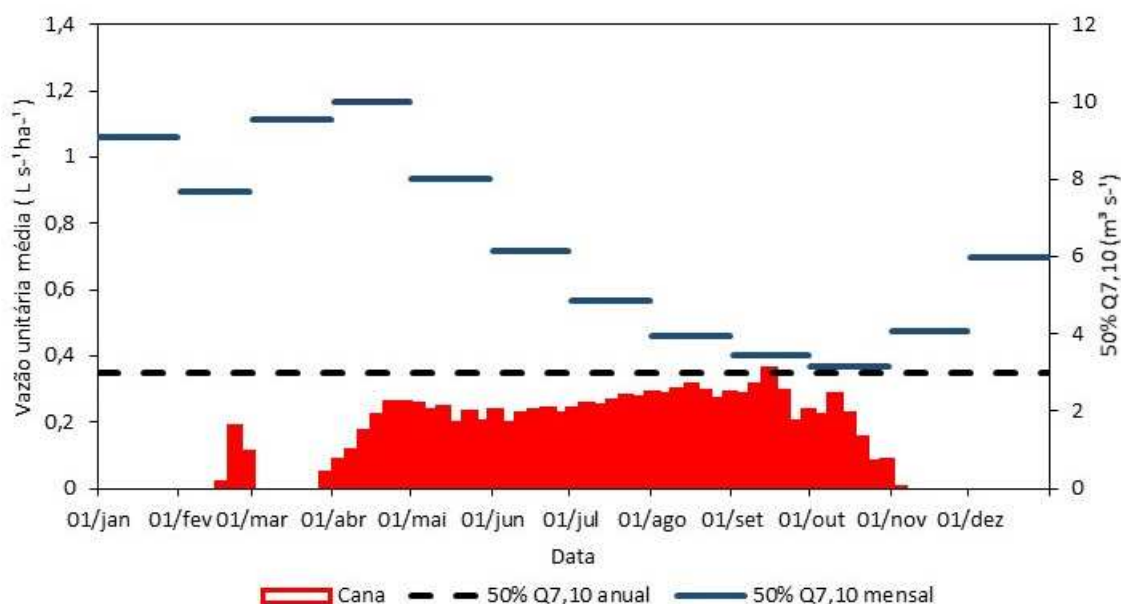


Figura 25 - Vazões unitárias requeridas médias ( $q_{req-méd}$ ) durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar em um ponto localizado próximo à foz ( $46,375^{\circ}W;16,875^{\circ}S$ ), e disponibilidades hídricas para concessão de outorga em base anual e mensal na foz da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Analisando toda a área da sub-bacia, constatou-se que as máximas  $q_{req-med}$ , durante todo o ciclo da cana-de-açúcar, ocorreram durante o período de 9 a 13 de setembro, assim como ocorreu na bacia do Rio Paracatu (Figura 13), sendo que as  $q_{req-méd}$  variaram de 0,32 a 0,36  $L s^{-1} ha^{-1}$  nos trechos localizados ao sul e na foz da sub-bacia, respectivamente. A variação das  $q_{req-méd}$  ao longo da hidrografia está associada ao comportamento do balanço hídrico ao longo da sub-bacia, o qual apresenta um aumento dos déficits hídricos do sul em direção à foz do ribeirão Entre Ribeiros.

Com base nas demandas hídricas para a irrigação da cana em seu período mais crítico, a  $API_{acum}$  foi estimada em 9.264 ha, considerando o critério vigente na legislação mineira para a concessão de outorgas (50% da  $Q_{7,10}$  anual), o que

equivale a 2,4% da área de drenagem do ribeirão Entre Ribeiros. Além disso, possibilita a expansão em 64% da área plantada com cana existente em 2015 na sub-bacia (IBGE, 2015). Considerando a disponibilidade hídrica mensal (50% da  $Q_{7,10}$  do mês de setembro), a  $API_{acum}$  estimada para a foz da sub-bacia foi igual de 10.905 ha, representando um aumento de aproximadamente 17% na  $API$  estimada quando considerado o critério vigente na legislação.

Na Figura 26 são apresentadas a diferença relativa ( $\Delta API_{A-M}$ ) entre as  $API_{acum}$  obtida com a vazão mensal ( $API_{acum}$  mensal) e as  $API_{acum}$  obtida com a vazão anual ( $API_{acum}$  anual) em todos os trechos da hidrografia do Entre Ribeiros. Nota-se que as  $\Delta API_{A-M}$  não tiveram grandes variações ao longo da hidrografia e estiveram entre 17,7 e 18,8%, sendo que essa  $\Delta API_{A-M}$  está diretamente relacionada ao aumento da disponibilidade hídrica quando considerada a vazão em base mensal, sendo as maiores relações evidenciadas no sul da sub-bacia, com pequenas reduções no sentido da foz.

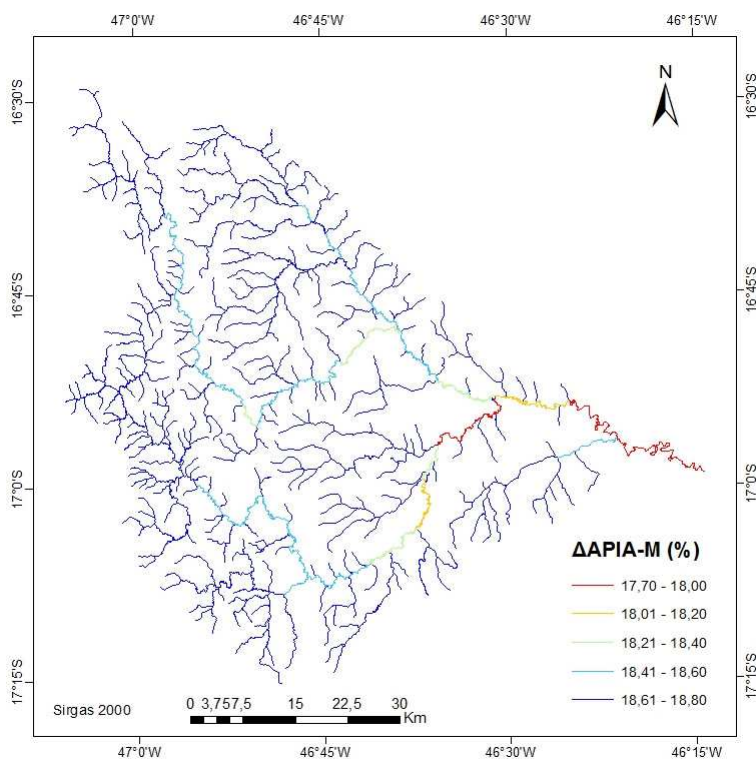


Figura 26 - Diferença relativa ( $\Delta API_{A-M}$ ) entre as  $API_{acum}$  mensal, referente ao mês de setembro, e  $API_{acum}$  anual em cada trecho da hidrografia da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

#### 4.2.2 Calendário de cultivo de uso mais frequente

A condição relativa ao calendário de uso mais frequente utilizado atualmente pelos irrigantes na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros, segundo a AAPER, corresponde ao plano de rotação no qual a semeadura do milho ocorre no início de fevereiro e a do feijão / soja no início de outubro.

De forma semelhante à análise realizada para a bacia do Rio Paracatu, os períodos de ocorrência de déficits hídricos para as culturas em rotação foram sobrepostos com os períodos com necessidade de suplementação hídrica da cana-de-açúcar. Fez-se a média entre as vazões unitárias requeridas para as culturas em rotação, que foram estimadas por Silva (2014) (Figura 8), e as  $q_{req-méd}$  estimadas neste trabalho para a cana, resultando nas vazões unitárias médias.

A Figura 27 apresenta as vazões unitárias médias para um ponto próximo à foz do ribeirão Entre Ribeiros, sendo estas correspondentes às demandas relativas à média das culturas da cana e do milho, ou do feijão, considerando que metade da área é ocupada pela cana e a outra metade ocupada pelas culturas em rotação, e apresenta também as disponibilidades hídricas permissíveis para outorga em bases mensal e anual.

Para os períodos em que ocorrem demandas hídricas para a irrigação tanto das culturas em rotação quanto da cana simultaneamente, considerando que 50% da área é ocupada pelas culturas em rotação e os outros 50% pela cana-de-açúcar, evidenciou-se que o período mais crítico, em termos de demandas hídricas para a irrigação, deixou de ocorrer no mês de setembro e passou a ocorrer no período de 21 a 25 de abril, sendo que a máxima vazão unitária média para as culturas do milho e da cana foi estimada em  $0,33 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ .

A mudança do período mais crítico do mês de setembro para o mês de abril foi decorrente do aumento da demanda hídrica para a irrigação da cana e do milho, tendo em vista apenas a disponibilidade hídrica em base anual. Entretanto, quando as vazões mínimas em base mensal passam a ser consideradas, o mês de abril deixa de ser o mais restritivo para a ampliação da área irrigada, à medida que nesse mês tem-se um aumento de disponibilidade de 165% em relação à disponibilidade hídrica anual. Com isso, o mês mais restritivo passa a ser o mês de outubro, no qual existe a necessidade de suprimento simultâneo das demandas da cana e do feijão, da ordem de  $0,25 \text{ L}$

$s^{-1} ha^{-1}$ , e o aumento da vazão em base mensal ao longo da hidrografia da sub-bacia é de 2,2 a 5,9%, em relação à anual (OLIVEIRA et al., 2013).

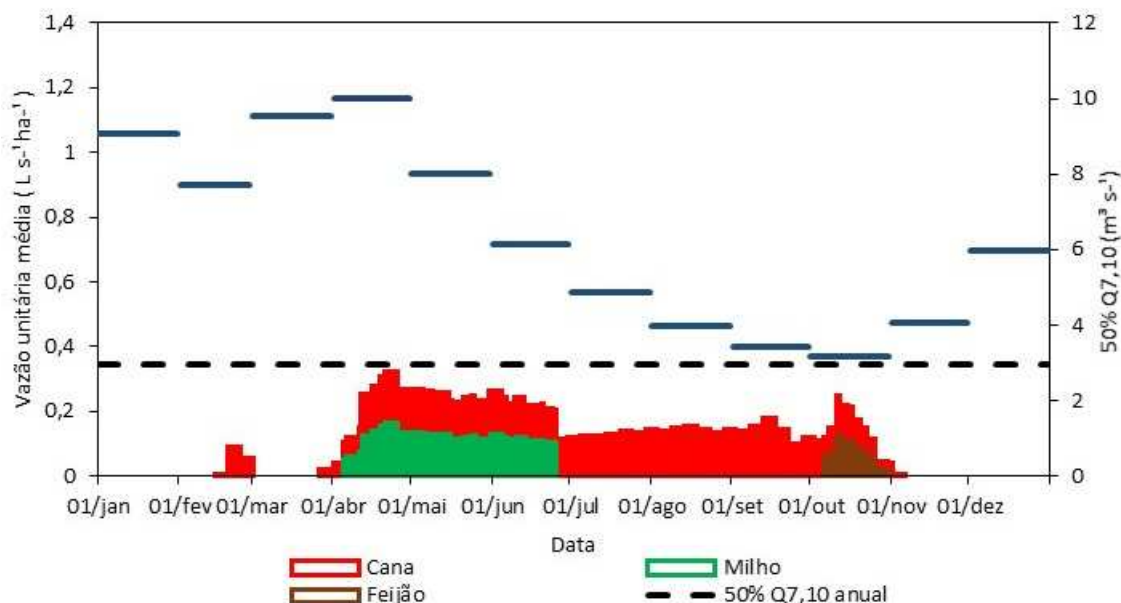


Figura 27 - Vazões unitárias médias entre as culturas em rotação e a cana para um ponto próximo à foz (46,375°W;16,875°S), e disponibilidades hídricas para concessão de outorga em base anual e mensal na foz da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Considerando as vazões unitárias médias durante o período de 8 a 12 de outubro em toda a sub-bacia e a disponibilidade hídrica em base mensal referente ao mês de outubro, a  $API_{acum}$  estimada na foz do ribeirão Entre Ribeiros foi de 14.668 ha, tendo um aumento de 42% em relação à API estimada no período de 21 a 25 de abril, com base na vazão anual, sendo que 2,2% desse aumento está atribuído ao incremento na vazão no mês de outubro e 39,8% atribuído à redução das vazões unitárias médias.

De acordo com a AAPER, a área irrigada em toda a sub-bacia no ano de 2014 era de 21.298 ha e, portanto, com base na  $API_{acum}$  estimada em outubro, considerando a vazão em base mensal, seria possível suprir cerca de 70% da área irrigada.

### 4.2.3 Calendário de cultivo de uso mais crítico

O calendário de cultivo mais crítico, em termos de demanda hídrica para a irrigação, corresponde ao plano de rotação em que a semeadura do milho ocorre no início de maio e a do feijão / soja no início de janeiro.

De forma semelhante ao calendário de cultivo de uso mais frequente, fez-se a sobreposição dos períodos com demandas hídricas para a irrigação das culturas em rotação, que foram estimadas por Silva (2014) (Figura 8), com os períodos que ocorreram demandas para a suplementação hídrica da cana-de-açúcar, as quais foram estimadas neste trabalho, resultando nas vazões unitárias médias.

A Figura 28 apresenta as vazões unitárias médias entre as culturas da cana-de-açúcar e do milho, considerando que 50% da área plantada seja ocupada apenas por cana e os outros 50% pelas culturas em rotação. Também são apresentadas as disponibilidades hídricas permissíveis para outorga em base mensal e anual.

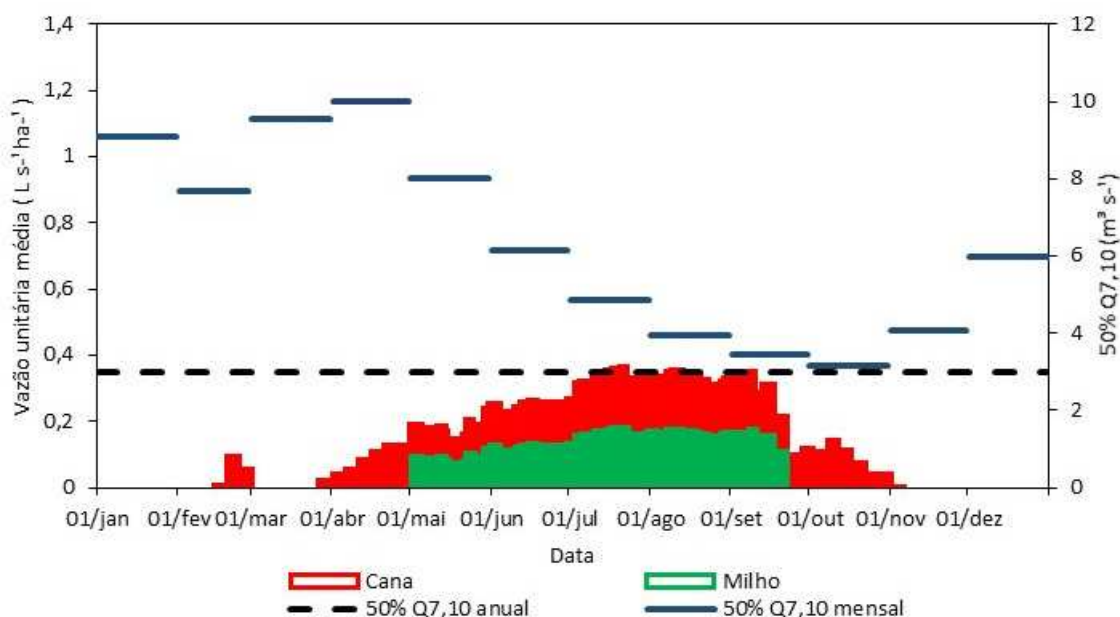


Figura 28 - Vazões unitárias médias entre as culturas em rotação e a cana para um ponto próximo à foz (46,375°W;16,875°S), e disponibilidades hídricas para concessão de outorga em base anual e mensal na foz da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Observa-se que, durante todo o ciclo da cultura do milho, há a necessidade de suplementação hídrica nos mesmos períodos em que ocorrem os déficits hídricos da cana-de-açúcar, sendo que a máxima vazão unitária média ocorreu no período de 20 a 24 de julho, igual a  $0,36 \text{ L s}^{-1} \text{ h}^{-1}$ . Sob a ótica da disponibilidade hídrica em base anual, esse seria o período mais crítico e restritivo para a expansão das áreas irrigadas. Entretanto, quando são consideradas as vazões em base mensal, o mês de julho deixa de ser o mais restritivo, uma vez que há um aumento na vazão mensal ao longo da hidrografia da sub-bacia, de 48 a 63% em relação à anual (OLIVEIRA et al., 2013). Dessa forma, para o calendário de cultivo mais crítico, o período mais restritivo para a expansão das áreas irrigadas passa a ser no mês de setembro.

Com base nas vazões unitárias médias do período de 9 a 13 de setembro, a  $API_{acum}$  obtida em função da disponibilidade hídrica em base mensal foi de 12.134 ha, sendo 30% superior à  $API_{acum}$  estimada com a vazão em base anual no período de 20 a 24 de julho, sendo que 18% desse aumento ocorreu em razão da disponibilidade hídrica no mês de setembro e 12% está relacionado à redução da vazão unitária média.

Sendo assim, para este calendário de cultivo, a disponibilidade hídrica em base mensal referente ao mês de setembro, de acordo com a  $API_{acum}$  estimada para o período considerado o mais crítico, atende a cerca de 60% da área irrigada em 2014, sendo, portanto, insuficiente para suprir todas as demandas hídricas para a irrigação na sub-bacia.

#### **4.2.4 Potencialidade de uso de outros calendários cultivo**

A análise da potencialidade de expansão das áreas irrigadas na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros também foi feita considerando um outro calendário de cultivo estudado por Silva (2014), o qual corresponde à semeadura do milho no início de março e a do feijão / soja no início do mês de novembro.

Assim como nos dois calendários de cultivo analisados anteriormente, as vazões unitárias médias foram obtidas da média entre as demandas hídricas estimadas por Silva (2014) para a irrigação das culturas em rotação e as demandas para a suplementação hídrica da cana-de-açúcar estimadas neste trabalho.

Na Figura 29 são apresentadas as demandas relativas à média das culturas da cana e do milho, considerando que as culturas em rotação ocupem metade da área plantada e a outra metade seja ocupada pela cana. Além disso, também são apresentadas as disponibilidades hídricas permissíveis para outorga em base mensal e anual.

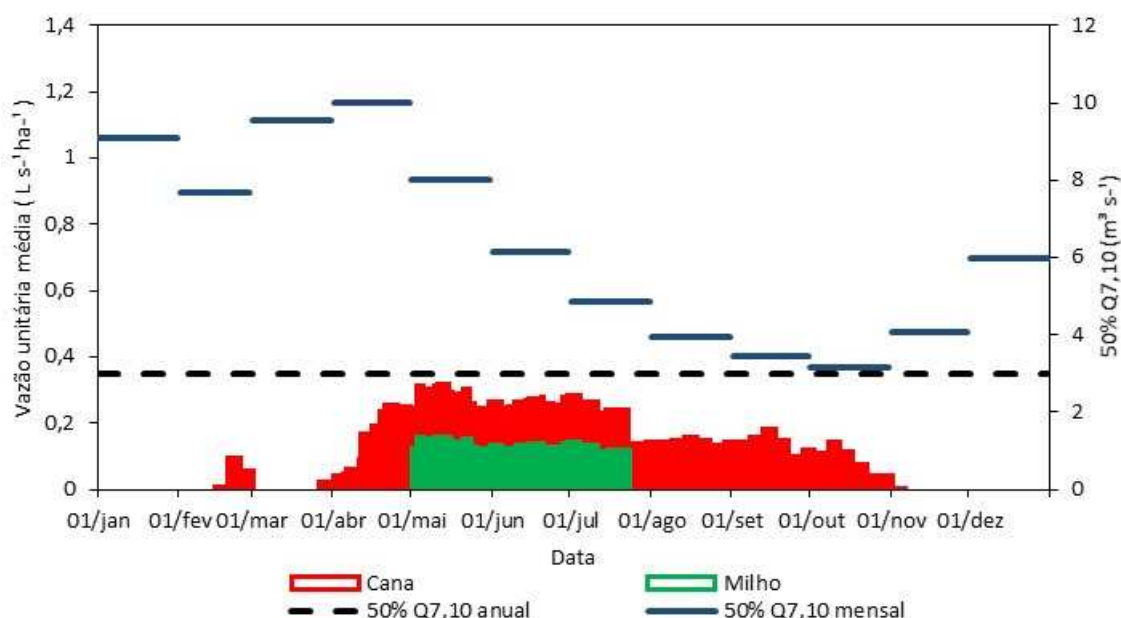


Figura 29 - Vazões unitárias médias entre as culturas em rotação e a cana para um ponto próximo à foz (46,375°W;16,875°S), e disponibilidades hídricas para concessão de outorga em base anual e mensal na foz da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Para este calendário de cultivo, as datas de semeaduras, referente ao plano de rotação entre as culturas do milho e do feijão / soja, foram atrasadas em um mês em relação ao calendário de cultivo de uso mais frequente (item 4.3.2). Dessa forma, para a cultura do feijão, ou da soja, não houve necessidade de suplementação hídrica em todo o ciclo da cultura. Já para a cultura do milho, há demandas hídricas para a irrigação no período correspondente ao mês de maio até o final de julho.

Durante os períodos com necessidades de suplementações hídrica da cana e da cultura em rotação simultaneamente, a máxima vazão unitária média foi evidenciada no período de 11 a 15 maio, sendo igual a  $0,32 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ . Quando considerada apenas a disponibilidade hídrica em base anual, o mês de maio era o restritivo para a expansão das áreas irrigadas, em função da máxima demanda

para a irrigação. Entretanto, durante esse mês há um aumento de 117 a 168% na disponibilidade hídrica em base mensal, comparada com a vazão em base anual (OLIVEIRA et al., 2013). Dessa forma, o período mais crítico deixa de ocorrer em maio.

Nos meses com menores disponibilidades hídricas mensais, que são os meses de agosto, setembro e outubro, há uma substancial redução nas vazões unitárias médias para a irrigação, tendo em vista que a metade da área correspondente às culturas em rotação encontra-se em pousio, fazendo com que a demanda média para a irrigação caia pela metade. Sendo assim, quando considerada a disponibilidade hídrica em base mensal, para esse novo calendário, o período mais restritivo para a expansão das áreas irrigadas passa a ocorrer de 8 a 12 de outubro, com uma demanda média estimada em  $0,14 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ .

Considerando as vazões unitárias médias durante o período mais restritivo em toda a sub-bacia e a disponibilidade hídrica em base mensal referente ao mês de outubro, a  $API_{\text{acum}}$  estimada na foz do ribeirão Entre Ribeiros foi de 29.294 ha, tendo um aumento de 190% em relação à API estimada no período de 11 a 15 de maio com base na vazão anual, sendo que 2,2% desse aumento está atribuído ao incremento na vazão no mês de outubro e 187,8% atribuído à redução das vazões unitárias médias.

Na Figura 30 são apresentadas as diferenças relativas ( $\Delta API_{A-M}$ ) entre as  $API_{\text{acum}}$  obtidas no período de 8 a 12 de outubro com a vazão mensal ( $API_{\text{acum}}$  mensal) e as  $API_{\text{acum}}$  obtidas no período de 11 a 15 de maio com a vazão anual ( $API_{\text{acum}}$  anual), em todos os trechos da hidrografia do Entre Ribeiros. Nota-se que as  $\Delta API_{A-M}$  variaram de 132 a 267%, com as maiores relações evidenciadas nos trechos ao sul e as menores ao norte da sub-bacia, sendo que o comportamento destas relações, além de estar relacionado com o aumento da disponibilidade hídrica em base mensal, também está relacionado com as variações das demandas hídricas ao longo da sub-bacia.

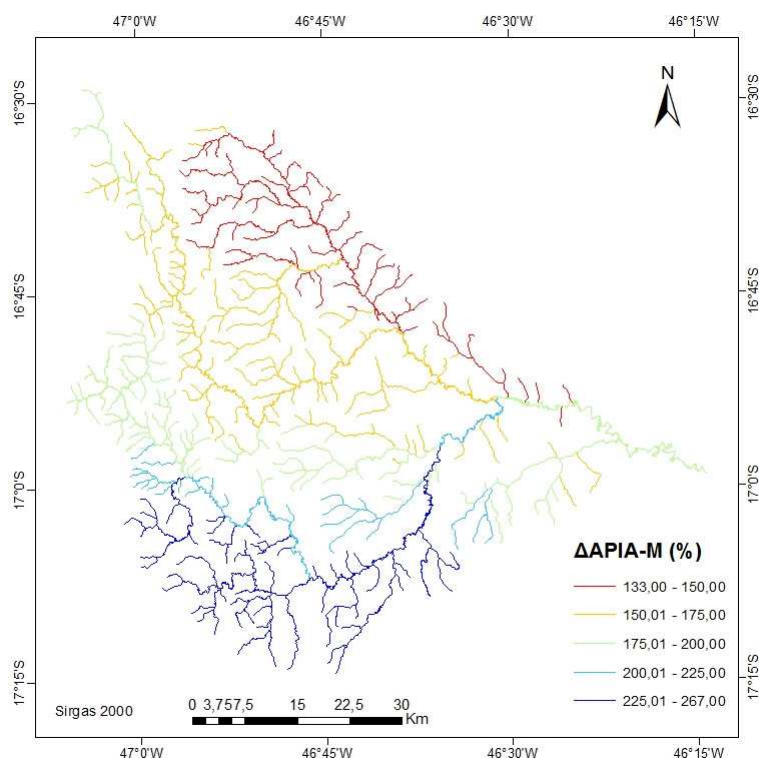


Figura 30 - Diferença relativa ( $\Delta API_{A-M}$ ) entre as  $API_{acum}$  mensal e  $API_{acum}$  anual em cada trecho da hidrografia da sub-bacia do ribeirão Entre Rios.

De acordo com Silva (2014), este calendário de cultivo considerando apenas a rotação entre o milho e o feijão / soja não é o mais indicado devido às altas demandas hídricas para a irrigação. Entretanto, no presente trabalho, constatou-se que entre os três calendários de cultivo analisados, considerando a associação da cana-de-açúcar com as culturas em rotação, este calendário foi o que apresentou a maior possibilidade de expansão das áreas irrigadas na sub-bacia. Com a utilização dele seria possível suprir toda a área irrigada existente no ano de 2014, segundo a AAPER, com possibilidade de expandi-la em até 38%, mesmo que o período crítico tenha ocorrido no mês em que há o menor incremento da vazão mensal em relação à anual.

## 5 CONCLUSÕES

Para uma melhor compreensão, as conclusões são apresentadas em dois blocos: estudo inerente à bacia do Rio Paracatu, e em suas sub-bacias, considerando os critérios vigentes na legislação do estado de Minas Gerais, para as condições de disponibilidade hídrica natural e potencial, com irrigação plena e com déficit; e o estudo inerente à sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros, no qual foi considerada a potencialidade do uso do critério sazonal de vazões e as demandas associadas a irrigação plena.

Com base nos resultados obtidos para a bacia do Rio Paracatu, e suas principais sub-bacias, chegou-se às seguintes conclusões:

- a disponibilidade hídrica natural permissível para outorga é suficiente para atender apenas 21% das demandas hídricas das culturas atualmente plantadas na bacia, sendo que para as principais sub-bacias consideradas, apenas no Baixo Paracatu haveria disponibilidade hídrica natural para atender as demandas associadas à irrigação plena. Quando utilizada a disponibilidade hídrica potencial, é possível atender a todas as demandas hídricas das culturas atualmente plantadas e, ainda, permite um potencial de expansão de 170% da área plantada;

- quando se considera o calendário de cultivo mais crítico, ocorre uma sobreposição das demandas hídricas para a irrigação da cana e da cultura em rotação, implicando na mudança do período com as demandas máximas de setembro para julho. Dessa forma, houve um aumento de quase 10% na demanda em relação ao calendário de uso mais frequente, resultando em uma queda da mesma proporção nas API's; e

- a consideração da irrigação com déficit no calendário de uso mais frequente resultou na transferência do período mais crítico de setembro para abril. Mesmo com um aumento de 19% nas API's, proporcionada pela aplicação do déficit, em relação às API's obtidas no mesmo período na irrigação plena, não é possível atender as demandas hídricas das culturas atualmente plantadas na bacia. Já nas sub-bacias, é possível suprir essas demandas no Baixo Paracatu e no Rio do Sono.

Com base nos resultados obtidos para a sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros, concluiu-se que:

- a possibilidade de suprimento das demandas hídricas das áreas atualmente irrigadas na sub-bacia variou de acordo com cada calendário de cultivo analisado. Para o calendário de cultivo de uso mais frequente, o período mais crítico ocorreu no mês de outubro e, em função da disponibilidade hídrica deste mês, é possível suprir 70% da área atualmente irrigada;

- no calendário de uso mais crítico, o período mais restritivo ocorreu no mês de setembro. Mas, devido ao aumento das demandas hídricas para a irrigação, em relação ao calendário de uso mais frequente, a disponibilidade hídrica do mês de setembro é suficiente para suprir 60% da área atualmente irrigada na sub-bacia; e

- para o calendário de cultivo em que as sementeiras das culturas em rotação são atrasadas em um mês em relação ao calendário mais frequente, o período crítico ocorreu no mês de outubro e, como há demandas hídricas apenas na área ocupada com cana, a disponibilidade hídrica desse mês possibilita suprir toda a área atualmente irrigada na bacia e, ainda, há possibilidade de expansão em mais de 30% dessa área.

## REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil:2013. 2013a.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil – Relatório síntese. Brasília-DF. 2016.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos. 2009.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas. 2013b.

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

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. I 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. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm)>. Acesso em 15 de abril de 2015.

CAIXETA, S. P. **Produção e valor nutritivo de quatro variedades de cana-de-açúcar submetidas a diferentes lâminas de água e doses de potássio, na região do Alto Paranaíba**, MG, 2013. 66f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG. 2013.

CARVALHO, L. C.; BUENO, R. C. O. F.; CARVALHO, M. M.; FAVORETO, A. L.; GODOY, A. F. Cana-de-açúcar e álcool combustível: histórico, sustentabilidade e segurança energética. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, v. 9, n. 16, p. 530, 2013.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Perfil do Setor do Açúcar e do Álcool no Brasil** - Safra 2011/2012. Brasília, Brasil. 2013.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar - Safra 2016/17 - Primeiro levantamento**, Brasília, v.3, n.1, p. 1-66, abril 2016

DAB. Diagnóstico ambiental da sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros. 2003. Irriplan Engenharia Ltda.

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

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balço Energético Nacional 2014**, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) – **Biocombustíveis**, 2015. Disponível em: < <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONT000fzvqjfcy02wx5ok0q43a0rv2bu8l0>> Acesso em 15 de maio de 2016.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. Critério de outorga sazonal para a agricultura irrigada no estado de Minas Gerais. Estudo de caso. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, v. 71/72, p. 1–13, 2006.

GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: TEERE, I.D.; PEET, M.M. **Crop-water relations**. New York: John Willey, 1983. p. 445-479.

GRUPO DE PESQUISA EM RECURSOS HÍDRICOS (GPRH), INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM), Vários colaboradores. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM. 415p. 2012.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Censo Agropecuário. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro> . Acesso em 12 de março de 2016.

IBGE. Censo Agropecuário 2006. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shtm>>,2006. Acesso em 20/05/2016.

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.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março 2012. **Dispõe sobre a vazão de referência para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais**. Disponível em: < <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/CTIG/4-r-c-semad-igam-no-1548-versao-publicada.pdf>>. Acesso em: 20 de abril de 2016.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D .M. Water relations in sugarcane and response to water déficits. *Field Crops Research* 92, 2005, 185 – 202.

IPEA – INSTITUTO DE ECONÔMICA APLICADA. **Biocombustível no Brasil: Etanol e Biodiesel– Comunicados do IPEA – n 53**, maio de 2010.

LEITE, R.C.C.; LEAL, M.L., 2007. O biocombustível no Brasil. *Novos Estudos*. 78, 15-21.

LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B.; Direct impacts on local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105 – 109, 2011.

MARTINS, V. A.; OLIVETTE, M. P. A. Cana-de-açúcar - safra 2013/14 – e Fatores Climáticos: panorama dos impactos na produtividade nos Escritórios de Desenvolvimento Rural (EDRs) no Estado de São Paulo. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 10, n. 3, 2015.

MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D.; LARA, M. S.; PRUSKI, F. F. Índices de Conflito pelo uso da Água da Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 221–228, 2014.

NOVAES, L. F.; PRUSKI, F. F.; QUEIROZ, D. O.; RODRIGUEZ, R. del G.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Modelo para quantificação da disponibilidade hídrica: Parte 2 – análise do comportamento do modelo para estimativa da  $Q_{7,10}$  na bacia do Paracatu. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.14, n., p. 27-39, 2009b.

NUNES, A. A.; PRUSKI, F. F. The effect of reservoirs on water availability. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n.1, p. 7 – 15. 2015.

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, R.M., ALVEZ JÚNIOR, J., CASAROLI, D., SALES, D.L., RODRIGUEZ, W.D.M., SOUZA, J.M.F. Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no cerrado brasileiro. **Irriga, Botucatu, Irriga & Inovagri**. Edição Especial, p. 149-157. 2015.

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.; NUNES, A.A.; REGO, F. S.; SOUZA, M. F. Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 1, p. 51-59, 2012.

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.

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. 2013.

RODRIGUES, N. C. **Modelagem da disponibilidade hídrica natural na bacia do Rio Paracatu em cenário de mudanças climáticas**, 2013. 61f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG. 2013.

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.

ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1991 – 1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19. n.2, 113 – 122, 2004.

SALLET, C. L.; ALVIM, A. M. Biocombustíveis: uma análise da evolução do biodiesel no Brasil. **Economia & Tecnologia**, v. 25. Abril/junho. 2011.

SALOMÉ, J. L.; SAKAI, R. H.; AMBROSANO, E. Viabilidade econômica da rotação de adubos verdes com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 2, p. 116-119, Out. 2007.

SANTOS, R. R. S. **Crise hídrica na irrigação: O Caso do Ribeirão Entre-Ribeiros (MG)**, 2007. 116 p. Dissertação ( Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2007.

SANTOS, M. A. L. **Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (Saccharum spp): Um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas**. 2005. 100 f. Tese (doutorado) – Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 2005.

SCARPARE, F.V., HERNANDES, T.A.D., RUIZ-CORRÊA, S.T., KOLLN, O.T., GAVA, G.J.C., SANTOS, L.N.S., VICTÓRIA, R.L., Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4576–4584, 2015.

SILVA, M. S. **Adequação da disponibilidade hídrica com a demanda de água na agricultura**. 2014. 102 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2014.

SILVA, M. A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. L; GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação de gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v 18, n. 3, p. 241 – 249, 2014.

SOUZA, J. K. C.; SILVA, S.; NETO, J. D.; SILVA, M. B. R.; TEODORO, I. Importância da irrigação para a produção de cana-de-açúcar no nordeste do Brasil. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 27, n.2, p. 133 – 140, 2012.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T. Acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar por meio de séries temporais de NDVI do sensor Modis. **XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR**, INPE, Mai. 2011. p.0391.

TEODORO, I. **Resposta técnico-econômicas da cana-de-açúcar a níveis de irrigação e adubação nitrogenada**. 2011. 82 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2011.

TEODORO, I.; NETO, J. D.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; BRITO, K. S.; SÁ, L. A.; SANTOS, M. A. L.; SARMENTO, P. L. V. S. Isoquantas de produtividade da cana-de-açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 387 – 401, 2013.

VASCONCELOS, V. V. **Frentes agrícolas de irrigação e zoneamento ecológico-econômico: estudo de caso da Bacia de Entre-Ribeiros – Noroeste de Minas Gerais**, 2010. 142 p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG. 2010.

VASCONCELOS, V. V.; MARTINS JUNIOR, P. P.; HADAD, R. M. Bacia hidrográfica e hidrogeológica de Entre-Ribeiros: Zonas prováveis de recarga e análise dos impactos ambientais históricos. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, v. 32, n. 3, p. 560–572, 2012.

VERGARA, F. E.; REIS, F. C. DOS R.; MAGALHÃES FILHO, L. N. L.; REZENDE, C. S. A. Proposta de vazão de referência  $Q_{90}$  para o rio Formoso na bacia do Araguaia. **Engenharia Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 84–102, 2013.

XAVIER, A.C., KING, C.W., SCANLON, B.R., 2016. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980- 2013). **International Journal. Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2015.

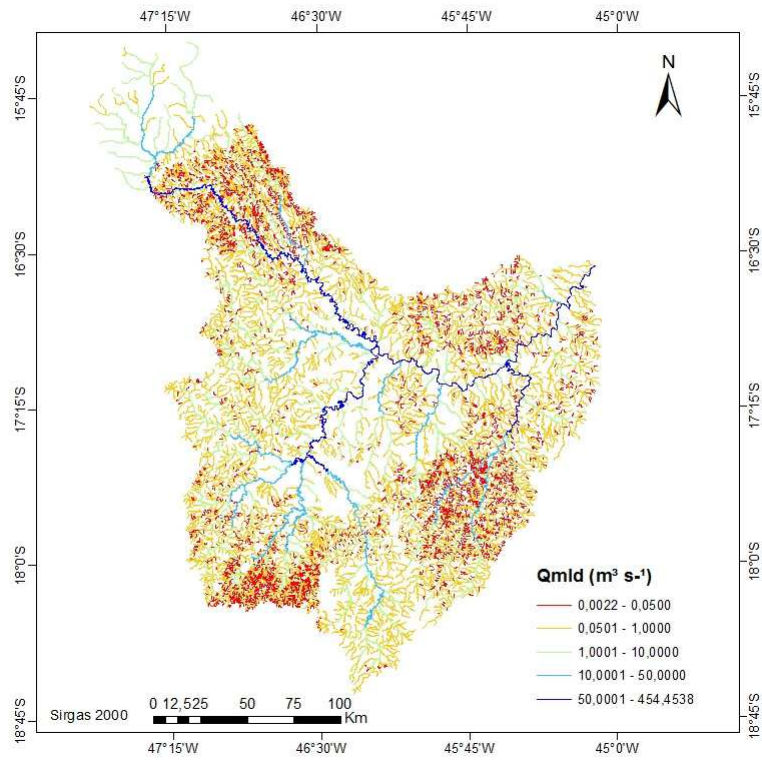
## APÊNDICES

## APÊNDICE A

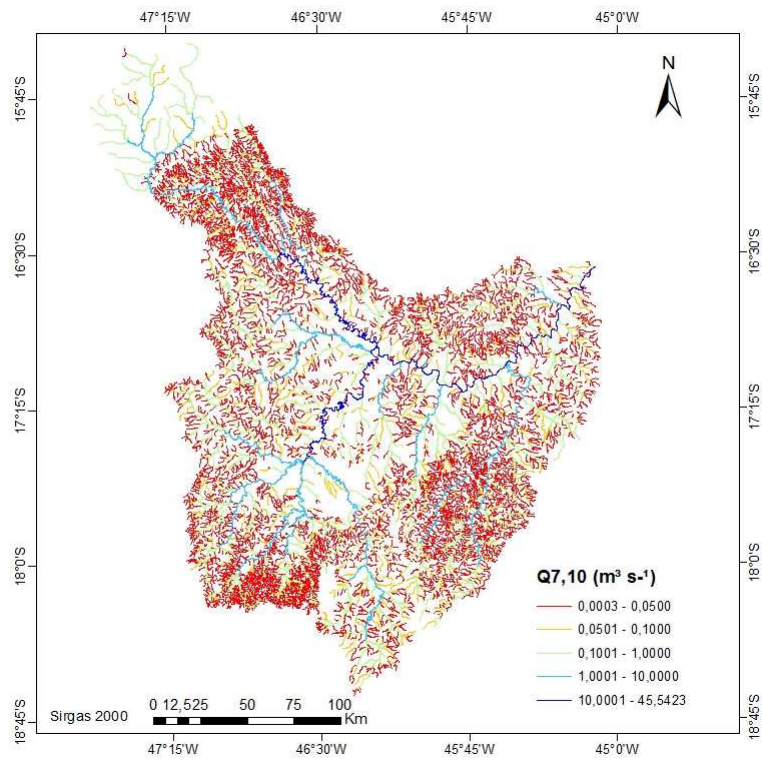
Tabela 1A - Municípios pertencentes a bacia do Rio Paracatu e suas respectivas áreas totais, áreas plantadas com cana-de-açúcar (A<sub>C-M</sub>) e com todos as culturas (A<sub>T-M</sub>) em 2015 (IBGE, 2015)

<b>Município</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>A<sub>C-M</sub> (ha)</b>	<b>A<sub>T-M</sub> (ha)</b>
Bonfinópolis de Minas	1850,0	160,0	49269,0
Brasilândia de Minas	2510,0	1750,0	4065,0
Unai	8448,0	5296,0	252311,0
Cabeceiras	1127,0	70,0	62122,0
Cristalina	6162,0	0,0	385332,0
Formosa	5812,0	6000,0	28257,0
Distrito Federal	5780,0	456,0	161011,0
Cabeceira Grande	1032,0	0,0	22734,0
Dom Bosco	817,0	12,0	6162,0
Natalândia	469,0	0,0	1360,0
Paracatu	8230,0	15890,0	180523,0
João Pinheiro	10727,0	28786,0	39976,0
Lagoa Grande	1236,0	48,0	8142,0
Patos de Minas	3190,0	798,0	31109,0
Presidente Olegário	3504,0	1818,0	38712,0
Varzão de Minas	652,0	2582,0	15714,0
Coromandel	3313,0	0,0	88619,0
Guarda-Mor	2070,0	40,0	89795,0
Lagamar	1475,0	0,0	5194,0
Vazante	1913,0	24,0	3989,0
Buritzeiro	7218,0	120,0	22383,0
São Gonçalo de Abaete	2692,0	110,0	7874,0
Santa Fé de Minas	2917,0	0,0	775,0
São Romão	2434,0	180,0	8810,0

## APÊNDICE B

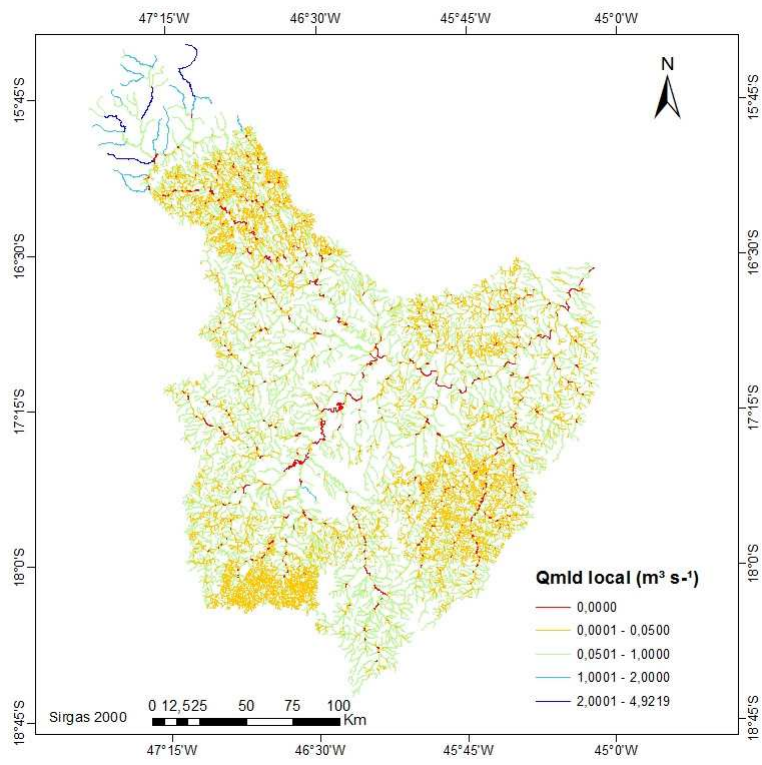


(a)

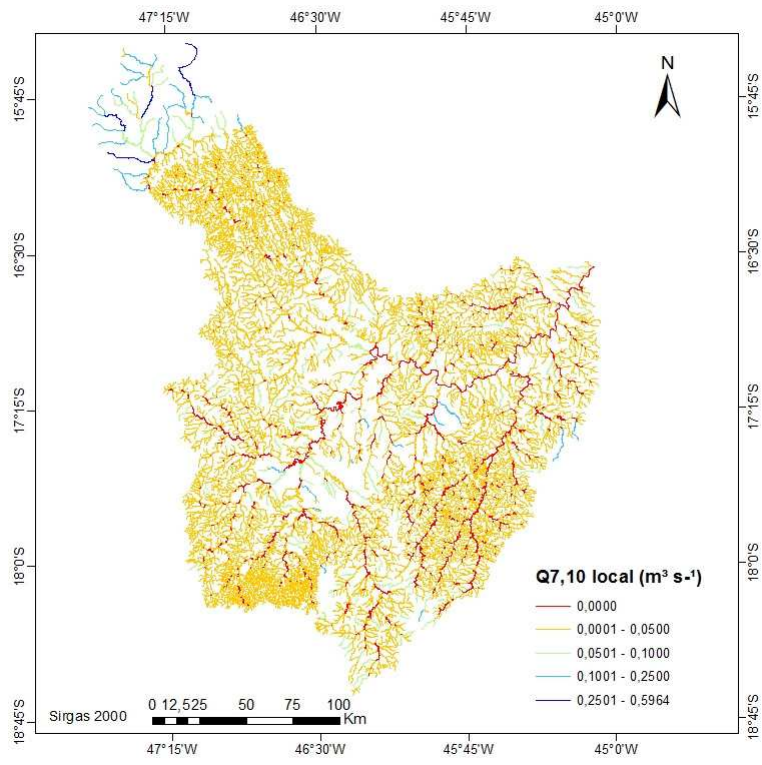


(b)

Figura 1B -  $Q_{mld}$  (a) e  $Q_{7,10}$  (b) na bacia do Rio Paracatu.



(a)



(b)

Figura 2B - Qmld local (a) e Q7,10 local (b) na bacia do Rio Paracatu.